



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ



ISBN 978-5-9624-1747-9

Редакционная коллегия:

Сутырина Е. Н., Латышева И. В., Вологжина С. Ж.

Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы II Всерос. науч.-практ. конф., приуроченной к 55-летию кафедры гидрологии и природопользования ИГУ. Иркутск, 5–7 июня 2019 г. / ФГБОУ ВО «ИГУ» ; [редкол.: Сутырина Е. Н., Латышева И. В., Вологжина С. Ж.]. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2019. – 1 электрон. опт. диск. (CD-ROM). – Загл. с этикетки диска.

ISBN 978-5-9624-1747-9

Материалы отражают результаты исследований в гидрометеорологии по направлениям: "Мониторинг, моделирование и прогнозирование состояния водных объектов суши", "Опасные гидрометеорологические явления и процессы", "Погода и климат. Мониторинг и прогнозирование", "Региональные особенности атмосферных процессов", "Современные информационные системы в гидрометеорологии", "Современные методы и средства гидрометеорологических наблюдений".

Предназначено специалистам в области гидрометеорологии, географии, экологии и природопользования, работникам научных и образовательных учреждений, аспирантам и студентам.

При подготовке материалов к публикации сохранен авторский стиль изложения с минимальными редакционными правками. Ответственность за содержание материалов несут авторы.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Иркутский государственный университет»

664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1; тел. (3952) 24-34-53

Издательство ИГУ

664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 124; тел. (3952) 52-18-53; e-mail: izdat@lawinstitut.ru

Подписано к использованию 27. 09. 2019. Тираж 30 экз. Объем 48,8 Мб.

Тип компьютера, процессор, частота:	32-разрядный процессор, 1 ГГц или выше
Оперативная память (RAM):	256 МБ
Необходимо на винчестере:	320 МБ
Операционные системы:	ОС Microsoft® Windows® XP, 7, 8 или 8.1. ОС Mac OS X
Видеосистема:	Разрешение экрана 1024x768
Акустическая система:	Не требуется
Дополнительное оборудование:	Не требуется
Дополнительные программные средства:	Adobe Reader 6 или выше

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»
Географический факультет
ФГБУН Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева
Сибирского отделения Российской академии наук
ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения
Российской академии наук
ФГБУ «Иркутское управление по гидрометеорологии
и мониторингу окружающей среды»



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ

ISBN 978-5-9624-1747-9

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»
Географический факультет

ФГБУН Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева
Сибирского отделения Российской академии наук

ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения
Российской академии наук

ФГБУ «Иркутское управление по гидрометеорологии
и мониторингу окружающей среды»



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ



ISBN 978-5-9624-1747-9

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Большаков А. А. Направление развития аналитического приборостроения в АО «НИИ ТМ»	9
Ветров В. А. Основы мониторинга химического состава воды озера Байкал	20
Иваньо Я. М. Оценка засухи, наблюдавшейся в Иркутской области в 2015 г.	35
Крестьяникова Н. Н. Современные методы и средства радиозондирования	41
Смольков Г. Я. Проявление солнечно-земных связей в гидрометеорологии	57
Суторихин И. А., Харламова Н. Ф., Самойлова С. Ю., Коломейцев А. А., Кураков С. А. Уровенный режим озера Красиловское (Алтайский край) в 2013–2017 гг.	63
Токарев В. М., Здерева М. Я. Применение бинарных деревьев решений для прогноза метеорологических явлений	70

СЕКЦИЯ «МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ СУШИ»

Абасов Н. В., Бережных Т. В., Никитин В. М., Осипчук Е. Н. Изменения уровня режима оз. Байкал и расходов р. Ангары в современных климатических условиях	81
Аргучинцева А. В. К юбилею кафедры гидрологии и природопользования (прошлое, настоящее)	91
Артамонова К. В., Духова Л. А., Лукьянова О. Н., Масленников В. В., Зозуля Н. М. Мониторинг гидрохимического режима озёр Восточной Антарктиды за последние 10 лет	97
Ашрапов У. Т., Алимов Г. Р., Саямова К. Д., Естифеева А. Г. Разработка акустико-эмиссионной системы для контроля образования трещин в бетонных конструкциях гидротехнических сооружений	107
Бархатова О. А. Подготовка гидрологов в России	121
Гаврилова А. А., Ильичева Е. А., Павлов М. В. Морфодинамика вершины дельты р. Селенги на современном этапе развития	127
Гайдукова Е. В., А. Е. Баймаганбетов, Девятов В. С. Метод краткосрочного прогнозирования расходов воды с применением фрактальной диагностики	134
Гречушников М. Г. Оценка суммарной эмиссии метана с поверхности водохранилищ РФ по материалам глобальной БД и натурным наблюдениям	140

Грицук И. И., Масликова О. Я., Ионов Д. Н., Долгополова Е. Н. Протаивание и береговая эрозия рек на повороте русла в условиях криолитозоны	146
Даценко Ю. С., Пуклаков В. В. Моделирование многолетних изменений экологического состояния стратифицированного водохранилища	157
Дебольская Е. И. Математическое моделирование деформации криволинейных русел, подверженных термоэрозии	162
Елтай А. Ф. Мониторинг ветрового волнения на казахстанском побережье Каспийского моря	172
Казакова В. М., Алексеева Л. П. Геохимия подземных рассолов северо-восточной части Ангаро-Ленского артезианского бассейна	178
Колпакова Е. С., Вельямидова А. В. Мониторинг содержания хлороформа в воде пресноводных водоемов	185
Котова В. Е., Андреев Ю. А. Сравнительный анализ содержания ПАУ в донных отложениях водных объектов и оценка возможных источников их поступления	191
Кульнева В. В., Звягинцева А. В. Моделирование системы мониторинга гидрологических явлений территории гидропоста – г. Павловск (Воронежская область)	203
Потапова Е. В., Бархатова О. А., Макаров А. А. Водоохранные зоны морей	216
Резников С. А., Аниканова М. Н., Якунина О. В., Аджиев Р. А. Новые данные об экологическом состоянии озера Байкал	223
Рогачёв А. П., Ильичёва Е. А., Павлов М. В. Картографический подход к оценке эрозионно-аккумулятивных процессов в дельте реки Селенги	235
Соломонова И. В., Фролов А. В. Статистические неоднородности в водном балансе крупных рек Архангельской области	241
Сутырина Е. Н., Вяткин А. Н. Влияние циркуляционных факторов на ледовый режим водоёмов бассейна р. Селенги	249
Сутырина Е. Н., Обытоцкий Г. В. Изучение антициклонической вихревой структуры у полуострова Святой Нос в оз. Байкал по ДДЗ	257
Томберг И. В., Синюкович В. Н., Сороковикова Л. М., Ширеторова В. Г., Павлов И. А. Экологическое состояние р. Селенги в современный период	264
Троицкая Е. С., Медвежонкова О. В., Шимараев М. Н., Тимошкин О. А. Сезонная и межгодовая динамика температуры воды в литорали Южного Байкала (пос. Листвянка – м. Берёзовый – губа Большие Коты) в 2000–2018 гг.	271
Царенкова Д. В., Сутырина Е. Н. Современные изменения гидрологических характеристик р. Ушаковки	278
Чернявская И. А., Синюкович В. Н., Чернышов М. С. Водный режим оз. Байкал в XXI столетии	286

Чудунов М. А. Колебание высоты снежного покрова в границах бассейна малой реки	292
---	-----

СЕКЦИЯ «ОПАСНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ
ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ»

Амосова И. Ю., Ильичева Е. А. Пространственная дифференциация максимальной водоносной способности речных систем бассейна озера Байкал	298
Аргучинцева А. В., Голубева Л. В. Индекс пожароопасности	303
Боронина А. С., Четверова А. А., Попов С. В., Пряхина Г. В. Обзор потенциально прорывоопасных озёр и последствия прохождения их паводков в районах холмов Тала и Ларсеманн (Восточная Антарктида)	307
Котова Н. А. Мониторинг и прогнозирование неблагоприятных и опасных гидрологических явлений на территории Иркутской области	318
Кочеева Н. А., Шанкибаева М. Х. Осадки экстремального характера в Северном Алтае. Наблюдения, последствия и значение для природных и природно-антропогенных комплексов	324
Магрицкий Д. В. Гидрологические ограничения водопотребления в Российской Арктике	329
Самохина О. Ф., Кононова Н. К. Роль циркуляции атмосферы в повторяемости наводнений в России в 2012–2018 гг.	341
Санин А. Ю. Влияние опасных гидрометеорологических явлений и процессов на хозяйственную деятельность человека на прибрежных рекреационных территориях России	349
Семакова Э. Р., Попов А. С., В. Сафронов, Семаков Д. Г., Bühler Y. Оценка лавинной и селевой опасности небольших горных бассейнов Узбекистана на основе численного моделирования в программе RAMMS	361

СЕКЦИЯ «ПОГОДА И КЛИМАТ. МОНИТОРИНГ
И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ»

Антохина О. Ю., Антохин П. Н., Мартынова Ю. В. Каталог атмосферных осадков и их статистические характеристики для бассейна р. Селенги (июль)	370
Антохина О. Ю., Антохин П. Н., Латышева И. В., Мордвинов В. И. Особенности крупномасштабных волновых процессов в атмосфере над Евразией в периоды возникновения экстремальных природных пожаров в Сибири и на Дальнем Востоке	383
Антохина О. Ю., Антохин П. Н., Аршинова В. Г., Аршинов М. Ю., Белан Б. Д., Белан С. Б., Давыдов Д. К., Дудорова Н. В., Ивлев Г. А., Козлов А. В., Рассказчикова Т. М., Савкин Д. Е., Симо-	

ненков Д. В., Складнева Т. К., Толмачев Г. Н., Фофонов А. В. Исследование влияния типа воздушных масс на химический состав атмосферы над г. Томском	395
Аргучинцева А. В., Tea M., Dje Kouakou Bernard. Климатические особенности Республики Кот-д’Ивуар (Африка)	406
Винокурова Е. В., Анискина О. Г., Моцаков М. А. Исследование изменения площади ледовых покровов Арктики по данным реанализов	410
Вологжина С. Ж., Латышева И. В., Лощенко К. А., Савватеева К. В. Оценка климатической уязвимости западного побережья оз. Байкал	419
Девятова Е. В., Антохина О. Ю., Латышева И. В., Мордвинов В. И. Межгодовая изменчивость общего облачного покрова в июле на юге Иркутской области, Бурятии и в Монголии по данным архива ECMWF ERA-Interim	426
Китаев Л. М., Аблеева В. А., Коробов Е. Д., Желтухин А. С. Региональные особенности взаимосвязи изменений приземной температуры воздуха, снежного покрова и температуры почвы в условиях Восточно-Европейской равнины	437
Китаев Л. М. Сопоставление межгодовых колебаний характеристик снежного покрова и краткосрочных изменений климата	448
Кононова Н. К. Связь изменений глобальной циркуляции атмосферы и температуры воздуха за период 1899–2018 гг.	457
Кочеева Н. А., Какорин В. А. Мониторинг изменений температуры в перигляциальной зоне высокогорья Республики Алтай	468
Латышева И. В., Макаренко Е. Л., Максютова Е. В. Климатические и циркуляционные факторы лесных пожаров на территории Байкальского региона	473
Литвиненко В. В., Фролов Д. М. Структура снежного покрова и особенности зимнего сезона 2018–2019 гг. в Московском регионе	485
Лобанов В. А., Маммедов С. А., Наурузбаева Ж. К., Фань Сяо Цинь. Методы и результаты оценки современных региональных изменений климата	494
Наурузбаева Ж. К., Лобанов В. А. Основные климатические характеристики и ледовый режим Каспийского моря	508
Соломонова И. В., Дианский Н. А., Гусев А. В. Климатические изменения в Арктике и их прогностические оценки на основе комбинированного сценария	520

СЕКЦИЯ «РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ
АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ»

Gaál L., Vorobyeva O., Nechaj P. Typical meteorological situations in the Little Carpathian Mountain range from the perspective of aviation	532
--	-----

Ахтиманкина А. В., Колупов А. С. Динамика показателей радиационного состояния окружающей среды Иркутской области за период 2007–2017 гг.	544
Бальжанов Т. С., Заяханов А. С., Жамсуева Г. С., Цыдыпов В. В. Влияние динамических процессов на вариации приземного озона и других малых газовых примесей вблизи береговой зоны оз. Байкал в 2018 г.	551
Громов С. А., Галушин Д. А., Которова М. С., Смирнов В. Д. Оценка климатической повторяемости путей переноса аэрозолей морского происхождения на территорию Приморья по данным реанализа для исследования поступления морского биоматериала в атмосферу региона	556
Жамбажамц Л., Ганболд Б. Оценка WRF облачных микрофизических схем для прогнозирования сильных дождей в западной и центральной Монголии	563
Ильина С. П., Гостева А. А. Изучение влияния морфометрических характеристик рельефа на перераспределение загрязнений в атмосферном воздухе г. Красноярска	569
Кононова Н. К., Латышева И. В. Исследование циркуляционных факторов изменений климата на территории Сибирского сектора по данным типизации Б. Л. Дзердзеевского	578
Кульнева В. В., Звягинцева А. В. Синергизм при загрязнении воздуха городской среде на фоне неблагоприятных метеорологических условий	587
Лощенко К. А., Астафьева Н. В., Гарашук С. А., Сверкунова Т. А. Климатические и синоптические особенности территории Иркутской области	592
Новикова С. А. Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха г. Шелехова	600
Новикова С. А., Высоких Н. О. Источники выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух при строительстве поисковой скважины № 665 Иктехского участка недр (Якутия)	611
Поднебесных Н. В. Крупномасштабная атмосферная циркуляция над территорией Сибири за период 1976–2015 гг.	624
Сунграпова И. П., Заяханов А. С., Жамсуева Г. С., Цыдыпов В. В. Результаты исследований микродисперсного аэрозоля в приземном слое атмосферы г. Улан-Удэ	632
Холопцев А. В., Шульга Т. Я. Североатлантическое колебание и вторжения арктического воздуха	637
Цыдыпов В. В., Заяханов А. С., Жамсуева Г. С., Бальжанов Т. С., Сунграпова И. П., Нагуслаев С. А., Дементьева А. Л. Результаты маршрутных измерений малых газовых примесей в атмосфере юго-восточного побережья оз. Байкал в летний период 2018 г.	649
Чистякова Е. А., Алюяров Р. М., Неелова Л. О. «Вариации заточка Атлантических вод на шельф Западного Шпицбергена как отклик на форсирующие воздействия атмосферной циркуляции»	655

Щербуль З. З. Воздействие современных климатических изменений на экосистему Северного Дагестана	663
--	-----

СЕКЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ»

Артамонов А. Ю., Варенцов М. И., Пашкин А. Д., Репина И. А. Измерения пространственной изменчивости температуры над неоднородным ландшафтом с помощью квадрокоптера	671
Балагуров А. М. Единство аэрологических измерений	679
Брюханов И. Д., Локтюшин О. Ю. Влияние метеорологических условий на особенности микроструктуры конденсационных следов самолётов	692
Ветров В. А. Мониторинг химического состава снежного покрова: концепция, методология и результаты за 30 лет наблюдений	699
Кострова С. С., Тарасов П. Е., Майер Х., Фернандой Ф. Изотопный состав атмосферных осадков Байкальского региона (на примере г. Иркутска)	714
Крестьяникова Н. Н. Опорная сеть радиозондирования	722
Поздова А. К., Сердюк П. И. Газоанализаторы на основе полупроводниковых сенсоров для определения концентрации атмосферных загрязнителей	729
Решин Н. А., Кагукина С. А., Тимофеева Л. А., Баранова А. Р. Особенности оценки прозрачности воды Ладожского озера по снимкам спутника Landsat-8	740

СЕРИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ»

Полозок А. А., Фомина И. Н. Водообмен через Керченский пролив по натурным данным и данным моделирования	748
Русин А. В., Вологжина С. Ж., Таюрская А. П. Применимость данных системы Sorpenicus для оценки качества атмосферного воздуха г. Иркутска	754
Серова О. А., Тимофеева Л. А., Решин Н. А., Абрамов Д. В. Динамическая природа гидрологического подобия	760

УДК 614.8.084

Направление развития аналитического приборостроения в АО «НИИ ТМ»

А. А. Большаков (a.bolshakov@niitm.spb.ru)

АО «Научно-исследовательский институт точной механики», г. Санкт-Петербург

Аннотация. Представлен краткий обзор гражданской продукции АО «НИИ ТМ» и более широко освещено направление развития аналитического приборостроения.

Ключевые слова: полупроводниковый сенсор, термокаталитический сенсор, люминесцентный сенсор на кислород, оптические сенсоры на различные газы, течеискатель, газоанализатор, аэрозоли, электроиндукционный метод, контроль воздуха, атмосферные загрязнители.

Введение

Вопросы, которые сегодня возникают перед человечеством по наблюдению за окружающей средой и ее защите не могут быть решены без применения современных приборов промышленного и экологического контроля.

Мировые производители готовы представить широкий спектр измерительных приборов различного типа и класса для осуществления промышленного и экологического контроля. К сожалению, за последнюю четверть века Россия выбыла из поля научных разработок современных измерительных приборов в этой области. И если в области промышленной безопасности ведется создание новых приборов, то в области экологического контроля новые приборы появляются редко и представлены единичными экспериментальными образцами или приборами, разработанными еще в СССР с частичной модернизацией в настоящее время.

Это и не удивительно. Создание новых измерительных приборов требует временных, финансовых и научно-промышленных ресурсов, а в условиях, когда на рынке существуют готовые зарубежные аналоги, это становится малопривлекательным занятием.

В 2014 г. ситуация изменилась благодаря санкциям, введенным в отношении Российской Федерации, а также изменениям курса валют и требований со стороны государства об использовании измерительных приборов Российского производства в космической отрасли. Все это привело к необходимости создания своих измерительных приборов.

АО «НИИ ТМ» обладая научным и производственным потенциалом, а также опытом создания изделий для космической отрасли включилось в работу по созданию приборов для контроля газовой среды на борту пилотируемых космических аппаратов.

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт точной механики» (далее АО «НИИ ТМ») является одним из крупнейших предприятий г. Санкт-Петербурга, имеющий научно-исследовательские отделы, производство и испытательный центр. АО «НИИ ТМ» был создан в 1947 г. в г. Ленинграде в интересах военно-промышленного комплекса. Свою деятельность начал с разработок, изготовления и эксплуатации систем управления пиротехническими зарядами, специализированной датчиковой аппаратуры и постепенно перешел к работам по созданию сложных систем управления космической техникой. С момента основания АО «НИИ ТМ» разработано более 150 систем и изделий для 50 комплексов различного назначения, в том числе, для космических программ: «Марс», «Венера», «Луна», «Энергия-Буран», «Луноход», «Ангара», «Барс», «Персона». За большие заслуги в 1976 г. институт был награжден орденом «Знак почета».

Производственная база АО «НИИ ТМ» позволяет обеспечить серийное изготовление разрабатываемой предприятием продукции, проводить полный цикл ее отработки и испытаний, ремонт и утилизацию. На предприятии действует система менеджмента качества по ГОСТ РВ 0015-002-2012, Положения РК-98, Положения РК-11, Положения РК-11-КТ и ОСТ 134-1028-2012, ГОСТ ISO 9001-2011.

Начиная с января 2016 г. активно развивается аналитическое приборостроение в области газовой сенсорики и контроля аэрозолей газовой среды в замкнутом гермоотсеке пилотируемых космических аппаратов. Это связано прежде всего с работами в интересах предприятий ГК «Роскосмос». В целях расширения области применения полученных результатов АО «НИИ ТМ» активно развивает направление гражданских газоаналитических измерительных приборов для промышленных предприятий, предприятий химической и нефти-газовой отрасли, а также служб экологического контроля окружающей среды. Ведутся работы по созданию электроиндукционных пожарных извещателей, а также на их основе различные измерительных приборов для контроля параметров аэрозоля.

Основой любого газоаналитического измерительного прибора или системы является чувствительный элемент – сенсор. Сенсор, первичный преобразователь, который преобразовывает газовую или аэрозольную концентрацию в измеряемый электрический сигнал.

АО «НИИ ТМ» ведет разработки измерительных приборов на основе собственных сенсоров. В настоящее время созданы газовые сенсоры термокаталитические (термохимические) и полупроводниковые (хемосорбционный), фотолюминесцентный датчик кислорода. Ведутся работы по созданию оптических (инфракрасных) датчиков на горючие и токсичные газы. Для измерения концентрации и состава аэрозоля используются: оптический или электроиндукционный методы.

Газовые сенсоры, датчики и анализаторы АО «НИИ ТМ»

Термокаталитический газовый сенсор СТ-1

Принцип действия термокаталитических сенсоров заключается в окислении углеводородов на каталитически активном элементе. Концентрация газа пропорциональна выделяющемуся теплу, т. е. измеряется тепловой эффект химической реакции, в которой участвует определяемый компонент.

Основной функцией термокаталитического газового сенсора СТ-1 является обнаружение горючих газов в воздухе, и преобразование их концентрации в электрический сигнал. Газовый сенсор СТ-1 предназначен для использования в газоаналитических измерительных приборах для определения опасной концентрации горючих газов в рабочей зоне промышленных предприятий химической, нефтегазовой и угледобывающей отрасли [1]. Технические характеристики СТ-1 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики СТ-1

№ п/п	Наименование параметра. Единицы измерения	Значение параметра
1	Контролируемый газ	Метан, горючие газы
2	Диапазон преобразования, % об	0,1–4,5
3	Функциональная зависимость выходного напряжения сенсора от концентрации	Линейная
4	Напряжение питания, В	2,5±0,1
5	Ток потребления, А	0,115±0,005
6	Время прогрева не более, с	30

Окончание табл. 1

№ п/п	Наименование параметра. Единицы измерения	Значение параметра
7	Время установления показаний, не более, с	5
8	Чувствительность по метану, не менее, мВ/ % об. CH ₄	20 мВ при 1 % об
9	Изменение чувствительности сенсора в диапазоне относительной влажности: от 30 до 90 %, (% , не более)	±20
10	Габаритные размеры, мм – диаметр – высота – длина выводов	9,2±0,1 17,0±0,2 11,5±0,1

Данные характеристики получены при испытаниях газового сенсора с реакционной камерой из нержавеющей стали объемом 1,2 см³ с фильтром в виде сетки из нержавеющей стали с площадью ячеек 0,004 мм², при подаче поверочных газовых смесей CH₄ – воздух с расходом 200±0,2 мл/мин [2].

Полупроводниковый газовый сенсор СП-1

В полупроводниковом газовом сенсоре СП-1 – используют принцип изменения поверхностного сопротивления полупроводникового материала в результате воздействия на него контролируемого газа. Активный слой SnO₂ образует резистивный элемент, который при контакте с контролируемым газом изменяет свою проводимость вследствие хемосорбционных реакций на поверхности металлооксида или в его объеме. Для активации реакции на поверхности SnO₂ формируются активаторы-катализаторы. В качестве активаторов-катализаторов используются элементы Pt, Pd, Ag, и др. Преимуществом полупроводникового сенсора являются высокая чувствительность к малым концентрациям газа, быстрое действие и широкий спектр определяемых газов – сенсор обнаруживает как горючие, так и токсичные газы.

Газовый сенсор СП-1 предназначен для использования в газоаналитических измерительных приборах. Технические характеристики СП-1 представлены в табл. 2

Данные характеристики получены при испытаниях газового сенсора с реакционной камерой из нержавеющей стали объемом 1,2 см³ с фильтром в виде сетки из нержавеющей стали с площадью ячеек 0,004 мм², при подаче поверочных газовых смесей CO (H₂ или CH₄) – воздух с расходом 200±0,2 мл/мин [3].

Таблица 2

Технические характеристики СП-1

№ п/п	Наименование параметра. Единицы измерения	Значение параметра
1	Контролируемый газ	Монооксид углерода CO, водород H ₂ , метан CH ₄
2	Диапазон преобразования, ppm	2–500 (водород, монооксид углерода) 50–500 (метан)
3	Напряжение питания нагревателя, В	1,35±5 % (метан) 0,9±5 % (водород и монооксид углерода)
4	Сопrotивление нагревателя, Ом	3,5±0,3
5	Потребляемая мощность, Вт	0,120
6	Рабочий температурный диапазон, °C	от –10 до +60
7	Рабочий диапазон относительной влажности, %	от 30 до 90
8	Время установления выходного сигнала, не более, с	30
9	Чувствительность, не менее, мВ/ ppm	300 мВ/ 17 ppm CO 300 мВ/ 100 ppm H ₂ 200 мВ/ 100 ppm CH ₄
10	Габаритные размеры, мм – диаметр – высота – длина выводов	9,2±0,1 17,0±0,2 11,5±0,1

Фотолуминесцентный датчик кислорода

В фотолуминесцентном сенсоре используется свойство молекул кислорода принимать энергию, вызывающую тушение люминесценции. Это свойство определяет уникальную избирательность сенсора к кислороду, что позволяет измерять сверхнизкие концентрации кислорода в присутствии неизвестных примесей. Кроме того, люминесцентные сенсоры не потребляют кислород, т. е. не требуют непрерывной массопередачи кислорода путем принудительной подачи кислорода на поверхность сенсора для поддержания постоянного сигнала.

На люминесцентные сенсоры не влияют электромагнитные поля, изменение солености, параметра pH, концентрации ионов тяжелых металлов, газов CO₂ и H₂S и загрязнение чувствительного элемента. Особенно привлекает в фотолуминесцентных сенсорах возможность

их работы в сероводородном слое, где электрохимические датчики через некоторое время теряют работоспособность.

Наконец, фотолюминесцентные сенсоры могут использоваться как в воздухе, так и в воде, а это значит, что градуировку датчиков измерения концентрации растворенного в воде кислорода можно проводить простейшим образом в воздухе – задавая давление воздуха в герметичной камере [4]. Технические характеристики фотолюминесцентного датчика ЛЮМКИС-Г, разработанного в АО «НИИ ТМ» представлены в табл. 3.

Таблица 3

Технические характеристики фотолюминесцентного датчика ЛЮМКИС-Г

№ п/п	Наименование параметра. Единицы измерения	Значение параметра
1	Диапазон измерений кислорода, %	0,1–30
2.	Время прогрева, не более, с	60
3	Время установления показаний, не более, с	5
4	Основная относительная погрешность в нормальных условиях, %, не более	±5
5	Напряжение питания, В	3,3–6,0
6	Средняя потребляемая мощность, Вт, не более	1,0
7	Тип выходного сигнала	UART
8	Средний срок службы, лет, не менее	5
9	Масса, кг, не более	0,1
10	Габаритные размеры, мм	
	– диаметр	20,0±0,1
	– высота	20,0±0,1
	– длина выводов	3,0±0,1

Газоанализатор ГС-1

Газоанализатор ГС-1 предназначен для использования в системах газового контроля или анализа для определения опасной концентрации горючих газов в рабочей зоне, а также паровоздушных смесей в атмосферном воздухе промышленных предприятий химической, нефтегазовой и угледобывающей отрасли. Благодаря оригинальным конструктивным решениям газоанализатор ГС-1:

- обеспечивает возможность комплектования четырьмя типами газовых модулей, что позволяет контролировать один из 13 видов газов;
- функционирует самостоятельно или в составе комплексов и систем мониторинга воздушной среды

- конструкция обеспечивает возможность установку и замену газовых модулей в зависимости от газового состава анализируемой среды без демонтажа ГС-1
- реализован режим самоконтроля с индикацией неисправности в случае отказа
- уровень защиты и взрывозащиты, обеспечивается корпусом не ниже: IP 66 по ГОСТ 14254 и 1ExdIICT6
- используются электронные компоненты и материалы отечественного производства.

Возможно изготовление газоанализатора ГС-1 в варианте исполнения без взрывозащиты и более низким уровнем IP XX. Технические характеристики ГС-1 представлены в табл. 4.

Таблица 4

Технические характеристики ГС-1

№ п/п	Наименование параметра Единицы измерения	Значение параметра
1	Контролируемый газ и диапазон измерений	Метан: 10–500 ppm или 0,1–4,5 % об Моноксид углерода: 2–500 ppm Водород: 0,1–4 % или 2–500 ppm Диоксид углерода: 0–5 % об Кислород: 0,1–30 % об Пропан: 0,1–4 % или 10–500 ppm Сероводород: 0–100 ppm Аммиак: 0–100 ppm Диоксид серы: 0–20 ppm Диоксид азота: 0–2 ppm Формальдегид: 0–10 ppm Хлоро-водород: 0–20 ppm Хлор: 0–20 ppm
2	Типы сенсорных блоков и время прогрева, с, не более	Термокаталитический – 30 Оптический – 60 Электрохимический – 60 Полупроводниковый – 3600
.	Типы сенсорных блоков и время установления показаний, не более, с.	Термокаталитический – 5 Оптический – 5 Электрохимический – 40 Полупроводниковый – 40
4	Основная относительная погрешность в нормальных условиях, %, не более	10
5	Напряжение питания, В	10–32
6	Средняя потребляемая мощность, Вт, не более	2,5
7	Тип выходного сигнала	Цифровой: интерфейс RS-485

Окончание табл. 4

№ п/п	Наименование параметра Единицы измерения	Значение параметра
8	Средний срок службы, лет, не менее	15
9	Масса, кг, не более	1,25
10	Габаритные размеры без учета кабельных выводов, мм, не более	130×90×70

Пожарный извещатель АО «НИИ ТМ»

Электроиндукционный пожарный извещатель ИДЭ-4

Электроиндукционный пожарный извещатель ИДЭ-4 позволяет обнаружить микроконцентрации субмикронных частиц дыма, появляющихся при перегреве оборудования, сопровождающегося термическим разложением диэлектриков, искусственных и растительных полимеров, входящих в состав промышленного оборудования.

Электроиндукционный пожарный извещатель ИДЭ-4 предназначен для контроля наличия в атмосфере закрытого помещения высокодисперсных аэрозольных частиц размерами от 0,01 до 0,1 мкм и выдачи сигнала о превышении заданных скорости нарастания и концентрации таких аэрозольных частиц, что обеспечивает:

- обнаружение признаков возникновения пожара на ранней стадии при температуре нагрева материалов ниже температуры воспламенения, до образования очагов тления, выделения дыма и газов;
- высокую селективность к целевым аэрозольным частицам на фоне мешающих воздействий – пыли, дыма и газов. Коэффициент селективности – 100;
- нечувствительность к аэрозольным частицам размерами от 0,5 до 300 мкм;
- нижний предел обнаружения аэрозольных частиц размерами от 0,01 до 0,10 мкм – 0,01 мг/м³;
- сохранность работоспособности при уровне запыленности закрытого помещения не более 3,2 мг/м³;
- автоматический самоконтроль работоспособности электрических цепи «ПОРОГ 1», «ПОРОГ 2» и выдает сигнал на отключение электропитания в случае обнаружения неисправности с выдачей сигнала «ОТКАЗ»;
- автоматическое устранение налипания пыли и других мелкодисперсных аэрозольных частиц на центральном электроде.

Функция автоматического устранения налипания пыли не приводит к срабатыванию сигнала «Предупреждение» и «Пожар»;

- возможность применения на промышленных объектах и в ЖКХ. В наличии сертификат соответствия ГОСТ Р № 0001789 от 28.02.2017 Евразийского агентства технического регулирования и метрологии.

Технические характеристики извещателя ИДЭ-4 представлены в табл. 5 [5].

Таблица 5

Технические характеристики извещателя ИДЭ-4

№ п/п	Наименование параметра. Единицы измерения	Значение параметра
1.	Габаритные размеры изделия, не более, мм	200×138×100
2.	Масса изделия, не более, кг	1,25
3.	Электропитание изделия осуществляется от источника постоянного тока напряжением, В	от 23 до 34
4.	Мощность, потребляемая изделием, не более, Вт:	7
5.	Номинальный режим работы при содержании пыли в газовой среде для аэрозольных частиц размерами от 0,01 до 300,0 мкм, не более, мг/м ³	0,15
6.	Нижний предел обнаружения аэрозольных частиц размером от 0,01 до 0,10 мкм	0,01
7.	Извещатель сохраняет работоспособность при уровне запыленности герметичного отсека, не более, мг/м ³	3,2
8.	Изделие нечувствительно к влиянию пыли и других аэрозольных частиц размерами, более, мкм	0,5–300,0
9.	Коэффициент помехоустойчивости изделия, не менее	100
10.	Время выхода изделия на рабочий режим с момента подачи электропитания, не более, с	126
11.	Быстродействие изделия (время реакции на появление аэрозольных частиц и выдача сигнала), не более, с	4
12.	Рабочая температура окружающей среды, °С	от 0 до плюс 40
13.	Рабочая относительная влажность окружающей среды, %	от 30 до 90
14.	Рабочее давление окружающей среды, мм рт. ст.	от 450 до 970

Стендовое оборудование АО «НИИ ТМ»

Одним из важнейших факторов для реализации представленного Электроиндукционного пожарного извещателя ИДЭ-4 безусловно является контрольно-проверочная аппаратура (КПА). Первоначально процесс калибровки и дальнейшей проверки извещателя ИДЭ-4 осуществлялся при помощи Аэрозольной камеры. Внешний вид Аэрозольной камеры представлен на рис. 1.



Рис. 1. Аэрозольная камера

Аэрозольная камера состоит из замкнутого объема, в который поступают продукты термической деструкции полимерного материала. Нагрев исследуемого образца материала осуществляется по заданному алгоритму с постоянным контролем температуры. Аэрозольная камера позволяет эмитировать пожар в миниатюрном виде. Благодаря этому было установлено, что спектральный состав продуктов термической деструкции полимеров, содержит большое число низкодисперсных частиц размерами до 10 мкм. Аэродисперсная система никогда не бывает устойчивой, поскольку в ней протекают процессы переноса воздушных масс, дисперсионные и конденсационные процессы, возникают вихревые потоки, происходит коагуляция частиц, седиментация под действием силы тяжести, испарение и пр. [5]. Указанные обстоятельства приводят к тому, что в аэрозольной камере счетная концентрация высокодисперсного аэрозоля уменьшается в то время, как количество крупных частиц начинает увеличиваться. Большую сложность представляет создание и повторение одного и того же количества имитатора. Аэрозольные измерения носят статистический характер, поэтому требуется значительное количество измерений среды с постоянными параметрами, что в представленной камере крайне затруднительно. Это не позволяет независимо настроить извещатель на спектральный диапазон от 0,01 до 0,1 мкм, но позволяет проводить

исследования спектрального состава выделяемого аэрозоля различных материалов в зависимости от температуры нагрева и его изменение во времени. Что в перспективе может позволить создать базу данных спектров аэрозольных частиц по различным материалам.

Опираясь на полученный опыт в АО «НИИ ТМ» была создана контрольно-проверочная аппаратура (КПА). КПА позволяет создать среду с различным количественным содержанием как высокодисперсных, так и низкодисперсных частиц размером от 0,01 до 300 мкм, что в Аэрозольной камере невозможно.

Важным достоинством разработанной контрольно-проверочной аппаратуры является возможность независимо настроить извещатель на спектральный диапазон от 0,01 до 0,1 мкм, что подтверждено также проверкой извещателя в Аэрозольной камере. Внешний вид КПА представлен на рис. 2.



Рис. 2. Контрольно-проверочная аппаратура

Создание Контрольно-проверочной аппаратуры позволило АО «НИИ ТМ» перейти на качественно новый уровень разработки и исследований аэрозольной тематики.

В настоящее время на базе полученных знаний ведется разработка электроиндукционных пожарных извещателей и измерительных приборов нового поколения.

Список литературы

1. Полупроводниковые газовые датчики отечественного производства / А. Р. Бестугин, А. А. Большаков, И. В. Сердюк, П. И. Сердюк, В. П. Хвезенко // Датчики и системы. 2018. № 12. 4 с.
2. Сердюк И. В. Термокаталитический сенсорный модуль, Патент РФ № 167397 RU, АО НИИ ТМ, Источник: Федеральный институт промышленной собственности, отделение ВПТБ, 2017 г. 6 с.
3. Сердюк И. В., Михайлов А. Н., Большаков А. А. Полупроводниковый сенсорный модуль с легированным газочувствительным слоем, Патент РФ № 173 647 RU, АО НИИ ТМ, Источник: Федеральный институт промышленной собственности, отделение ВПТБ, 2017. 8 с.
4. Антонов В. В., Большаков А. А. Люминесцентный датчик кислорода // Аэрозоли Сибири : тез. докл. XXV конф. (раб. гр.). Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2018. 1 с.
5. Антонов В. В., Большаков А. А. Электроиндукционный метод раннего предупреждения пожароопасной ситуации в модулях российского сегмента международной космической станции // Молодежь и будущее авиации и космонавтики : 10-й Всерос. межотраслев. молодеж. конкурс науч.-техн. работ и проектов : аннотации конкурс. работ. М., 2018. 1 с.

УДК 550.4: 504.0549(571.50)

Основы мониторинга химического состава воды озера Байкал

В. А. Ветров (vetrov.igce@mail.ru)

Институт глобального климата и экологии им. акад. Ю. А. Израэля, г. Москва

Аннотация. Работа посвящена проектированию программ гидрохимического мониторинга Байкала, под которым понимается система регулярных наблюдений за содержанием химических веществ в водах озера и притоков, в атмосферных осадках и донных отложениях. Задача мониторинга – определение степени антропогенного влияния на естественные (фоновые, «доиндустриальные») концентрации химических веществ в различных частях водной массы озера в текущем времени и в обозримом будущем. В основу разработки программ положен анализ составляющих приходной и расходной статей баланса химических веществ в озере. С учетом прогнозируемых темпов изменения гидрохимического режима Байкала оцениваются основные пространственно-временные параметры программы гидрохимического мониторинга для выделенных частей водной массы озера. Подобные рекомендации делаются для программ мониторинга контролируемых веществ в притоках, в атмосферных осадках и донных отложениях.

Ключевые слова: озеро Байкал, вода, гидрохимический состав, мониторинг, балансовая модель, водная масса, притоки, атмосферные осадки, донные отложения, гидробионты.

Введение

Мониторинг химического состава воды озера Байкал (для краткости, **гидрохимический мониторинг**) мы определяем как систему регулярных наблюдений за содержанием химических веществ в водах озера.

Краткий анализ практики наблюдений за состоянием озера Байкал за последние годы [6–10; 12] не дает ясных представлений о научном обосновании программ мониторинга. В настоящем сообщении изложены концептуальные основы гидрохимического мониторинга Байкала, которые, по нашему мнению, должны применяться при разработке программ мониторинга содержания химических веществ в основных составляющих водной массы озера.

Основы методологии мониторинга

Общая методология мониторинга окружающей среды основана на его каноническом определении в виде трех основных взаимосвязанных направлений (этапов) деятельности – наблюдения, оценка, прогноз [5]. Нами было предложено более широкое концептуальное определение мониторинга состояния окружающей (природной) среды как системы наблюдений, оценки и прогноза состояния среды с целью научного и информационного обеспечения природоохранной деятельности (управления качеством среды) (рис. 1) [1]. Это определение не противоречит «каноническому», однако ставит мониторинг в строго подчиненное положение по отношению к практическим задачам контроля и управления состоянием природной среды во всей сфере взаимоотношений общества и природы. На практике это уточнение дает возможность использовать определенные критерии для установления приоритетов при выборе объектов, содержания наблюдений и планирования пространственно-временной матрицы наблюдений, т. е. оптимизировать систему в условиях заведомо ограниченных затрат на ее функционирование.

По нашему мнению, по отношению к уникальному природному объекту – озеру Байкал – природоохранная деятельность по охране байкальского природного комплекса (блок «Управление качеством среды» (рис. 1) должна иметь целью сохранение качества воды озера на природном («доиндустриальном») уровне. Отсюда следует одна из концептуальных основ гидрохимического мониторинга Байкала:

Общая цель гидрохимического мониторинга Байкала – получение необходимых и достаточных знаний для информационного обеспечения мероприятий по сохранению природных гидрохимических характеристик байкальских вод.

Следует пояснить содержание этапов в блоке «Мониторинг антропогенного загрязнения окружающей природной среды» (рис. 1) для деятельности по гидрохимическому мониторингу Байкала.

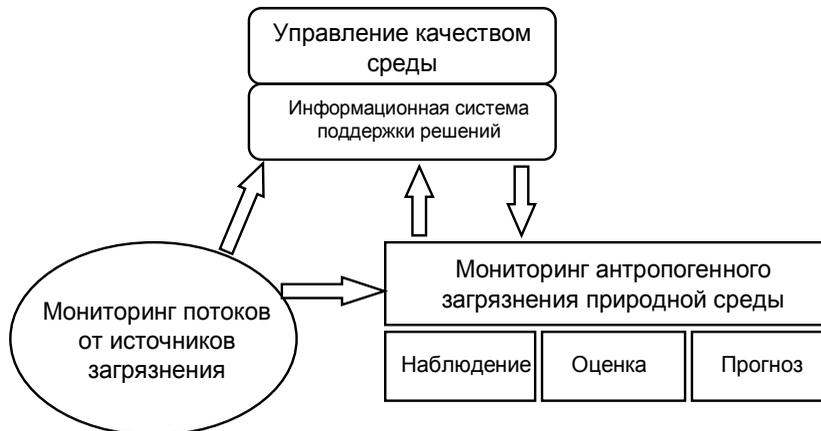


Рис. 1. Концептуальная схема мониторинга состояния окружающей среды для решения задач управления качеством среды

Наблюдение. Обоснование программы наблюдений гидрохимического мониторинга сводится к краткому анализу целей и задач мониторинга содержания химических веществ в водной массе озера на основе совокупности знаний в этой области. Общая цель гидрохимического мониторинга Байкала была сформулирована выше.

Ключевая задача гидрохимического мониторинга Байкала – определение степени антропогенного влияния на естественные (фоновые, «доиндустриальные») концентрации химических веществ в различных частях водной массы озера в текущем времени и в обозримом будущем.

Задача гидрохимического мониторинга озера определяет выбор (набор) контролируемых веществ (наблюдаемых показателей) и пространственно-временную матрицу мониторинга – объекты, пункты и периодичность наблюдений. Предлагаемые программы должны обеспечить достаточным объемом данных этапы оценки и прогноза гидрохимического состояния озера (т. е. состояния его экосистемы по гидрохимическим показателям) в соответствии с требованиями блока «Информационная система поддержки решений». Следует подчеркнуть, что наблюдения в аспекте мониторинга проводятся на иных методологических принципах, чем чисто научные исследования.

Оценка состояния среды. Следует заметить, что название этапа «Оценка» довольно условно, поскольку на этом этапе проводится **анализ** качества первичных данных наблюдений, пополнение **базы**

данных (БД) мониторинга, расчет так называемых **показателей** мониторинга (отчетных параметров, характеризующих результаты мониторинга) и, наконец, собственно **оценка состояния** контролируемой природной среды.

Под гидрохимическим состоянием Байкала мы понимаем содержание в водной массе озера химических веществ, соотнесенное к их естественным природным концентрациям, которые для краткости обычно называют природным («доиндустриальным») фоном. Необходимо иметь четкие количественные (по крайней мере, полуколичественные) критерии для оценки гидрохимического состояния озера и его изменения под действием антропогенных факторов. При этом мы *a priori* отказываемся от использования в качестве критериев таких чисто «антропогенных» показателей, как предельно- или ориентировочно-допустимые концентрации или уровни (ПДК, ОДК, ОДУ и т. п.), как прямо не относящихся к природным гидрохимическим показателям состояния водных экосистем.

В этап «В соответствии с целью и основной задачей гидрохимического мониторинга оценка гидрохимического состояния водной экосистемы (или её части) должна дать ответы на два основных вопроса:

- обнаружено ли достоверное изменение уровней природного («доиндустриального») гидрохимического фона за счет действия антропогенных или иных факторов?
- являются ли обнаруженные изменения (тренды) угрожающими с точки зрения сохранения природного гидрохимического фона водного объекта?

Ответ на последний вопрос может быть получен, в основном, с привлечением прогнозных расчетов, выполняемых на этапе «Прогноз» (см. рис. 1).

Прогноз. По существу, этот этап является ключевым для решения основной задачи мониторинга, поскольку прогнозные модели служат для организации как имеющихся данных, так и всей системы мониторинга. Выходные результаты этапа «Прогноз» могут иметь решающее значение для блока «Управление качеством среды» (рис. 1). «Прогноз» – наиболее «наукоемкий» этап мониторинга, поскольку для разработки даже относительно простых моделей требуются достаточно глубокие и разносторонние знания рассматриваемой природной среды, накопленные в ходе специальных научных исследований. Поэтому одной из задач этого этапа должен быть сбор и обобщение научных знаний, необходимых для разработки прогнозных моделей.

Таким образом, научное обоснование программ мониторинга должно опираться на уже известные знания об объекте мониторинга.

Системная взаимосвязь мониторинга и научного исследования – необходимое условие разработки оптимальных программ мониторинга при неизбежной ограниченности ресурсов.

Гидрохимический режим Байкала

Исходя из различий в пространственном и временном распределении химических веществ в водной массе Байкала, К. К. Вотинцев [2] разделял показатели (компоненты) природного химического состава воды Байкала на две группы.

К первой относились все показатели **общего гидрохимического состава: рН, минерализация, HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+** . К этой же группе мы относим микроэлементы в растворенных формах.

Ко второй группе, по К. К. Вотинцеву, относятся компоненты, тесно связанные в своей динамике с протекающими в водоеме биологическими процессами («**биогенные вещества**»): **нитратный азот, фосфатный фосфор, свободная углекислота, растворенный кислород и органическое вещество**. Наиболее отчетливые изменения этих показателей тесно связаны с сезонными циклами в развитии фитопланктона в трофогенном слое (до 100 м глубины), где происходит процесс фотосинтеза [14]. Как показывали наблюдения и наши расчеты, ввиду олиготрофности Байкала биологическая ассимиляция биофильных элементов, таких как **Na, K, Fe, Zn, Br**, даже в периоды наибольшего развития фитопланктона, не снижает в заметных пределах концентрации этих веществ в трофогенном слое [1].

На практике, при осуществлении современных программ гидрохимического мониторинга Байкала [6–10] классификация К. К. Вотинцева была расширена до третьей группы – **загрязняющие вещества антропогенной природы**. По нашему мнению, с учетом токсичности и значимости в региональном и глобальном масштабах приоритетными контролируруемыми веществами в Байкале должны быть **фенолы, углеводороды (нефтепродукты), пестициды, СПАВ, тяжелые металлы**. Следует отметить, что кроме специфических синтетических веществ, таких как пестициды и СПАВ, в группу загрязняющих веществ попадают и вещества природного происхождения, присутствующие в воде озера в фоновых концентрациях (например, **фенолы** или **токсичные металлы**).

С учетом особенностей водообмена и формирования гидрохимического режима Байкала в водной массе озера нами выделяются гидрохимические зоны и районы озера, в которых могут наблюдаться локальные особенности гидрохимического состава (рис. 2).

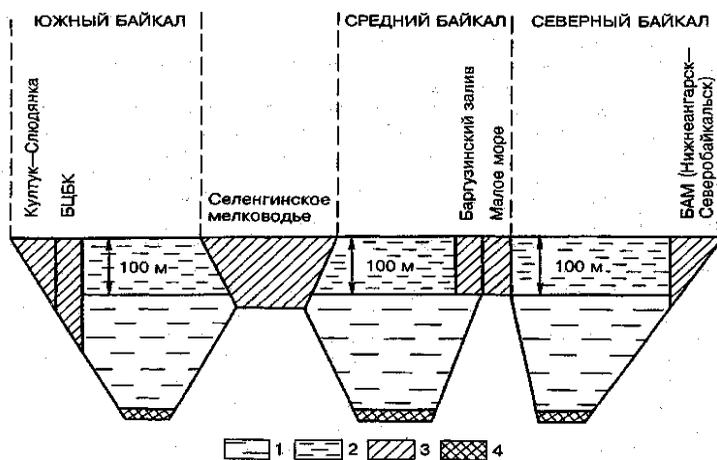


Рис. 2. Гидрохимические зоны и районы озера Байкал [1]:

1 – глубоководные зоны каждой котловины; 2 – трофогенный и динамически активный слой пелагиали каждой котловины; 3 – зоны возможного антропогенного влияния; 4 – придонный слой

1. *Глубоководные зоны трех частей (котловин) озера:* ниже 100 м и до придонного слоя. Здесь сосредоточена основная масса (около 80 %) озерной воды. Химический состав вод отличается большой однородностью (гомогенностью) и стабильностью [3; 4].

2. *Трофогенный и динамически активный слой пелагиали* каждой котловины: глубина – от поверхности до 100 м. Этот слой – аналог «океанского тандема», используемого при описании и моделировании гидрохимического режима океанских вод [11]. В этом слое производится основная продукция (до 90 %) органического вещества в озере, с которой связаны все суточные, сезонные и пространственные вариации гидрохимических показателей второй группы и некоторых показателей третьей группы (например, **фенола**).

3. *Зоны возможного антропогенного влияния* – районы озера, подверженные прямому действию потоков загрязняющих веществ. Наиболее значительные районы: южная оконечность озера (Култук-

Слюдянка), район Байкальского ЦБК, Селенгинское мелководье, Баргузинский залив, Малое море, район БАМ (Северобайкальск).

4. *Придонный слой*: толщина – от нескольких метров от дна до 0,1 глубины озера в месте наблюдения. Выделение этого слоя в особую зону гидрохимических наблюдений связано с возможностью накопления в нем веществ третьей группы, а также с задачами мониторинга донных отложений.

Базовый уровень – основная гидрохимическая характеристика озера

Одной из наиболее сложных задач мониторинга содержания элементов в природных водах является определение основного показателя мониторинга – так называемых *базовых уровней* на фоне природной пространственно-временной изменчивости концентраций. Термин *базовый уровень* был заимствован нами из обзорных работ по изучению элементного состава вод мирового океана, в которых он обозначал генеральное среднее содержание элемента в морской воде по достаточно большим выборкам данных, полученных независимыми коллективами исследователей. В геохимическом аспекте *базовый уровень* элемента должен соответствовать его кларку в океанской воде. Тот же смысл мы придаем термину *базовый уровень* в отношении как вод озера Байкал в целом, так и отдельных частей водной массы. Физический смысл базового уровня – это концентрация элемента, полученная путем усреднения имеющихся данных по объему наблюдаемой водной массы.

Общий подход к определению базовых уровней наблюдаемых веществ в водах Байкала должен быть основан на стохастической природе определяемых концентраций и, как следствие, на статистической интерпретации данных наблюдений. Для оценки изменений содержания микропримесей (менее 100 мкг/л) загрязняющих веществ в воде озера при гидрохимическом мониторинге Байкала нами был предложен подход, основанный на определении набора показателей статистического распределения наблюдаемых концентраций, а именно: среднее значение выборки \bar{C} (*базовый уровень*); стандартное отклонение S ; медианное значение \bar{X}_{50} ; квантили (в %) различной степени обеспеченности – X_5 , X_{25} , X_{75} , X_{90} , X_{95} . При этом степень близости вида распределения к нормальному, логнормальному либо к какому-то другому закону не имеет особого практического значения [1].

Таким образом, оценка гидрохимического состояния водной массы озера может быть основана на сравнении показателей статистиче-

ского распределения наблюдаемых концентраций элементов в воде озера с соответствующими фоновыми («доиндустриальными») показателями, прежде всего с базовыми уровнями.

Баланс (устойчивость) гидрохимического режима озера

В свое время нами был предложен фундаментальный подход к определению возможных изменений базовых уровней гидрохимического состава воды Байкала, основанный на оценке степени нарушения годового баланса приходных и расходных потоков элементов в водной массе озера. Для осуществления этого подхода была разработана простая «резервуарная» балансовая модель изменения массы m (тонн, т) контролируемого вещества в озере со временем (рис. 3) [1]:

$$\frac{dm}{dt} = (P_a + P_T + P_r + P_u) - (P_A + P_s) = \mathbf{P}(t) \quad (1)$$

где составляющими приходной и расходной частей баланса (потоками, т/год) являются: P_a – поступление вещества на зеркало озера с атмосферными осадками; P_T – антропогенный (техногенный) сток от источников непосредственно в озеро; P_r , P_u – поступление с речным и подземным стоком; P_A – вынос вещества с водами Ангары; P_s – выведение вещества из водной массы со взвешенным материалом в донные отложения; $\mathbf{P}(t)$ – так. наз. «невязка баланса» – разность между его приходной и расходной частями.

В таблице 1 для примера приведены основные составляющие баланса сульфатов (ион SO_4^{2-}) и хлоридов (Cl) в водной массе озера, рассчитанные нами по данным гидрохимических наблюдений в 1970–1980 гг. Из этих данных видно, что воды притоков вносят 90–94 % годового стока этих веществ в озеро. С учетом того, что точность используемых нами значений компонентов баланса оценивалась нами в пределах $\pm 20\%$, вкладом подземного стока P_u в приходную часть гидрохимического баланса можно было пренебречь. В расходной части баланса в табл. 1 представлен только сток обоих ионов с водами Ангары, поскольку нет данных об их трансформации во взвешенные вещества с последующей седиментацией в донные осадки. Следует отметить большие положительные «невязки» баланса для обоих ионов.

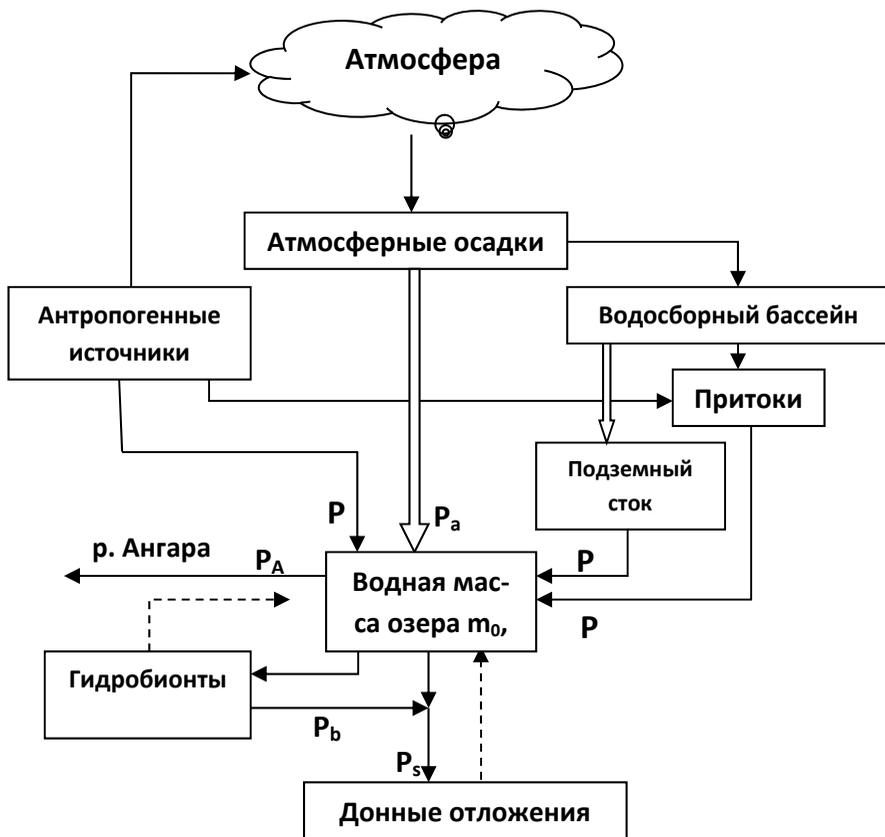


Рис. 3. Схема основных путей миграции химических элементов в водосборном бассейне оз. Байкал [1]

Таблица 1

Основные составляющие баланса SO_4^{2-} и Cl в водной массе Байкала (1970–1980 гг.) [1]

Вещество	Водная масса m_0 , т	Приход, т/год			Расход, т/год	
		Воды притоков P_r	Атмосферные осадки P_a	БЦБК сточные воды P_r	Всего	Ангара P_A
SO_4^{2-}	$120 \cdot 10^6$	$670 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^3$	$28,5 \cdot 10^3$	$710 \cdot 10^3$	$330 \cdot 10^3$
Cl	$9,6 \cdot 10^6$	$87 \cdot 10^3$	$0,9 \cdot 10^3$	$9,5 \cdot 10^3$	$97 \cdot 10^3$	$26 \cdot 10^3$

Решение балансового уравнения (1) имеет вид:

$$\frac{m}{m_0} = \frac{P(t)}{\lambda_A \cdot m_0} - \left(\frac{P(t)}{\lambda_A \cdot m_0} - 1 \right) e^{-\lambda_A \cdot t} \quad (2)$$

где m_0 – масса вещества в озере в начальный момент времени $t = 0$; $\lambda_A = Q_A/V$ – постоянная водообмена ($Q_A = 60,4 \text{ км}^3/\text{год}$ – водный сток из озера, $V = 21,7 \cdot 10^3 \text{ км}^3$ – объем водной массы озера; $\lambda_A = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$).

С учетом большого периода водообмена в озере (около 360 лет) при горизонте прогноза менее нескольких десятков лет ($t < 50$ лет) решение уравнения (2) можно с хорошей степенью приближения представить в виде линейной зависимости $m(t)$, или $\bar{C}(t)$ (относительно средней концентрации вещества $\bar{C} = m/V$):

$$\frac{\bar{C}}{\bar{C}_0} = 1 + \left(\frac{P(t)}{m_0} - \lambda_A \right) \cdot t \quad (3)$$

В монографии [1] нами были сделаны расчеты роста средних концентраций сульфатов (SO_4^{2-}) и хлоридов (Cl^-) в Байкале по модели (3), в которой параметры $P(t)$ для этих веществ оценивались по наиболее представительным данным наблюдений на начало 1990-х гг. [15].

Согласно результатам расчетов, при сохранении постоянного значения «невязки» $P(t) = \text{const.}$ (см. табл. 1) линейный рост концентраций SO_4^{2-} и Cl^- должен был происходить со скоростью, порядка 1 % и 9 % за 20 лет, соответственно. Понятно, что это были консервативные оценки; реальные темпы роста концентраций SO_4^{2-} и Cl^- , по видимому, должны были быть в несколько раз ниже расчетных, т. е. не выше 1–3 % за 20 лет.

Из приведенных расчетов следует фундаментальный для гидрохимического мониторинга Байкала вывод о принципиальной невозможности инструментального обнаружения роста средних концентраций рассматриваемых веществ в воде озера даже при периодичности прямых наблюдений «одна съемка за 10 лет» [1]. Иллюстрацией к этому выводу служит табл. 2, в которой приведены различные оценки содержания SO_4^{2-} и Cl^- в воде озера Байкал в 1982–2013 гг., т. е. за 37-летний период после отправной точки нашего прогноза (1980 г.). Как видно из этих данных, оценки средних концентраций сульфатов в Байкале различаются в пределах 5,2–6,0 мг/л и не обнаруживают определенного тренда во времени. В то же время оценки средних кон-

центраций хлоридов, полученные разными группами исследователей, расходятся более чем в 2 раза!

Таблица 2

Средние концентрации ионов SO_4^{2-} и Cl^- (мг/л) в воде Байкала по данным разных исследователей в 1982–2017 гг.

	1982 [13]	1987 [3]	1991 [15]	2001 [4]	2010 [6]	2011 [7]	2012 [8]	2013 [9]	2017 [10]
SO_4^{2-} , мг/л	5,6	5,2	5,5	5,5	5,7	6,0	5,3	5,5	5,7
Cl^- , мг/л	0,8	0,6	0,44	0,40	0,95	0,85	0,9	0,95	0,7

Примечание: приведенные данные Ежегодников ГХИ 2010–2017 гг. для Южного Байкала.

Этот вывод, впрочем, следует проверить для специфических техногенных загрязнителей, отсутствующих в природном гидрохимическом фоне Байкала (пестициды, СПАВ и т. п.).

В таблице 3 приведены оценки годовых потоков сульфатов и хлоридов в оз. Байкал с водами Селенги и с атмосферными осадками по данным наблюдений в 1983–2013 гг. (Ветров, Кузнецова, 1997; Ежегодники ГХИ 2010–2013). Данные табл. 5 иллюстрируют большой разброс оценок (до двух раз и более), что создает трудности при их использовании для прогнозных расчетов по балансовой модели (1).

Таблица 3

Поступление сульфатов и хлоридов в оз. Байкал с водами Селенги и с атмосферными осадками в 1983–2013 гг.

	1983 [1]	2010 [6]	2011 [7]	2012 [8]	2013 [9]
Поток с водами р. Селенги, тыс. т/год					
SO_4^{2-}	493	225	218	295	386
Cl^-	64	49	40	47	60
Поток с атмосферными осадками на Ю. Байкал, тыс. т/год ^{*)}					
SO_4^{2-}	< 9	15	14	20	12

^{*)} в 2010–2013 гг. среднее по данным, приведенным в Ежегодниках ГХИ 2010–2013.

Таким образом, для решения основной задачи гидрохимического мониторинга Байкала необходимо разработать программы наблюдений для 6 объектов мониторинга, дающих основной вклад в формировании гидрохимического режима озера – **вода озера, притоки, атмосферные осадки, антропогенные источники, сток с водами Ангары, донные осадки.**

Программы гидрохимического мониторинга Байкала

Вода озера. На основе анализа ожидаемых темпов изменения гидрохимического режима вод Байкала нами сделаны оценки основных параметров программы мониторинга воды оз. Байкал по гидрохимическим показателям (табл. 4).

Таблица 4

Рекомендуемая периодичность мониторинговых наблюдений за гидрохимическими показателями в различных зонах водной массы Байкала, годы

Зона водной массы	Компоненты основного состава, микроэлементы	Биогенные вещества	Загрязняющие вещества
<i>Пелагиаль</i>			
Трофогенный слой	10–12	7–10 ^{*)}	5–7
Глубоководные зоны трех котловин	10–12	7–10	5–7
Придонные слои	10–12	10–12	5–7
<i>Районы антропогенного влияния, придельтовые районы основных притоков</i>			
Трофогенный слой	7–10	5–7 ^{*)}	3–5

^{*)} Отбор проб в период наиболее полной депрессии в развитии фитопланктона, т. е. от декабря до начала февраля [14].

Притоки. Общий вывод из анализа расчетов по балансовой модели (1) состоит в том, что основной задачей мониторинга загрязнения воды озера должно стать как можно более надежное определение приходных и расходных составляющих баланса, в первую очередь, поступления с водами притоков и выведения в донные отложения.

При организации мониторинга химического стока притоков следует учесть, что около 80 % водного и более 90 % химического стока в озеро приходится на долю девяти притоков, каждый из которых имеет среднегодовой водный сток более 1 % от суммарного: Селенга (50 %), Верхняя Ангара (13,6 %), Баргузин (6,6 %), Снежная (2,6 %), Турка (2,5 %), Тья (1,9 %), Томпуда (1,5 %), Кика (1,4 %), Хара-Мурин (1,4 %). При этом основная доля антропогенного химического стока будет приходиться на долю Селенги, Верхней Ангары и Баргузина. Рост антропогенной составляющей химического стока в современный период можно оценить не выше 1–2 % в год, в среднем не более 20 % за десятилетие. Исходя из этой оценки, для определения трендов поступления контролируемых веществ в озеро в табл. 5 приведены наши оценки периодичности мониторинговых наблюдений за химическим стоком четырех групп притоков – от 3–5 (Селенга, Верхняя Ангара, Баргузин) до 7–10 лет (Тья, Томпуда, Кика, Хара-Мурин). Под «мониторинговыми наблюдениями» понимается 10–15 отборов проб в устье реки в год, более или менее равномерно по основным гидрологическим фазам.

Таблица 5

Рекомендуемая периодичность мониторинга химического стока основных притоков Байкала

Группа притоков (% водного стока)	Среднегодовой водный сток, %	Периодичность мониторинга хим. стока, лет
Селенга (50 %), Верхняя Ангара (13,6 %), Баргузин (6,6 %)	~ 70	3–5
Снежная (2,6 %), Турка (2,5 %), Тьяя (1,9 %)	~ 7	5–7
Томпуда (1,5 %), Кика (1,4 %), Хара-Мурин (1,4 %)	~ 4	7–10
Остальные (< 1 % каждый)	< 20	10–12

В такой схеме ежегодными наблюдениями будут охвачены устьевые участки в среднем 3–4 рек, что вполне доступно для современного уровня затрат на мониторинг. Отметим, что подобный формат мониторинга на одном притоке имеет гораздо большую ценность, чем отрывочный и бессистемный пробоотбор одновременно на нескольких притоках.

Атмосферные осадки. Для учета всех путей поступления химических веществ с атмосферными осадками в природные среды региона предлагаются следующие этапы 4-летнего цикла наблюдений, каждый этап – продолжительностью в 1 год: 1) осадки на водную поверхность в теплое время года; 2) снежные осадки на ледовый покров; 3) осадки на береговые районы; 4) осадки в фоновых районах на водосборном бассейне. Программы мониторинга каждой из этих составляющих атмосферных осадков (сеть пунктов наблюдений, методология, наблюдаемые показатели и т. п.) требует отдельного рассмотрения и должна проектироваться с учетом вклада этой составляющей в приходную часть гидрохимического баланса Байкала.

Антропогенные источники. Имеются ввиду как непосредственные стоки с берега озера – промышленные (БЦБК и т. п.), коммунальные и т. п., так и загрязнения от водного и других видов транспорта (железные и шоссейные дороги, автомобили на ледовом покрове). Программы мониторинга источников каждого вида (методология, наблюдаемые показатели и т. п.) требует отдельного рассмотрения и должна проектироваться с учетом вклада этого источника в приходную часть гидрохимического баланса Байкала.

Сток с водами Ангары. Представляется, что гидрохимические характеристики воды в истоке Ангары должны совпадать с таковыми для трофогенного слоя пелагиали Ю. Байкала (рис. 3), поэтому программа наблюдений в пункте «Исток Ангары» должна совпадать с программой для этой зоны водной массы Байкала (табл. 4).

Донные осадки. Определение химического состава верхнего слоя (~10 мм) натурального осадка в придельтовых районах основных притоков озера может осуществляться синхронно с соответствующей гидрохимической съемкой в этих районах, либо с мониторингом химического стока, т. е. один раз в 3–10 лет. Перспективной методологией мониторинга пелагических донных отложений является отбор потока взвешенного материала с помощью набора седиментационных ловушек. Рекомендуется годовой отбор в 2–3 точках пелагиали каждой котловины озера, с периодичностью 3-летнего цикла отбора (по году в каждой котловине) в 5–7 лет.

Заключение

1. Ключевая задача гидрохимического мониторинга Байкала – **определение степени антропогенного влияния на естественные (фоновые, «доиндустриальные») концентрации химических веществ в различных частях водной массы озера в текущем времени и в обозримом будущем.**

2. Системная взаимосвязь мониторинга и научного исследования – необходимое условие разработки оптимальных программ мониторинга при неизбежной ограниченности ресурсов.

3. Современные программы гидрохимического мониторинга Байкала включают три группы показателей (компонентов) химического состава воды озера – **общие показатели гидрохимического состава, биогенные и загрязняющие вещества.**

4. С учетом особенностей водообмена и формирования гидрохимического режима Байкала в водной массе озера выделяются гидрохимические зоны и районы озера, в которых могут наблюдаться локальные особенности гидрохимического состава

5. В основу разработки программ гидрохимического мониторинга Байкала положен анализ составляющих приходной и расходной статей баланса химических веществ в озере.

6. Критерием оценки гидрохимического состояния водной массы озера служит сравнение показателей распределения наблюдаемых концентраций элементов в воде озера с соответствующими фоновыми («доиндустриальными») показателями, прежде всего с базовыми уровнями. Другой фундаментальный критерий – степень нарушения баланса приходных и расходных потоков элементов в водной массе.

7. Для решения основной задачи гидрохимического мониторинга Байкала необходимо разработать программы наблюдений для 6 объектов мониторинга, дающих основной вклад в формировании гидрохи-

мического режима озера – **вода озера, притоки, атмосферные осадки, антропогенные источники, сток с водами Ангары, донные осадки.**

8. На основе оценок ожидаемых изменений уровней химических веществ **в воде Байкала** рекомендуется периодичность мониторинговых наблюдений за гидрохимическими показателями в различных зонах водной массы Байкала: от 3–5 лет (загрязняющие вещества в придельтовых районах основных притоков) до 10–12 лет (компоненты основного состава, микроэлементы в пелагической водной массе).

9. Рекомендуемая периодичность мониторинговых наблюдений за химическим стоком 9-ти основных **притоков Байкала**: от 3–5 лет (Селенга, Верхняя Ангара, Баргузин) до 7–10 лет (Томпуда, Кика, Хара-Мурин).

10. Для учета всех путей поступления химических веществ с атмосферными осадками в природные среды региона предлагается проведение 4-летних циклов наблюдений, по этапам продолжительностью в 1 год: 1) осадки на водную поверхность в теплое время года; 2) снежные осадки на ледовый покров; 3) осадки на береговые районы; 4) осадки в фоновых районах на водосборном бассейне озера.

11. Программы мониторинга **атмосферных осадков, антропогенных источников, стока с водами Ангары, донных осадков** требуют отдельного рассмотрения и должна проектироваться с учетом вклада этих объектов мониторинга в гидрохимический баланс Байкала.

Внедрение предлагаемых концептуальных положений и основанных на них программ, по нашему мнению, дает возможность эффективно решать задачи и оптимизировать (сократить) расходы на гидрохимический мониторинг Байкала.

Список литературы

1. *Ветров В. А., Кузнецова А. И.* Микроэлементы в природных средах региона озера Байкал. Новосибирск : Изд. СО РАН, 1997, 236 с.
2. *Вотинцев К. К.* Гидрохимия // Проблемы Байкала / под ред. Г. И. Галазия, К. К. Вотинцева. Новосибирск : Наука, 1978. С. 124–145.
3. *Галазий Г. И.* Байкал в вопросах и ответах. Иркутск : Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1987. 167 с.
4. *Грачев М. А.* О современном состоянии экологической системы озера Байкал. Иркутск : ЛИН СО РАН, 2001. 106 с.
5. *Израэль Ю. А.* Экология и контроль состояния природной среды. 2-е изд. М. : Гидрометеоиздат, 1984. 375 с.
6. Качество поверхностных вод Российской Федерации по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2010 // Гидрохимический институт, Ростов н/Д, 2011.
7. Качество поверхностных вод Российской Федерации по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2011 // Гидрохимический институт, Ростов н/Д, 2012.
8. Качество поверхностных вод Российской Федерации по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2012 // Гидрохимический институт, Ростов н/Д, 2013.

9. Качество поверхностных вод Российской Федерации по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2013 // Гидрохимический институт, Ростов н/Д, 2014.
10. Качество поверхностных вод Российской Федерации Ежегодник 2017 // ФГБУ «Гидрохимический институт». Ростов н/Д, 2018, 554 с.
11. *Киплинг Ч.* Цикл двуокиси углерода. Резервуарные модели для описания обмена атмосферной двуокиси углерода с океанами и растительностью суши // *Химия нижней атмосферы*. М. : Мир, 1976. С. 311–401.
12. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2017 г. М. : Росгидромет, 2018. 206 с.
13. Обзор фонового состояния окружающей природной среды в СССР за 1982 г. // Госкомгидромет, АН СССР, ЛАМ. М. : Гидрометеониздат, 1983. 169 с.
14. *Тарасова Е. Н.* Органическое вещество вод Южного Байкала. Новосибирск : Наука, 1976. 147 с.
15. The major and minor element geochemistry of Lake Baikal / K. K. Falkner, C. I. Measures, S. E. Herbelin, J. M. Edmord // *Limnology and oceanography* 1991. Vol. 36, N 3. P. 413–423.

УДК 551.583:83(571.53)

Оценка засухи, наблюдавшейся в Иркутской области в 2015 г.

Я. М. Иваньо (iyumex@rambler.ru)

Иркутский ГАУ, пос. Молодежный, Иркутский район

Аннотация. Проведен анализ температур и осадков за многолетний период. По результатам анализа урожайности зерновых культур оценены вероятности засухи 2015 г. и параметров тепла и увлажнения.

Ключевые слова: засуха, температура воздуха, осадки, урожайность, Иркутская область.

Введение

На территории Иркутской области наблюдаются различные экстремальные гидрометеорологические явления, приносящие значительные ущербы экономике региона и, прежде всего, сельскому хозяйству. По данным за 2008–2018 гг. наибольшие потери аграрное производство понесло в результате формирования засух. Согласно сведениям министерства сельского хозяйства Иркутской области в 2008 г. значение ущерба от этого экстремального явления составило 120, в 2015 г. 308,31, а в 2018 г. 13,62 млн руб. Потери последнего года являются предварительными.

Из приведенных материалов следует, что наибольшие ущербы сельскому хозяйству региона нанесены засухой 2015 г. В решении комиссии «О мерах по преодолению последствий летней засухи 2015 г.» указано, что от неблагоприятно засушливой погоды пострадали посевы зерновых культур и многолетних трав, картофеля и овощей на площади 98,4 тыс. га, что составляет 15 % от посева яровых культур.

При этом засуха наблюдалась в 13 муниципальных районах Иркутской области и охватила 194 сельскохозяйственные предприятия. Производство зерна в 2015 г. составило немногим более 60 % относительно значения предшествующего года.

В работах [6–8] приведены разные показатели оценки засушливых явлений (геотермический коэффициент, стандартизированный индекс осадков, стандартизированный индекс осадков и испаряемости) и их сравнение. Для территории Европейской части России южнее 55° с. ш. выявлены тесные корреляционные связи между рядами перечисленных показателей [6]. Для сравнительного анализа значений геотермического коэффициента и стандартизированных индексов осадков и осадков и испаряемости авторы [6] предложили собственную методику.

С одной стороны, приведенные показатели засушливых явлений оценивают соотношение параметров тепла и увлажнения, в результате которых наблюдается экстремальное событие. С другой стороны, при оценке ущерба, нанесенного сельскохозяйственному товаропроизводителю, учитывается критерий низкой урожайности сельскохозяйственной культуры [1]. При этом среднее значение биопродуктивности рассчитывается за пять последних лет.

При определении природных рисков, связанных с потерей урожая в результате неблагоприятных внешних условий, необходимо оценивать вероятности проявления экстремального события. В работе [5] перечислены разные критерии оценки засух, одним из которых является снижение урожайности сельскохозяйственных культур относительно ее средней величины более чем на 10 %.

Приведем анализ изменчивости многолетних рядов зерновых культур, наиболее распространенных в Иркутской области (пшеница, ячмень и овес) по данным муниципальных районов, для оценки вероятности проявления засухи 2015 г. При этом определим метеорологические факторы, влияющие в наибольшей степени на биопродуктивность зерновых культур. Эти результаты имеют значение для прогнозирования и управления производством сельскохозяйственной продукции в условиях рисков.

Материалы и методы исследования

В работе использованы данные об урожайности пшеницы, ячменя и овса 24 муниципальных районов региона за 1996–2016 гг. Кроме того, привлечены сведения о суточных осадках и температурах воздуха за теплый сезон 1971–2016 гг.

При анализе урожайности зерновых культур и параметров тепла и увлажнения использованы методы построения законов распределения вероятностей и корреляционно-регрессионного анализа.

Основные результаты и обсуждение

Статистическая обработка данных показывает, что последовательности урожайности зерновых культур имеют различные свойства. Часть из них представляет собой случайные выборки и ряды со значимым невысоким первым коэффициентом автокорреляции. Некоторые последовательности можно описать с помощью трендов [4].

Для оценки урожайности зерновых культур применимо гамма-распределение:

$$p(x, b, c) = \left(\frac{x}{b}\right)^{c-1} e^{-\frac{x}{b}} \frac{1}{b\Gamma(c)}, \quad (1)$$

где $c = (\bar{x}/\sigma)^2$, $b = \sigma^2 / \bar{x}$, $\Gamma(c)$ – гамма-функция, определяемая с

помощью интеграла $\int_0^{\infty} t^{c-1} e^{-t} dt$; x – случайная величина или уро-

жайность зерновой культуры; \bar{x} – среднее значение ряда; σ – среднее квадратическое отклонение, t – переменная, исключаемая подстановкой пределов интегрирования.

В качестве критического значения урожайности принято выражение

$$y \leq 0,8\bar{y}, \quad (2)$$

где \bar{y} – средняя биопродуктивность многолетнего ряда. Другими словами, урожайность зерновых, не превышающая приведенное выражение, соответствует засушливому явлению.

Следует отметить, что основной зерновой культурой, возделываемой в Иркутской области, является пшеница. Площадь этой культуры соответствует 57 % общей территории посевов зерновых культур. По этой причине при определении муниципального района, понесшего потери от засушливого явления 2015 г., в качестве приоритетной зерновой культуры рассматривалась пшеница.

В результате на первом этапе выделено 8 районов, особо сильно подверженных влиянию засухи (табл. 1). Согласно приведенным вероятностям P_n , полученным по гамма-распределению, их значения

изменяются от 0,052 до 0,205. При этом повторяемость засухи оказалась наибольшей на юге – в Иркутском и Эхирит-Булагатском районах. В Аларском и Боханском районах подобное экстремальное явление наблюдается примерно один раз в пять лет.

Корреляционный анализ рядов урожайности пшеницы, ячменя и овса показывает, что между ними не наблюдается тесных связей, каждая культура имеет свои отличительные особенности. Между тем доля производства ячменя и овса в производстве зерна довольно ощутима, составляя соответственно 20,70,166* и 22 %. Поэтому помимо оценки вероятностей низкого значения урожайности пшеницы определены аналогичные параметры для биопродуктивности ячменя P_y и овса P_o . Из данных табл. 1 следует, что вероятности P_y и P_o отличаются от P_n большим рассеянием. Для урожайности ячменя значения вероятности засухи 2015 г. колеблется от 0,0026 до 0,351, а для овса – в пределах 0,0114–0,533. Как и в случае с биопродуктивностью пшеницы наибольшая частота проявления экстремального явления имеет место в Иркутском районе (табл. 1).

Таблица 1

Расчетные вероятности засухи 2015 г. по данным об урожайности основных зерновых культур у муниципальных районов Иркутской области за 1996–2016 гг.

Районы	Пшеница, у, ц/га	P_n	Ячмень, у, ц/га	P_y	Овес, у, ц/га	P_o	P
Балаганский	7,1	0,166	5,3	0,152	8,7	0,533	0,244
Иркутский	11,1	0,052	6,7	0,0026	8,8	0,0114	0,0330
Киренский	7	0,108	-	-	12,1	0,573	0,211
Черемховский	16	0,188	14,7	0,136	13,3	0,112	0,161
Аларский	14,2	0,203	11,2	0,138	10,1	0,0752	0,161
Боханский	12,5	0,205	12,4	0,271	11,8	0,330	0,247
Нукутский	11,1	0,148	12,8	0,309	9,7	0,190	0,190
Эхирит- Булагатский	9	0,083	10,7	0,351	11,7	0,0777	0,137

В последней колонке табл. 1 приведена вероятность низкой урожайности зерновых с учетом взвешенных коэффициентов, соответствующих долям площадей рассматриваемых культур относительно общей площади посева зерновых: Показатель P получен по формуле

$$P = k_1 P_n + k_2 P_y + k_3 P_o, \quad (3)$$

где k_1 , k_2 , k_3 – взвешенные коэффициенты, соответствующие 0,573, 0,207 и 0,220. Для Киренского района первый $k_1 = 0,78$, а $k_3 = 0,22$.

Таким образом, получены вероятности по восьми районам, характеризующие проявления засушливого явления 2015 г. Наиболее

неблагоприятными для сельского хозяйства региона были условия на юге и в районах Усть-Ордынского бурятского округа, что подтверждают результаты оценки рисков и расчетными значениями страховых возмещений.

Поскольку засуха связана с метеорологическими факторами, то резонно задать вопрос от каких параметров тепла и увлажнения зависит урожайность зерновых культур?

Исследования связей биопродуктивности зерновых культур показывают, что они зависят от осадков и температуры за период вегетации [3].

В дополнение к этому некоторые авторы обращают внимание на сильное влияние метеорологических факторов на урожайность зерновых культур в начальной стадии вегетации [2]. Для выявления подобных связей применен корреляционно-регрессионный анализ. Сформирована матрица результативного признака и факторов в виде температур воздуха и осадков по месяцам, начиная с апреля и завершая августом. Согласно корреляционному анализу наибольшая степень связи имеет место между урожайностью зерновых культур и температурами воздуха и осадками за май. В меньшей степени на урожайность влияют значения параметра тепла и увлажнения в июне. В некоторых случаях наблюдается связь биопродуктивности с наибольшими суточными осадками за май и температурой этого месяца. Перечисленные связи превышают 0,50 коэффициента детерминации, а коэффициенты при неизвестных являются значимыми согласно *t*-статистикам Стьюдента.

Приведенные результаты получены по данным полевых наблюдений на опытном поле Иркутского государственного аграрного университета, а также согласно результатам моделирования урожайности зерновых культур муниципальных районов: Иркутский, Черемховский и Усольский. Следует отметить, что значимые связи сильнее проявляются для урожайности пшеницы.

Наличие значимых связей между биопродуктивностью и выявленными факторами тепла и увлажнения позволяет моделировать различные значения результативного признака в зависимости от сочетания температуры воздуха и осадков, а также с определенной точностью прогнозировать урожайность зерновых.

По результатам статистического анализа температур и осадков за вегетационный сезон по многолетним данным Иркутска за 1980–2016 гг. вероятности параметров тепла и увлажнения для 2015 г. составили 0,025 и 0,174. В засушливый год наблюдалась наибольшая температура за теплый сезон за указанный период, а осадки были зна-

чительно ниже нормы. К этому добавим, что параметр тепла можно описать с помощью нормального закона распределения, а параметр увлажнения – гамма-распределением. При этом при оценке температуры воздуха учтено влияние на вариацию первого коэффициента автокорреляции, который для многолетнего ряда Иркутска соответствует 0,45.

Исследование влияния температур и осадков на урожайность зерновых культур имеет значение для планирования производства продукции в условиях природных рисков. Работа в этом направлении позволяет моделировать биопродуктивность и программировать урожай.

Продолжение исследований заключается в нахождении регрессионных выражений для других территорий региона. Кроме того, при определении наилучших связей результативного признака и факторов можно использовать алгоритм моделирования с оценкой оптимального интервала усреднения суточных температур воздуха и осадков в начальной стадии вегетации.

Выводы

В работе приведен статистический анализ изменчивости урожайности пшеницы, ячменя и овса. На основе биопродуктивности зерновых культур, полученных в засушливый 2015 г., определены вероятности проявления засухи в восьми муниципальных районах, сельское хозяйство которых в наибольшей степени подвергнуто влиянию экстремального события.

На основе полевых данных наблюдений и сведений по трем муниципальным районам выявлены значимые связи между урожайностью зерновых и температурами и садками в начальный период вегетации. Наиболее качественной является факторная модель биопродуктивности пшеницы.

Список литературы

1. Об утверждении методики определения страховой стоимости и размера утраты (гибели) урожая сельскохозяйственной культуры и посадок многолетних насаждений и методики определения страховой стоимости и размера утраты (гибели) сельскохозяйственных животных : приказ Минсельхоза России от 16 нояб. 2017 г. № 578 (Зарегистрировано в Минюсте России 05.12.2017 № 49117).
2. Актуальные приемы адаптивной агротехнологии в условиях усиления засух в Иркутской области / Н. Н. Дмитриев [и др.]. Иркутск : Изд-во Иркут. ГАУ, 2017. 180 с.
3. Асалханов П. Г., Иванов Я. М., Полковская М. Н. Модели прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в задачах параметрического программирования // Вестн. ИргТУ, 2017. Т. 21, № 2 (121). С. 57–66.

4. *Иванько Я. М., Петрова С. А., Полковская М. Н.* Вероятностная оценка повторяемости засух и определение рисков аграрного производства // Вестн. ИргТУ. 2018. Т. 22, № 4 (135). С. 73–82.

5. *Страшная А. И., Максименкова Т. А., Чуб О. В.* Агрометеорологические особенности засухи 2010 г. в России по сравнению с засухами прошлых лет // Тр. Гос. учреждения «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации». М. С. 1–18.

6. *Черенкова Е. А., Золотокрылин А. Н.* О сравнимости некоторых количественных показателей засухи // Фундамент. и приклад. климатология. 2016. Т. 2. С. 79–94.

7. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring / S. Begueria, S. M. Vicente-Serrano, F. Reig, B. Latorre // Int. J. Climatol. 2014. 34. P. 3001–3023.

8. *Guttman N. B.* Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index. // Journal of the American Water Resources Association. 1998. 34(1). P. 113–121.

УДК 551.501.7

Современные методы и средства радиозондирования

Н. Н. Крестьяникова (ntcr.krestyanikova@mail.ru)

Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, г. Долгопрудный

Аннотация. Аэрологическая сеть Росгидромета является составной частью глобальной службы погоды, имеет самую большую территорию в мире. Несмотря на значительный прогресс в развитии дистанционных методов зондирования атмосферы, радиозондирование во всем мире по-прежнему остается одним из основных источников информации о состоянии атмосферы до высоты 30 км. В работе приведены сведения о состоянии методов и средств радиозондирования, приоритетных работах, перспективах развития аэрологической сети Росгидромета.

Ключевые слова: аэрологическая сеть, станции радиозондирования, радиозонды, датчики, качество данных.

1. Состояние аэрологической сети

В последние годы существенно повысились чувствительность общества и народного хозяйства к изменениям в погоде и запросы потребителей к составу, точности и оперативности аэрологической информации, что обуславливает необходимость дальнейшего развития, повышения точности измерений и достоверности получаемых результатов, предоставления аэрологической информации с высоким разрешением [2].

Качество и своевременность получения данных о состоянии тропосферы и нижней стратосферы (температуры, влажности, скорости и направлении ветра), является обязательным условием получения надежной информации о состоянии окружающей среды, точности

прогнозов погоды, уменьшения риска населению и экономике страны от опасных гидрометеорологических явлений.

Система аэрологического зондирования атмосферы является приоритетным источником информации для службы прогнозов и метеорологического обеспечения отраслей экономики, вооруженных сил, населения страны. Производство инструментальных наблюдений – наиболее дорогостоящая компонента функционирования существующей прогностической системы. Определение крупномасштабных особенностей атмосферной циркуляции исключительно сильно зависит от наличия данных зондирования атмосферы в Северном полушарии, включая вертикальные профили влажности воздуха. В Северном полушарии предсказуемость численных прогнозов погоды на 3–5 дней ухудшается в среднем более чем на 24 часа при отсутствии аэрологических данных.

На региональном уровне уменьшение числа данных зондирования над регионами с плотной сетью приводит к заметному ухудшению точности прогнозов. Напротив, добавление данных зондирования в районах с редкой сетью ведет к значительному повышению качества региональных прогнозов.

Для прогнозов, в первую очередь на средние (до 10 суток) и долгие (1–3 месяца) сроки, особое значение имеет точность измерений влажностных характеристик атмосферы, которые определяют в заметной степени неадиабатические притоки энергии за счет фазовых переходов влаги, радиации и взаимодействия с подстилающей поверхностью. Отсюда же следует потребность в привязке спутниковых данных вертикального влажностного зондирования атмосферы к высокоточным данным измерений влажности с помощью радиозондов.

Несмотря на значительный прогресс в развитии дистанционных методов зондирования атмосферы, радиозондирование во всем мире по-прежнему остается одним из основных источников информации о состоянии атмосферы от поверхности Земли до предельных высот подъема оболочки, несущей радиозонд (30–40 км), для анализа и прогноза погоды, обслуживания различных отраслей народного хозяйства, а также изучения атмосферных процессов и валидации дистанционных измерений.

Система аэрологических наблюдений строится и развивается в соответствии с потребностями различных отраслей народного хозяйства и науки, а также в соответствии с рекомендациями ВМО, как часть единой глобальной системы наблюдений [3]. В целом, объем и структура данных отечественной аэрологической сети удовлетворяет

потребности климатологии, среднесрочного и долгосрочного прогнозов. В то же время имеется неудовлетворенность таких направлений, как краткосрочный и сверхкраткосрочный прогноз, аэросиноптическое обеспечение задач по переносу загрязняющих примесей, функционирования АЭС, различные атмосферные исследования, в первую очередь – по причине недостаточного пространственно-временного разрешения.

В соответствии с Наставлением по Глобальной системе наблюдений, публикация ВМО № 544, в текущем столетии расстояние между соседними аэрологическими станциями в общем случае должно находиться в пределах от 250 до 1000 км (в малонаселенных областях и на акваториях океанов). Ранее, кроме наземных аэрологических станций (АЭ) на территории РФ и других республик бывшего Советского Союза, радиозондирование в СССР проводилось на 19 научно-исследовательских судах, 6 российских станциях в Антарктиде и 1–2 пунктов радиозондирования в составе дрейфующих станций «Северный Полюс».

В 2018 г. на аэрологической сети Росгидромета работали 114 аэрологических станций (14 станций на консервации). Согласно «Методике расчета минимально необходимого количества пунктов аэрологических наблюдений», утвержденной в 2008 г., и, с учетом включения АЭ Белогорск в аэрологическую сеть РФ, минимально-необходимое количество станций составляет 132, тогда как в соответствии с рекомендациями ВМО, исходя из характерных пространственно-временных масштабов атмосферных процессов, оптимальное количество аэрологических станций на территории РФ составляет около 150, что является целью на долгосрочную перспективу. Еще две АЭ Глобальной опорной климатической сети РФ работают в Антарктиде, а также одна АЭ в Арктике на дрейфующей станции «Северный Полюс» (временно – на АЭ м. Баранова).

Таким образом, плотность аэрологической наблюдательной сети недостаточна, особенно на севере и северо-востоке Сибири, на островах Северного Ледовитого океана, вдоль административной границы Чукотки, Якутии и Хабаровского края.

Пространственное разрешение данных по высоте существенно улучшилось в последние 2 года за счет перехода на код BUFR. Для обеспечения передачи данных радиозондирования в коде BUFR специалистами ЦАО разработано соответствующее программное обеспечение для кодирования (ПО UABUFR), декодирования (ПО CBUFR) результатов температурно-ветрового радиозондирования в

коде BUFR, а также ПО для обучения и документация. В 2017 г. ПО размещено на сайте ФГБУ «ЦАО» и АЭ Росгидромета оперативно передают сообщения в коде BUFR с результатами температурно-ветрового зондирования в ОАСПД ФГБУ «Авиаметтелеком» Росгидромета.

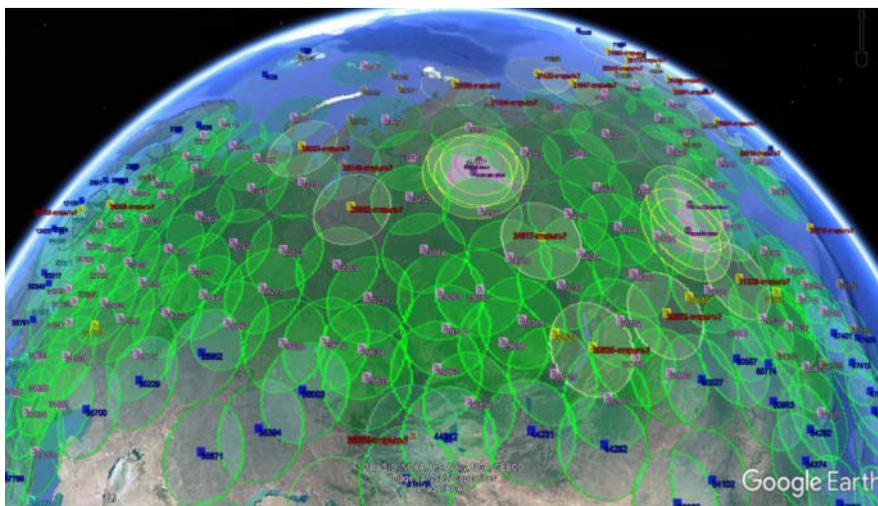


Рис. Плотность аэрологической сети. Распределение АЭ по территории РФ

2. Техническое оснащение сети радиозондирования

Техническая база сети радиозондирования включает в себя следующие основные компоненты:

- наземное радиолокационное и радионавигационное оборудование,
- радиозонды, оболочки, химреактивы,
- оборудование для газодобывания,
- система сервиса и технической поддержки,
- система контроля качества.

2.1. Наземное радиолокационное и радионавигационное оборудование

Сведения об основных технических средствах отечественной системы радиозондирования, разработке радиолокационных и радионавигационных комплексов приведены в работе [1]. В настоящее время аэрологическая сеть Росгидромета оснащена 3 типами радиолокаци-

онных комплексов радиозондирования – АВК-1 и аэрологическими радиолокационными вычислительными комплексами (АРВК) «МАРЛ-А», «Вектор-М», а также аэрологическим радионавигационным комплексом (АРНК) – «ПОЛЮС».

Радиолокационные комплексы АВК-1.

Комплексы АВК-1 устарели, выработали свой ресурс, не обеспечены запасными частями и требуют срочной замены. Модернизация наблюдательной сети в рамках проекта Всемирного банка позволила улучшить ситуацию, была проведена замена большей части АВК, находившихся в наиболее худшем состоянии. В настоящее время на сети Росгидромета на 33 АЭ на территории РФ и на 2 АЭ в Антарктиде комплексы АВК все еще остаются единственным средством зондирования. Еще 27 не выведенных из эксплуатации АВК используются или могут использоваться как резервные в случае отказов или выхода из строя АРВК «МАРЛ-А» (7 комплексов АВК) или «Вектор-М» (20 комплексов АВК), являющихся основным АРВК. В зависимости от интенсивности отказов новых АРВК или наличия сильных морозов (для «Вектор-М», эксплуатируемых в Якутии) реально в качестве резервных используется до 25 АВК (19 на АЭ, где в качестве основного используется «Вектор-М», и 6 на АЭ, где в качестве основного используется «МАРЛ-А»).

В соответствии с решением решения ГКРЧ от 28 декабря 2017 г. № 17-44-07-3 продлено разрешение на использование полосы радиочастот 1774–1790 МГц для установленных на аэрологической сети АВК-1 до 01.02.2023. Таким образом с 01.02.2023 г. эксплуатация АВК станет невозможной.

АРВК «МАРЛ-А» и «Вектор-М».

По состоянию на начало 2019 г. на наблюдательной аэрологической сети Росгидромета используются 82 АРВК «МАРЛ-А» и «Вектор-М». «МАРЛ-А» на аэрологической сети насчитывается 52 комплекса (36 были поставлены в рамках Проекта-1, 16 были закуплены в период до 2009 г. за средства Росгидромета, причем 11 из них – «МАРЛ-А» первой модификации), в эксплуатации находится 51 «МАРЛ-А».

Среди небольшого количества отказов «МАРЛ-А» наибольшая доля приходится на неисправности ПЭВМ, отказы блока питания, износ токосъемников при эксплуатации в морском климате, отказы ППУ антенны и неисправности микро-ЭВМ антенного поста, неисправность имитатора, платы сопряжения блока обработки. При наличии соответствующего ЗИПа замена неисправных узлов производится до-

статочно оперативно. Профилактическое обслуживание и диагностика «МАРЛ-А» нетрудоемки, требуют минимального владения измерительными приборами и частично могут быть проведены удаленно. Они могут также выполняться специалистами УГМС.

АРВК «Вектор-М» на аэрологической сети насчитывается 30 комплексов (28 были поставлены в рамках Проекта-1, 2 опытных образца были закуплены в период до 2009 г. за средства Росгидромета. Опыт эксплуатации АРВК на сети показал недостаточную надежность «Вектор-М». В силу конструктивных особенностей и примененных комплектующих «Вектор-М» страдает большим количеством отказов. По ряду позиций имеющийся ЗИП уже израсходован, а поставка его с завода-производителя занимает очень долгое время.

С апреля 2017 г. до ноября 2018 г. по проекту Росгидромет-2 было поставлено 17 АРВК «Вектор-М». За это время Поставщик (ЗАО «ИНСИСТЕМС») предпринял 2 неудачные попытки провести приемосдаточные испытания и передать АРВК «Вектор-М» Росгидромету. Во всех случаях ЦАО была вынуждена выдать отрицательные заключения о качестве работы «Вектор-М». Основными претензиями к новым АРВК «Вектор-М» были:

- срывы (потери) сопровождения радиозонда по угловым координатам в момент выпуска,
- срывы (потери) сопровождения дальности,
- пропуски в телеметрической информации от 10 до 20 %,
- низкое качество сопровождение по угловым координатам, не соответствующее требованиям технического задания на поставку АРВК,
- ошибки в программном обеспечении, для кодирования результатов радиозондирования,
- низкая эксплуатационная надежность (многочисленные отказы и неисправности «Вектор-М»).

Были проведены ряд работ по устранению выявленных замечаний и недостатков. По предварительным итогам приемосдаточных испытаний «Вектор-М», которые начаты в октябре 2018 г., основным замечанием к качеству работы – остается низкое качество сопровождения радиозонда по угломестной (вертикальной) координате при углах меньше 15° и удалениях больше 150 км. Срок эксплуатации АРВК по документации составляет 8–10 лет. Таким образом, часть установленных на сети АРВК уже требует замены или капитального ремонта

Требует также существенных изменений скорость коммутации каналов некоторых типов радиозондов, временного разрешения обра-

ботки и архивации данных. Гидрометеорологические службы передовых стран уже более 15 лет архивируют данные радиозондирования с разрешением от 2 до 10 секунд (с вертикальным разрешением менее 50 м). Однако новые российские системы радиозондирования не могут выполнять эту задачу из-за медленной системы коммутации каналов (а также высокой инерционности датчиков радиозондов).

Для обработки результатов радиозондирования используется предоставляемое коммерческими организациями закрытое проприетарное программное обеспечение, что затрудняет контроль адекватности используемых алгоритмов и, тем более, возможности их модификации в части обеспечения обработки в реальном масштабе времени, увеличения вертикального разрешения, расширения номенклатуры измеряемых параметров и изменения форматов выходных данных.

АРНК на основе системы спутниковой навигации «ПОЛЮС».

Современной альтернативой АРВК является использование аэрологических радионавигационных комплексов (АРНК), в которых координаты и скорости перемещения радиозонда определяются по данным сигналов глобальных навигационных спутниковых систем.

АРНК имеет ряд преимуществ при сопоставимой, а при больших удалениях радиозонда – и лучшей точности определения высоты и ветра:

- относительно низкая стоимость наземной станции;
- нет движущихся узлов и механизмов, фактически, не требует обслуживания;
- требования к месту установки как минимум, в два-три раза менее жесткие;
- простота установки;
- не требуется РПУ;
- не требуется ориентирование и горизонтирование, настройки и проверки;
- необязательно наличие прямой видимости места выпуска радиозонда;
- на удаление места выпуска радиозонда не накладывается ограничений;
- нет ухудшения точности с удалением радиозонда;
- исключаются отказы радиозондов по дальности.

В 2017 г. Росгидромет произвел закупку 6 комплексов АРНК «ПОЛЮС» вместе с радиозондами МРЗ-Н1 (производитель АО «Радий»). В настоящее время на аэрологической сети Росгидромета в оперативной работе задействовано 7 комплексов АРНК. По данным мониторинга ЦАО показатели качества данных наблюдений на АЭ,

оснащенных АРНК, в целом существенно превосходят средние показатели по сети.

2.2. Радиозонды, оболочки, химреактивы

В Российской Федерации имеются четыре независимых производителя совместимых с АВК, МАРЛ-А и Вектор-М радиозондов. Наличие альтернативных производителей совместимых с АРВК радиозондов обеспечивает конкурентную среду на рынке закупок, в результате средняя закупочная цена радиозонда составляет около 2.5 тыс. руб. Однако свободный доступ производителей на рынок закупок радиозондов, предусмотренный Законом № 44-ФЗ, имеет и негативные стороны. Аккредитованные Росстандартом организации, проводящие испытания на тип средства измерения, (прохождение которых является на сегодняшний день достаточным основанием для участия в федеральных закупках), не принимают во внимание влияние на показания датчиков радиозондов факторов окружающей среды и адекватного размещения датчиков в потоке набегающего воздуха, а также возможность вторичной обработки. Ответственные производители предоставляют свои радиозонды для натурных испытаний в ЦАО до начала поставок на сеть, причем в ряде случаев по результатам этих испытаний производилась существенная доработка конструкции радиозондов с проведением повторных испытаний для контроля устранения выявленных недостатков. Необходим механизм контроля и подтверждения заявленных характеристик путем проведения натурных сравнительных испытаний, обязательный для принятия решения о закупке радиозондов.

Российскими производителями разработаны радиозонды для АРВК с цифровой передачей телеметрической информации, что должно повысить надежность измерений температуры и влажности. Однако эти радиозонды требуют использования различного ПО и будут создавать логистические проблемы при снабжении АЭ радиозондами. Учитывая этот опыт, при закупке новых АРНК необходимо уделить особое внимание как возможности использования радиозондов различных производителей, так и механизмов контроля за их совместимостью с АРНК.

Проведенная модернизация с заменой АВК на МАРЛ-А и Вектор-М позволила поддержать приемлемое состояние наземной аэрологической сети Росгидромета и повысить регулярность получения данных наблюдений. С другой стороны, качественного улучшения получаемых данных не произошло по причине использования радиозондов с устаревшими датчиками измерения температуры и влажности, каче-

ства поставляемых радиозондов. Результаты международных сравнений радиозондов в Китае в 2010 г. [2] показали, что отечественные радиозонды существенно уступают по техническому уровню (инерционность, точность, влияние окружающей среды и т. п.) лучшим зарубежным радиозондам.

В настоящее время на сети используются радиозондовые оболочки китайского производства 500 г, и отечественные химреактивы – ферросилиций марки ФС75, едкий натрий (чешуированный) и алюминиевый порошок, которые используются при получении водорода в баллонных газогенераторах АВГ-45 силиколовым методом. Качество оболочек, ферросилиция и остальных материалов, закупаемых в последние годы для радиозондирования, в целом удовлетворяет сегодняшним требованиям и организации Росгидромета не испытывали трудностей при их закупке и использовании. При этом стратегически важным фактором является своевременная закупка и доставка всех расходных материалов, так как получение данных радиозондирования в первую очередь определяется наличием этих расходных материалов на аэрологических станциях.

В то же время необходимо отметить, что оболочки китайского производства имеют значительный разброс по качеству и, соответственно, достижению заданных высот при радиозондировании атмосферы, в особенности – в полярных районах, регионах со сложными погодными условиями при выпуске радиозонда, низкими температурами на уровне тропопаузы и нижней стратосферы. Их применение не обеспечивает 95 %-ного достижения уровня 10 гПа не менее, чем один (ночной) или два раза в сутки, которое рекомендовано ВМО [3]. В особенности, это сказывается на данных зондирования АЭ сети ГУАН ГСНК, на которых рекомендовано 95 %-ное достижение уровня 5 гПа в сроки 00 и 12 ВСВ.

2.3. Газодобывание

Процесс получения водорода на аэрологических станциях с помощью газогенераторов АВГ-45 является наиболее отсталой и опасной частью технологии радиозондирования, загрязняющей окружающую среду. В северных районах это усугубляется ненадежностью своевременной доставки химикатов. АВГ-45 являются основным средством газодобывания на аэрологической сети, на трех АЭ используется компримированные водород и гелий. Имеется положительный опыт эксплуатации современных щелочных электролизеров и отечественных твердополимерных электролизеров. Однако внедрение ав-

томатических электролизеров сдерживается отсталой инфраструктурой аэрологической сети, без модернизации которой оно невозможно. При капитальном ремонте или строительстве новых газогенераторных помещений необходимо учитывать перспективу внедрения электролизеров. Там, где электроэнергия подается с перебоями, отсутствует водоснабжение, используется печное отопление и где нет технически грамотных и квалифицированных кадров при отсутствии проблем с утилизацией отходов химической реакции получения водорода, химический способ пока остается безальтернативным.

2.4. Сервисное обслуживание аэрологической сети

С появлением новых АРВК на сети специалистам сети и ЦАО пришлось обеспечивать не только работу комплексов АВК, но и осваивать ремонт новой техники. При этом, если в свое время для ремонта АВК был закуплен централизованный групповой ЗИП, находившийся в ЦАО, то для новых АРВК приходилось сначала согласовывать с УГМС покупку ЗИП и потом проводить ремонты. Во время гарантийного срока, после поставки АРВК по проекту модернизации, обслуживание оказывали поставщики оборудования и производители. После окончания гарантийного срока специалисты аэрологической сети вынуждены обращаться за помощью в ЦАО. Целесообразно рассмотреть создание сервисного центра на базе ЦАО с соответствующим целевым бюджетным финансированием.

2.5. Система контроля качества

В последние годы ситуация с обеспечением достоверности и однородности данных радиозондирования на аэрологической сети начала ухудшаться. Производители радиозондов в одностороннем порядке изменяют конструкции радиозондов, типы и способы размещения применяемых в радиозонде датчиков. В результате были отмечены случаи поставки на сеть радиозондов, применение которых привело к неприемлемым (в соответствии с установленными ВМО критериями контроля качества данных) погрешностям наблюдений. Причину брака установить не удастся, так как в ЦАО такие радиозонды не поступают. Закупки радиозондов проводятся территориальными учреждениями Росгидромета, и радиозонды поступают непосредственно на их склад, а затем – на аэрологическую станцию. Отклонения от конструкции в поставленных радиозондах, закреплённой в документации, обнаруживается уже при проведении проверки перед выпуском на аэрологическую станцию.

В силу ряда особенностей радиозондирования одним из главных способов контроля является мониторинг качества аэрологических наблюдений. Мониторинг основан на сравнении результатов зондирования с полем первого приближения, получаемым с помощью современной численной модели прогноза погоды и выступающим в роли образцового средства контроля. Статистические характеристики отклонений результатов наблюдений от прогнозируемых значений (среднее значение и среднеквадратичное отклонение) используются для выявления станций, на которых данные радиозондирования регулярно имеют значительные систематические и/или случайные расхождения с полем первого приближения. Эти отклонения свидетельствуют о неисправности (недостаточной точности) технических средств, нарушении методики измерений, ошибках персонала и т. п. Тем не менее, мониторинг не может предотвратить некачественные измерения, как это имеет место, например, при проведении поверки СИ перед проведением измерений. Кроме того, его результаты зачастую не исключают использование в метеорологической практике уже полученных результатов некачественных измерений.

3. Развитие методов и средств радиозондирования

3.1. Сохранение и модернизация инфраструктуры и технической базы аэрологических станций

Поскольку комплексы АРВК останутся основным техническим средством на сети аэрологического зондирования в ближайшие 10 лет, необходимо решить задачу поддержания их работоспособности за счет организации и проведения необходимых ремонтно-восстановительных работ, модернизации комплексов гарантированного продления (восстановления) их ресурса. По имеющимся оценкам (в расчете на станцию) стоимость восстановления АРВК и продления его ресурса как минимум на порядок ниже цены нового комплекса. Устаревшие комплексы АВК-1 должны быть в первоочередном порядке заменены на новые наземные станции МАРЛ-А.

Необходима разработка, тестирование и внедрение в АРВК нового унифицированного ПО обработки данных радиозондирования, позволяющее расширить объем информации, ее точность и большую детализацию с исходным кодом, доступным для специалистов Росгидромета. ПО должно пройти тестирование на современных АРВК в различных климатических регионах Российской Федерации.

Необходимо срочное внедрение на сеть электролизных установок для получения водорода. Даже при высокой начальной стоимости на приобретение и монтаж, себестоимость получаемого водорода будет намного ниже себестоимости водорода, добываемого химическим способом, и со временем окупится. Внедрение электролизеров позволит повысить культуру труда на аэрологических станциях и уменьшить загрязнение окружающей среды.

Комплекс автоматического выпуска радиозондов позволяет производить выпуски без участия оператора на аэрологических станциях, автоматически обрабатывать и передавать по каналам связи результаты проведения радиозондирования. В настоящее время такие комплексы выпускают ведущие мировые производители в области радиозондирования VAISALA (Финляндия), MODEM (Франция). Недостатки выпускаемого за рубежом оборудования в том, что они не рассчитаны на работу в северных широтах и в полярных условиях, используют только систему спутниковой навигации GPS и таким образом не могут использоваться на территории Российской Федерации. Необходимо освоение производства аналогичного комплекса отечественными производителями.

3.2. Повышение качества данных

Повышение качества данных обеспечивается в первую очередь путем создания и применения радиозондов с улучшенными характеристиками чувствительных элементов. Необходимо на государственном уровне решить вопрос об особом порядке допуска технических средств радиозондирования к эксплуатации на государственной наблюдательной сети в условиях действующего законодательства по госзакупкам, предусматривающее предварительное обязательное одобрение головной организацией (ЦАО) Росгидрометом, в том числе об обязательности участия Росгидромета в государственных испытаниях на утверждение типа СИ, рекомендуемых к применению в сфере гидрометеорологического обеспечения, с проведением, при необходимости, натурных испытаний, в частности, взаимных сравнений с образцовыми радиозондами на станциях ГРУАН.

В случае положительного решения указанного выше вопроса нужно будет рассматривать вопрос об ограничении количества типов поставляемых радиозондов, с тем чтобы обеспечить сопоставимость наблюдений на всей сети, и в то же время об обеспечении необходимой конкуренции, чтобы предотвратить повышение закупочных цен и снижение качества при наличии единственного поставщика. В зару-

бежной практике эта проблема решается тем, что контракты заключаются на сравнительно длительный срок от 3 до 5 лет по результатам сравнительных натуральных испытаний, проводимых НГМС.

Традиционно большие усилия направлялись на создание новых типов датчиков для радиозондов. Решить эту задачу в полном объеме не удалось, в основном из-за отсутствия выпуска отечественной промышленностью необходимых измерительных элементов требуемого уровня точности и качества. В настоящее время изготовителями радиозондов проводятся работы по модернизации серийных радиозондов с целью повышения точности и качества измерений.

Необходимо возобновление производства радиозондов повышенной точности с использованием современных высокоточных датчиков. Их применение позволит существенно повысить качество радиозондовых данных аэрологической сети, повысить точность прогнозов погоды и эффективность использования гидрометеорологической информации. Применение радиозондов повышенного качества целесообразно проводить в первую очередь на станциях ГУАН и ГРУАН. Кроме того, необходимо разработать методику комбинированного зондирования, по которой комплексы радиозондирования на АЭ будут модернизированы для применения радиозондов повышенного качества с одновременным применением оперативных радиозондов. Применение радиозондов повышенной точности по сравнению с выпуском обычного радиозонда позволит уменьшить погрешность по температуре на $1,5\text{--}2^\circ$ и по относительной влажности – на $25\text{--}35\%$, уменьшить число нерезультативных выпусков радиозондов. Кроме того, периодические выпуски радиозондов повышенного качества позволят в текущем режиме проверять качество оперативных радиозондов с целью быстрого определения наличия некачественной продукции.

Переход на использование радиозондов повышенного качества с целью получения более точных и достоверных данных, получения данных с высоким вертикальным разрешением также должен предусматриваться при проведении специальных исследований и работ, требующих получения данных повышенной точности, необходимых для метеорологического обеспечения специальных мероприятий (например, метеобеспечение крупных спортивных соревнований, специальных полетов авиации, различных международных мероприятий и т. п.).

Важным фактором повышения качества работы сети является организация станции ГРУАН (сети опорных станций радиозондирования ВМО) на базе АЭ Долгопрудный. На основании обращения Росгидро-

мета в Секретариат ГСНК ВМО ведущий центр ГРУАН (Метеорологическая обсерватория Линденберг) включил ЦАО в число станций-кандидатов в сеть ГРУАН. В настоящее время в мире имеется 5 станций, сертифицированных как станции ГСНК ГРУАН и 11 станций-кандидатов. Включение станций в сеть ГРУАН производится по результатам процедуры сертификации, предусмотренной Наставлением (ГСНК № 170) и Руководством (ГСНК № 171) по ГРУАН. Организация российской станции ГРУАН позволит обеспечить весомый вклад Российской Федерации в исследования климата свободной атмосферы. В результате проведения работ будут обеспечены сбор и представление в Госфонд климатических рядов высокоточных данных, получаемых с российских и зарубежных станций ГРУАН.

После сертификации станции ГРУАН в ЦАО работы по созданию станций ГРУАН могут быть продолжены с целью сертификации дополнительных аэрологических станций РФ в качестве сети станций ГРУАН.

Поскольку, как было отмечено выше, оболочки китайского производства имеют значительный разброс по качеству и, соответственно, достижению заданных высот при радиозондировании атмосферы, и их применение не обеспечивает 95 %-ного достижения уровня 10 гПа не менее, чем один (ночной) или два раза в сутки, которое рекомендовано ВМО, в ЦАО проводятся испытания оболочек более высокого качества. В частности, по результатам зимних эксплуатационных испытаний оболочки производства TOTEX (Япония) показали преимущества использования в зимних условиях по сравнению с китайскими оболочками, поскольку они имеют специальный состав латекса, предназначенный для использования в условиях низких температур (ниже минус 75 °С в районе тропопаузы). Особенно это важно для использования на 12 арктических станциях, расположенных вблизи и выше северного полярного круга.

3.3. Улучшение сервисного обслуживания, управления и снабжения сети

Улучшение и расширение сервисного обслуживания возможно при условии появления дополнительных финансовых источников, росте предложений пользователям со стороны осуществляющих сервис организаций, совершенствовании организационно-правовых форм организаций, осуществляющих эту функцию, стимулировании пользователей на привлечение для осуществления сервиса собственных источников финансирования.

На сети, даже после проведения 2-го проекта модернизации, останется еще несколько АЭ, оснащенных комплексами АВК-1. Для поддержания работоспособности этих комплексов необходимо не полностью утилизировать заменяемые АВК-1, а демонтировать наиболее требуемые при ремонтах АВК запасные части и оставлять их на хранение с целью последующей установки на пока еще эксплуатируемых комплексах. Необходимо создание склада ЗИП из оборудования демонтируемых станций в ЦАО и УГМС, обеспечение закупки группового ЗИП в расчете на все установленные на сети АРВК, восстановление в ЦАО сервисного центра по ремонту комплексов радиозондирования атмосферы.

Для повышения качества сервисного обслуживания необходимо обеспечить повышение квалификации аэрологов и специалистов по радиолокации (проведение курсов), создание системы дистанционного обучения специалистов сети.

Для эффективного управления и снабжения сети необходима организация централизованных закупок, с системой контроля переходящего запаса расходных материалов, расходования по назначению средств, выделяемых на производство радиозондирования. В рамках выполнения задачи по достижению необходимого объема радиозондовых данных до высот, рекомендованных ВМО, при планировании закупок расходных материалов необходимо предусмотреть закупки специальных оболочек для применения на сети выделенных станций, с целью 95 %-ного достижения уровня 10 гПа не менее, чем один (ночной) или два раза в сутки. Также необходимо предусмотреть закупки специальных оболочек для применения на АЭ сети ГУАН ГСНК в сроки 00 и 12 ВСВ с целью 95 %-ного достижения уровня 5 гПа. Результатом должно стать достижение главной цели государственной закупки – наилучшее удовлетворение потребностей заказчика в пределах выделенных общественных средств.

В рамках выполнения Стратегии деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 г. (с учетом аспектов изменения климата), запланировано доведение обеспеченности территории РФ до минимально необходимого количества пунктов аэрологических наблюдений.

Состав и качество существующей аэрологической информации большую часть потребителей удовлетворяет, особенно ввиду перспективы перехода на новые формы и методы сбора аэрологических данных. Пространственное разрешение данных по высоте постепенно будет улучшаться за счет перехода на код BUFR. Однако со стороны ря-

да потребителей имеется потребность на расширение объема информации, повышение ее точности и большую детализацию.

Основными потребителями аэрологической информации являются ФГБУ «Гидрометцентр» и ФГБУ «Авиаметтелеком». Для авиационных прогнозов синоптикам надо получать больший объем данных, чем получают сейчас в результате 2-разового зондирования. Европейские страны проводят радиозондирование 4 раза в сутки. Четырехразовое зондирование было и во времена СССР. Целесообразно рассмотреть возможности увеличения числа выпусков радиозондов чаще, чем 2 раза в сутки на части аэрологической сети, в частности, на станциях, входящих в состав ГУАН и ГРУАН.

В настоящее время чрезвычайно актуально рассмотреть вопрос увеличения количества зондирования в районах активного воздушного движения, например, в европейской части нашей страны, до 4-х раз в сутки, а также расконсервировать АЭ Псков.

В целом реализация отмеченных выше основных направлений развития методов и средств радиозондирования сети аэрологического зондирования атмосферы на наблюдательной сети Российской Федерации позволит существенно улучшить качество функционирования сети за счет:

- технического и технологического развития наблюдательной сети, увеличения ее плотности;
- обеспечения более полного освещения территории РФ, в том числе в арктических регионах, аэрологическими наблюдениями, за счет доведения обеспеченности территории минимально необходимым количеством пунктов аэрологических наблюдений до 100 %;
- улучшения вертикального разрешения, точности и надежности результатов аэрологических наблюдений до уровня ведущих мировых стран;
- повышения квалификации и улучшение условий работы персонала станций радиозондирования.

Улучшение качества работы аэрологической сети внесет существенный вклад в достижение основных цели Стратегии деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 г. (с учетом аспектов изменения климата) – формированию высокоэффективной гидрометеорологической службы, обеспечивающей выполнение функций по предоставлению потребителям своевременной и достоверной гидрометеорологической и гелиогеофизической информации, информации о состоянии окружающей среды, ее загряз-

нении, а также по эффективному и безопасному проведению работ, связанных с активным воздействием на метеорологические и другие геофизические процессы, на базе современной техники и технологий.

Список литературы

1. Современное состояние и перспективы развития систем радиозондирования атмосферы в России / В. Э. Иванов [и др.] // Успехи современ. радиоэлектроники. 2015. № 9. С. 3–49.
2. Nash J. Measurement of upper-air pressure, temperature and humidity. Instrument and Observing Methods, report No 121. WMO, 2015. 89 p.
3. World Meteorological Organization. 2008. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. N 8. 569 p.

УДК 523.98

Проявление солнечно-земных связей в гидрометеорологии

Г. Я. Смольков (smolkov@iszf.irk.ru)

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Аннотация. Состояние и изменчивость окружающей природной среды Земли, включая гидрометеорологию, обусловлены солнечно-земными связями. Природными факторами внешних воздействий на Землю являются солнечная активность, потоки галактических космических лучей и эндогенная активность Земли, обуславливаемая гравитационным воздействием на Землю со стороны Луны, Солнца и других небесных тел Солнечной системы в процессе её барицентрического движения в гравитационном поле и межзвёздной среде Галактики, а также последствиями внешних воздействий на Солнечную систему. Учет всех глобальных факторов внешних воздействий на Землю способствует системному и междисциплинарному анализу проявлений солнечно-земных связей. Это позволяет объяснить механизмы, энергетику, цикличность, синхронность, полярную асимметрию, изменение формы Земли, скачкообразность и др. виды проявлений солнечно-земных связей. Необъяснимые синхронные отклики оболочек Земли и наблюдаемых слоев атмосферы Солнца, ранее вынужденно относимые к «аномалиям», стали понятными. Они свидетельствуют о внешнем воздействии на Солнечную систему в целом.

Ключевые слова: солнечно-земные связи (СЗС), солнечная активность (СА), эндогенная активность Земли (ЭА), центр массы Земли (ЦМЗ), галактические космические лучи (ГКЛ), нестабильность суточного вращения Земли (НСВЗ), межзвездная среда (МЗС).

Состояние и изменчивость окружающей природной среды обитания и деятельности человечества обусловлены солнечно-земными связями. СЗС связи по своей сути гораздо шире понятий о космической погоде, охватывая гидрометеорологию, климат и др. монодисциплины. Их проявления обуславливаются и связаны с процессами и событиями, происходящими во всех внутренних и внешних оболочках

Земли: твёрдом и жидком ядрах, пластичной и твёрдой мантиях, литосфере, атмосфере, магнитосфере, ближнем околоземном космосе. Изучение связей процессов и событий, происходящих во всех перечисленных оболочках нашей планеты, признано одним из трех главных направлений в современных науках о Земле.

Исследования СЗС организуются как национальными, так и международными научными организациями. Для коллективного рассмотрения состояния знаний, определения важнейших проблем, координации усилий для их решения регулярно проводятся национальные и международные мероприятия. Таким образом, изучение СЗС выполняется координированно по национальным и международным научным программам и проектам. Несмотря на это, единого (общепризнанного) мнения обо всех исходных (природных) факторах, их роли и вкладах в изменения геофизических и геодинамических процессов и явлений до сих пор не было. Имеется разобщённость изучения природы СЗС специалистами различных профессий, неполный учёт, смешение и даже искажение исходных причин изучаемых вариаций параметров природной среды, попытки их объяснения понятиями лишь своей монодисциплины.

Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии вызывают тревогу, поскольку состояние изучения и понимания по мнению известных специалистов находятся «в поисковом периоде» или «в кризисе». Следовательно, подходы к изучению солнечно-земных связей не совершенны, имеет место фрагментарный или поверхностный характер.

Одним из постоянных свойств окружающей природной среды является её непостоянство. Её изменчивость происходит на различных масштабах времени. Методология изучения проявлений СЗС сведена в основном к выяснению связей и взаимосвязей откликов оболочек Земли на воздействия извне, до сих пор в основном лишь на солнечную активность и ГКЛ, путём анализа корреляционных связей (не всегда с проверкой их подлинности) трендов интересующих индексов и моделированию связей между ними в поисках их сути и механизмов, их объясняющих. Чтобы понять современное состояние связей, необходимо учитывать их эволюцию в прежние времена. Это не обеспечено надёжными данными инструментальных регистраций на требуемых временных масштабах (регистрация температуры началась с изобретения термометра в 1850 г.) и вынуждает использовать прокси данные, что неизбежно приводит к неопределённостям результатов изучения СЗС.

Уместная литература по влиянию изменчивой СА, например, на климат, обширна, однако многое было основано на неадекватных статистиках и не здоровых процедурах. Отбор наземных откликов может часто возникать (непреднамеренно или иным образом) от использования интервалов ограниченных данных и/или выбора сравниваемых параметров. Это является основной причиной возникновения специфических проблем при изучении воздействия СА на климат. Ошибки и их причины детально проанализированы. Дополнительно к этому – следует осознать и обосновать наличие физического смысла и роли среднегодовой температуры $T_{\text{ср/год}}$. Энергетика вариаций СА, поступающая на Землю, ниже энергии наземных ответных откликов. Поэтому для объяснения обнаруженных корреляций предлагаются нелинейные механизмы усиления, обратные и взаимные связи, моделирование с использованием различных взаимосвязей наземных процессов, их параметров. Имеют место явная недостаточность статистических анализов и корреляционных связей, необходимость выяснения причин и механизмов их проявлений, поиски количественных оценок анализа роли и вкладов исходных факторов в заметные изменения, например, климата Земли, наряду с продолжающейся ориентацией на антропогенный фактор.

Как прогресс в не до конца логичных и объективных подходах воспринимается учёт не только наземных откликов на воздействия внешних факторов, как было принято ранее, но и промежуточных (например, НСВЗ, воздействия неприливного характера и др.) и даже частично исходных (природных внешних) – обращения внимания к космофизическим воздействиям. Но авторы такого рода работ нередко ограничиваются логическими построениями, не прибегая к конкретным численным оценкам динамических и энергетических эффектов, объяснениям характера и механизма откликов.

Изменчивость климата – одно из показательно информативных проявлений СЗС, связанных со многими наземными откликами на все внешние воздействия, т. е. явно многомерное проявление СЗС. Наличие происходящего глобального потепления, наконец, признано Межправительственной группой экспертов по изменению климата (IPCC) несомненным, но его основной причиной по-прежнему навязывается парниковый газ, т. е. антропогенный фактор. Наиболее убедительным экспериментальным подтверждением малой роли ПЭ являются данные высокоточных спутниковых наблюдений, свидетельствующие о существенном изменении глобального энергетического баланса климатической системы за последние 20 лет.

В поисках причины потепления ученые перебрали фактически все возможные наземные факторы, порой даже весьма далекие по своей природе от климатических вариаций. Указываются дрейфы географического и геомагнитного полюсов Земли, вариации суточного вращения Земли и повышение эндогенной, конкретно – вулканической активности Земли. Сопоставление роста содержания парниковых газов в атмосфере и вулканической активности Земли может являться лишь косвенным свидетельством существования определённой связи между этими процессами. Землетрясения и извержения вулканов являются геодинамическими индикаторами СЗС. Исследователи СЗС обсуждают и пытаются объяснить природные процессы промежуточными эффектами и наземными откликами, не зная всех их исходных причин.

Следует отметить, что вклад СА, с чем прежде всего соотносят геофизические вариации, например, климат, сильно зависит от временного интервала в связи с дифференциальным характером СЗС на разных временных масштабах. Оказывается, что СА не является единственным и определяющим фактором: в интервалах до 25 лет – вклад СА менее 2 %, на протяжении десятков лет – область роста вклада СА, а порядка 100 лет – вклад до 30–40 % и на 1000-летней шкале средний вклад СА в дисперсию температурных изменений составляет порядка 20 %; а на большей временной шкале предполагаются вклады уже космофизических факторов. Следовательно, воздействием СА возможно объяснить действительно лишь часть изменений климата (но с установлением их механизма).

При анализе астрофизических воздействий на климат отмечены следующие трудности, с которыми сталкиваются исследователи, когда пытаются приписать тренды климата воздействию СА: солнечное воздействие имеет значительные неопределенности, отклики климатической системы в целом и продолжительности ледниковья, в частности, являются нелинейными, датировки продолжительности флуктуаций и СА имеют неопределенности, а также вклады вулканического и других воздействий; сложные модели глобальной циркуляции нуждаются в учёте всех нелинейных взаимодействий и механизмов обратной связи в рамках климатической системы. Обзорно-аналитическое рассмотрение солнечного влияния на климат выполнено 15-ю исследователями, представляющими 18 научных организаций Англии, США, Швейцарии, Германии и Голландии. Однако традиционное ограничение сложившимися понятиями об изменчивости природной среды и факторах, их обуславливающих, привело соавторов в итоге их впечатляющего обзора к вынужденному перечислению большого ряда вопро-

сов, оставшихся без ответа и объяснений, а также перечислению требуемых дополнительных информации и данных, для дальнейшего выяснения механизмов и т. д. Это подтверждает мнение о том, что изучение СЗС находится на поисковой стадии, нуждается в поиске и учёте всех исходных (внешних) природных факторов, обуславливающих изменчивость природной среды [2].

По вариациям глобальных поверхностных температур, зарегистрированным, начиная с 1850 г., проверено: все ли десятилетние и мультидекадные колебания климата имеют астрономическую природу. Регистрограммы, выведенные по орбитам планет, представляют очень похожие спектры мощности. На двух регистрограммах тесно корреспондируют одиннадцать частот с периодом между 5 до 100 гг. Среди них, большие климатические колебания типа «пик-впадина» с амплитудой около 0,1 и 0,25 °С, и периодами около 20 и 60 лет, соответственно, синхронизированы с орбитальными периодами Юпитера и Сатурна. В температурных регистрограммах также видны 11- и 22-летние солнечные циклы. 9,1-летний цикл синхронизируется с орбитальными циклами Луны. Феноменологическая модель, основанная на этих астрономических циклах, может быть использована для хорошей реконструкции (восстановления характера) колебаний температуры с 1850 г. и сделать частично прогнозы для XXI в. Установлено, что, по крайней мере, 60 % глобального потепления, наблюдаемого с 1970 г., были вызваны совместным действием вышеуказанных естественных климатических колебаний. Частичный прогноз показывает, что климат может быть стабилизированным или прохладным до 2030–2040 гг. Качественно обсуждены возможные физические механизмы с акцентом на явление коллективной синхронизации связанных осцилляторов. Обнаружена синхронизация проявлений СЗС и в галактических масштабах времени.

Изучение эволюции СА, климата и тектонической активности Земли показало, что эти процессы изменяются синхронно (одновременно), как будто ими управляют из одного центра. У исследователей возникает естественный соблазн приписать дирижёрские функции собственной отрасли знаний: солнечным, атмосферным, тектоническим процессам или воздействиям электромагнитных, магнитных и гравитационных полей. Но в этом конкурсе выигрывает Солнечная система в целом, поскольку основные источники климатических колебаний находятся вне Земли. Поэтому нельзя, сначала разобраться с внутренними процессами взаимодействия суши, моря и атмосферы, а уже потом оценить влияние внешних сил, как это делается, например,

политизированными идеологами, начиная с Киотского протокола. Изменения СА и лунно-солнечных приливов как раз и формируют взаимодействие суши, моря и атмосферы. Гравитационные поля тел Солнечной системы периодически изменяют солнечную и сейсмическую активность, циркуляции воздушных и жидких масс Земли, а уже эти изменения, в основном, и формируют климатические колебания. Взаимодействие упомянутых процессов объясняет все внутривековые потепления и похолодания климата, которые произошли за последние 400 лет.

Факторами внешних воздействий на Землю являются солнечная активность, потоки галактических космических лучей и эндогенная активность Земли, обуславливаемая гравитационным воздействием на Землю со стороны Луны, Солнца и других небесных тел Солнечной системы в процессе ее барицентрического движения в гравитационном поле Галактики, а также последствиями возмущений Солнечной системы окружающей её среды. Системный и междисциплинарный анализ проявлений солнечно-земных связей способствует учету всех глобальных факторов внешних воздействий на Землю. Появилась возможность объяснения механизма, энергетики, цикличности, синхронности, полярной асимметрии, нестабильности суточного вращения Земли, скачкообразности и др. видов проявлений солнечно-земных связей. Синхронные отклики всех оболочек Земли и наблюдаемых слоев атмосферы Солнца, ранее относимые к «аномалиям», свидетельствуют о внешнем воздействии на Солнечную систему в целом [1].

Список литературы

1. Смольков Г. Я., Баркин Ю. В. К системному и междисциплинарному изучению солнечно-земных связей // Космические факторы эволюции биосферы и геосферы : тр. коллоквиума (21–23 мая 2014 г., Москва, ГАИШ). СПб. : Изд-во ВВМ, 2014. С. 162–179.
2. Solar influences on climate / L. J. Gray, J. Beer, M. Geller, J. D. Haigh, M. Lockwood, K. Matthes, U. Cubasch, D. Fleitmann, G. Harrison, L. Hood, J. Luterbacher, G. A. Meehl, D. Shindell, B. van Geel, W. White // *Rev. Geophys.* 2010. Vol. 48. RG4001.

УДК 556.555.2

Уровенный режим озера Красиловское (Алтайский край) в 2013–2017 гг.

И. А. Суторихин (sia@iwep.ru)¹Н. Ф. Харламова(harlamovageo@rambler.ru)²С. Ю. Самойлова (bastet@iwep.ru)¹А. А. Коломейцев (kolomeycev@iwep.ru)¹С. А. Кураков³ (ksat@imces.ru)¹ Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, г. Барнаул² Алтайский государственный университет, г. Барнаул³ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

Аннотация. Представлены результаты мониторинга гидрометеорологических параметров и уровня озера Красиловское (Алтайский край) в 2013–2017 гг. Данные получены при помощи автоматизированного измерительного комплекса (АПИК), разработанного в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН), а также посредством снегомерных съемок, проводившихся сотрудниками ИВЭП СО РАН в водосборном бассейне и на акватории озера.

Ключевые слова: бессточное озеро, гидрометеорологические параметры, уровень озера, снежный покров, снегозапасы, снегомерная съемка.

Введение

Озера, в особенности бессточные, являются индикаторами климатических изменений [1; 8 и др.]. В Западной Сибири в последние десятилетия наблюдается снижение водности бессточных озер лесостепной и степной зон Ишимской, Барабинской и Кулундинской равнин, связанное с процессами потепления и аридизации климата [7]. Уровенный режим бессточных озер формируется под влиянием множества факторов: климатических (температурный режим, жидкие осадки, высота снежного покрова и снегозапасы) и состояния подстилающей поверхности (глубина промерзания и связанная с ней водопроницаемость грунтов, уровень грунтовых вод). В связи с этим, исследование и прогноз уровня озера Красиловское является весьма сложной задачей, поскольку оценить все эти параметры зачастую не представляется возможным с технической точки зрения.

Для осуществления комплексного гидрометеорологического мониторинга в ИМКЭС СО РАН (г. Томск) создан автоматизированный многоканальный измерительный комплекс АПИК, позволяющий в автономном режиме получать информацию о метеопараметрах атмосферы и почвы, уровне озерных и грунтовых вод. Такой комплекс

функционирует с июля 2013 г. на территории базы учебных практик Алтайского государственного университета «Озеро Красиловое» в Косихинском районе Алтайского края. Валидация полученных материалов данными Росгидромета по метеостанции Троицкое, расположенной в 30 км от объекта исследований [5] и собственными полевыми наблюдениями за снежным покровом, показала высокую точность измерений.

Объект исследования

Бессточное озеро Красиловское расположено на юго-востоке Западно-Сибирской равнины на правом берегу реки Оби в зоне сочленения боровых террас с верхней надпойменной террасой [4]. Абсолютная высота местности около 220 м., площади водосбора и зеркала озера 46,11 и 0,8 км² соответственно, длина озера – 2,4 км, средняя ширина – 0,33 км, средняя глубина – 2,7 м, максимальная – 6,5 м. Озеро имеет бессточный режим, питается поверхностными и грунтовыми водами [6]. В последние десятилетия произошло значительное сокращение водности озера: так, в 1978 г. его максимальная глубина составляла 12 м, в 1998 г. 8 м [3], наличие озерных террас указывает на то, что в прошлом озеро Красиловское имело еще большие размеры. Озеро по происхождению подпрудное, образовано в результате перекрытия водотока песчаной дюной, сформированной ветровыми потоками северо-восточного направления. Песчаные дюны перекрыли не только водотоки, но и суглинистые отложения «высоких террас» р. Оби, что обусловило разнообразие рельефа, грунтов и природных комплексов. На территории водосбора отмечается уникальное сочетание естественных ландшафтов подтаежных лесов с богатым травяным ярусом, сосновых боров на песчаных дюнах, болот и культурных агроландшафтов [3; 4].

Методы исследований и исходные материалы

В основе работы – данные, полученные с атмосферно-почвенного измерительного комплекса (АПИК), разработанного в Институте Мониторинга Климатических и экологических систем СО РАН. Это автономный комплекс, предназначенный для стационарных долговременных автоматических измерений и регистрации основных параметров атмосферы и почвы. В режиме реального времени с интервалом в 15 минут производятся измерения суммарной солнечной радиации, атмосферного давления, температуры и влажности воздуха на высоте 2 и 4 м, жидких осадков, высоты снежного покрова, температуры грунта от поверхности до глубины 3,2 м, а также уровня воды в озере.

Для оценки параметров снежного покрова сотрудниками ИВЭП СО РАН начиная с 2015 г. проводятся ежегодные снегомерные съемки по трем маршрутам, отражающим различные ландшафтные условия водосбора: в лесу, поле и непосредственно на акватории озера. Съемки проводятся во второй половине зимы до начала снеготаяния, при этом определяются толщина, плотность и запасы воды в снежном покрове. Полевые работы и камеральная обработка результатов наблюдений производятся в соответствии с общепринятыми требованиями к работам такого рода [2].

Основные результаты и обсуждение

Авторами проанализированы ежегодные гидрометеорологические данные с начала октября по май в 2015–2016 и 2016–2017 гг., отражающие процессы снегонакопления, снеготаяния и связанного с ними весеннего притока воды в озеро (табл. 1). Результаты, полученные в 2013–2015 гг., были опубликованы ранее [3].

Гидрометеорологические условия и динамика уровня озера исследуемого периода имеют существенные различия. Так, максимальный подъем уровня – более чем на 1,5 м относительно зимнего – наблюдался весной 2014 г. При этом жидкие осадки, высота снежного покрова и снеготалоходы были существенно ниже, чем в последующие годы, когда подъем уровня не превышал 90 см. Основным фактором, определившим высокий уровень озерных вод в 2014 г., явилось значительное промерзание грунта зимой 2013–2014 гг. Грунты в водосборе озера преимущественно песчаные и глинистые, при снижении температуры до 0 °С они начинают быстро промерзать. В первой декаде декабря 2013 г. при среднесуточных температурах воздуха около –10 °С и отсутствии снежного покрова произошло понижение температуры грунта ниже 0 °С в почвенном горизонте глубиной до 20 см. В дальнейшем с 24 января до 17 февраля 2014 г. длительный холодный период со среднесуточной температурой воздуха до –24,2 °С и высотой снежного покрова, в 1,5 раза меньшей среднегодовой нормы, способствовали промерзанию грунта на глубину более 30 см. Впоследствии во время значительной оттепели 20–23 февраля 2014 г. в результате просачивания воды в верхние слои мерзлого грунта произошло образование ледяного запирающего слоя, препятствующего просачиванию талых вод. В сложившейся ситуации произошел интенсивный сток аккумулярованных талых вод в водоем [3].

В осенне-зимний период 2014–2015 гг., благодаря большому количеству жидких осадков и значительной высоте снежного покрова,

промерзание грунтов отсутствовало. В результате интенсивной инфильтрации талых вод скорость и высота подъема уровня воды в озере оказались существенно ниже, чем в предыдущий год (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительная характеристика гидрометеорологических условий, предшествующих подъему уровня оз. Красиловское в 2014–2017 гг.

Показатель	Период наблюдений			
	01.10.2013–10.05.2014*	01.10.2014–10.05.2015*	01.10.2015–10.05.2016	01.10.2016–10.05.2017
Сроки установления устойчивого снежного покрова	22 декабря	17 ноября	9 ноября	12 октября
Количество жидких осадков за период установления снежного покрова (октябрь – ноябрь), мм	125,4	167,4	81	109,8
Высота снежного покрова к началу снеготаяния, мм	750	950	640**	900**
Запас воды в снежном покрове к началу снеготаяния, мм	50	181	187**	272**
Период интенсивного снеготаяния	12–30 марта (19 сут.)	6–14 апреля (9 сут.)	14,03–28,03 (15 сут.)	25,03–08,04 (15 сут.)
Средняя температура воздуха в период интенсивного снеготаяния, °С	1,6	4,1	0,66	0,47
Интенсивность снеготаяния, мм/сут.	13	22	16	13
Количество жидких осадков за период снеготаяния, мм	0	41,58	13	14,6
Весенний подъем уровня воды, мм	1540	630	900	400
<i>Примечание:</i> * – из опубликованных ранее материалов [3]; ** – по материалам снегомерных съемок				

В последующие два года такого значительного промерзания грунта, которое наблюдалось в 2014 г., не было зафиксировано (рис. 1). Зимой 2015–2016 г. произошло уменьшение температуры грунта до 0 °С в слое глубиной до 5 см. Причиной подобного промерзания грунта, по нашему мнению, явилось незначительное количество осадков осенью 2015 г., а также высота снежного покрова менее среднесуточной нормы. Наблюдавшиеся метеорологические условия способствовали формированию «запирающего» мерзлого горизонта и стоку талых вод с водосбора без существенных потерь на инфильтрацию. Кроме того, еще большему подъему уровня озера – на 90 см, способствовало значительное количество жидких осадков весной 2016 г. (рис. 2, а).

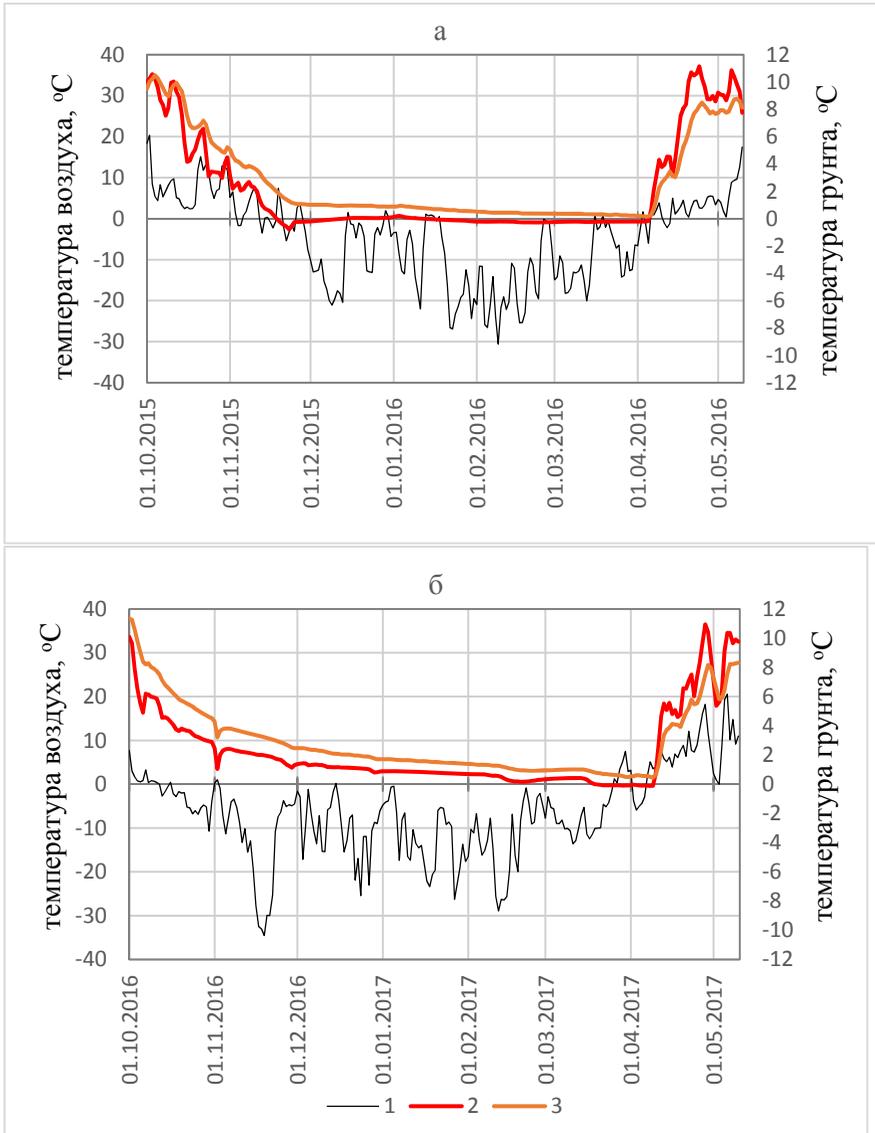


Рис. 1. Среднесуточные температуры воздуха и грунта: *а* – в 2015–16 гг., *б* – в 2016–17 гг. 1 – температура воздуха на высоте 2 м; 2 – температура грунта на глубине 5 см; 3 – то же, на глубине 30 см

В осенне-зимний период 2016–2017 гг. гидрометеорологические условия были принципиально иными. Началу зимы предшествовала дождливая осень: в октябре 2016 г. сумма осадков превысила средне-многолетнюю в 2 раза, что способствовало насыщению грунтов водой и подъему уровня озера до отметки 214,1 м. Осенью предыдущего 2015 г. уровень был ниже на 60–70 см и достигал не более 213,4–213,5 м (см. рис. 2). Высокая степень увлажненности грунтов, а также значительная высота снежного покрова и снегозапасы (см. табл. 1) препятствовали промерзанию грунта в течение всей зимы. Лишь к концу снеготаяния во время весенних заморозков температура на глубине 5 см опустилась до 0 °С (рис. 1, б). Очевидно, в таких условиях происходила постоянная инфильтрация талых вод в грунт, и поверхностный сток был минимальным. Весенний подъем уровня озера оказался незначительным – всего 40 см – и происходил медленнее, чем в предыдущие годы. Из-за недостаточного притока чистой воды в озеро произошло ее перенасыщение сероводородом, что вызвало массовую гибель рыбы весной 2017 г.

Заключение

Исследование уровня режима в годы с принципиально различными гидроклиматическими условиями позволило выявить главные факторы, определяющие весенний подъем уровня бессточного пресного озера Красиловское. Весенний приток воды в наибольшей степени зависит от состояния грунта на водосборе: так, в 2014 г. промерзание грунта до глубины более 30 см и формирование ледяного запирающего слоя способствовали интенсивному стоку талых вод и резкому подъему уровня более чем на 1,5 м. Подобное явление, но в меньшей степени, наблюдалось и весной 2016 г., что подтвердило полученные ранее выводы [3]. В годы без промерзания грунтов, несмотря на большое количество осадков и значительные снегозапасы, подъем уровня озера был менее интенсивным. Характерным в этом отношении является 2017 г. Из-за увеличенного количества жидких и твердых осадков в осенне-зимний период, препятствовавших промерзанию грунтов и как следствие – постоянной инфильтрации вод в глубинные горизонты, весенний приток воды и подъем уровня озера был незначительным. С помощью данных измерений комплекса АПИК и снегомерных съемок удалось проанализировать гидрометеорологические параметры водосбора оз. Красиловское, оценить уровень режим в разные годы.

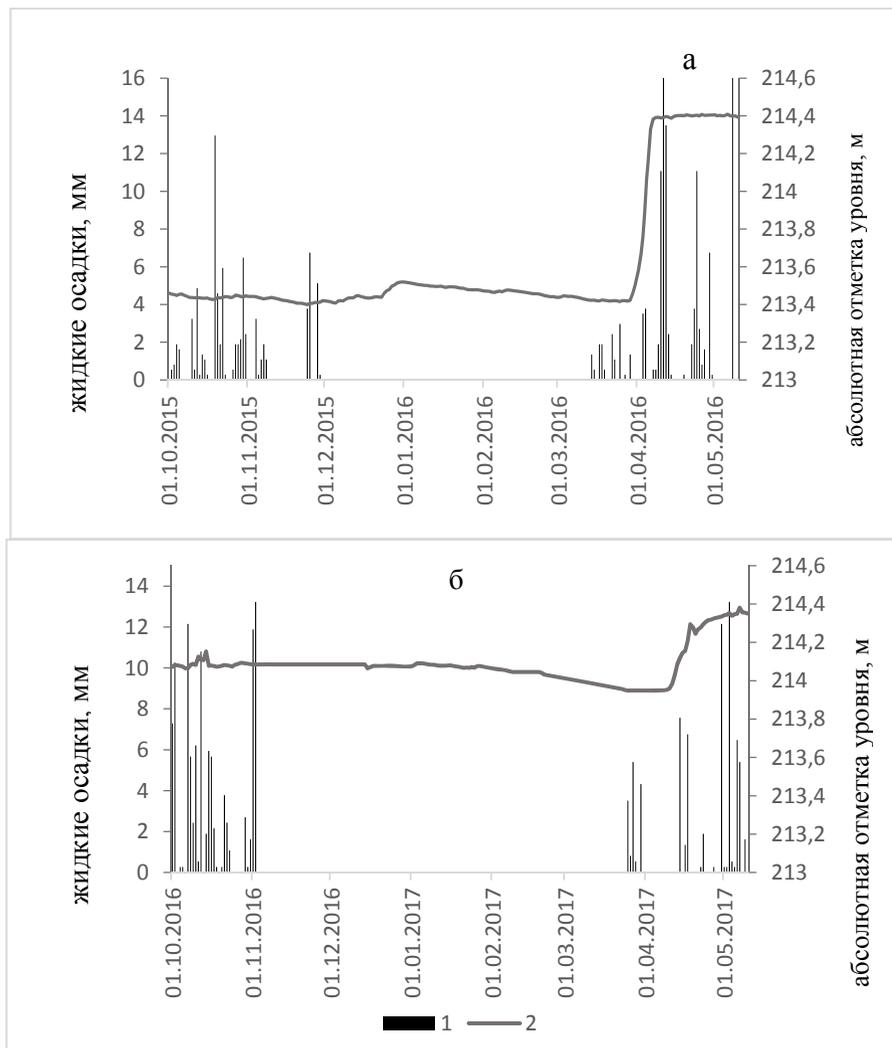


Рис. 2. Динамика уровня оз. Красиловское в осенне-весенний период 2015–2016 гг.
1 – жидкие осадки, мм; 2 – абсолютная отметка уровня озера, м

Мониторинг гидроклиматических параметров бассейнов малых бессточных озер с помощью автоматических комплексов типа «АПИК» дает возможность более точной оценки и прогноза их водности в условиях изменяющегося климата.

Список литературы

1. *Адаменко В. Н.* Климат и Озера. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 264 с.
2. *Быков Н. И., Попов Е. С.* Наблюдения за динамикой снежного покрова в ООПТ Алтае-Саянского экорегиона (методическое руководство). Красноярск, 2011. 64 с.
3. Динамика весеннего подъема уровня бессточных озер (на примере озера Красиловское Алтайского края) / В. В. Зуев, Н. Е. Зуева, С. А. Кураков, И. А. Суторихин, Н. Ф. Харламова // География и природ. ресурсы. 2016. № 4. С. 126–134.
4. *Лузгин Б. Н.* Происхождение Красиловского озера // Изв. Алт. ун-та. Сер. Химия, география, биология. 1998. С. 113–116.
5. *Погода и Климат* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (20.02.2019).
6. Климатические условия и гидрооптические характеристики пресноводных озер Алтайского края / И. А. Суторихин, В. И. Букатый, Н. Ф. Харламова, О. Б. Акулова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 162 с.
7. *Харламова Н. Ф.* Оценка и прогноз современных изменений климата Алтайского региона. Барнаул, 2013. 156 с.
8. *Шнитников А. В.* Внутривековые колебания уровня степных озер Западной Сибири и Северного Казахстана и их зависимость от климата // Тр. лаб. озероведения. М., 1950. Т. 1. С. 28–129.

УДК 551.5:001.891

Применение бинарных деревьев решений для прогноза метеорологических явлений

В. М. Токарев

М. Я. Здерева

Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, г. Новосибирск

Аннотация. Описан алгоритм построения бинарных логических деревьев для прогноза редких метеорологических явлений погоды, разработанный в СибНИГМИ. Ключевыми являются моменты, связанные с проблемой неустойчивости полученных решений и с достижением уменьшения потерь при дальнейшем использовании полученных решений в прогностической практике. К ним относятся варианты формирования выборок предиктанта, критерии разделения условных вероятностей классов явлений и выбора пороговых значений предиктанта, алгоритм получения множества решений. Приведены примеры работы алгоритма для прогноза гроз и заморозков.

Ключевые слова: распознавание образов, алгоритм DW, критерии разделения условных вероятностей, оптимизация статистических решений.

Прогноз погоды общего пользования содержит как численные параметры (например, температура, количество осадков, скорость ветра и т. п.), так и альтернативные «да/нет» (преимущественно метеорологические явления, которые в большинстве относятся к категории опасных). Синоптический прогноз строится на базе вероятностной оценки того или иного метеорологического явления в связи с ат-

мосферными процессами и ожидаемой синоптической ситуацией. Статистический прогноз в конечном счете сводится к получению распределения вероятностей классов явления и, если это необходимо, переводу в бинарный прогноз с помощью критериев, минимизирующих эмпирический средний риск.

Наиболее распространенным подходом в прогностических задачах в метеорологии является построение линейных дискриминантных функций. Однако в методических разработках СибНИГМИ успешно применяются алгоритмы распознавания образов, основанные на построении цепочек логических функций (деревья решений), разделяющих условные вероятности в двух классах. Построение бинарных деревьев на базе модификации алгоритма DW реализовано для прогноза гроз, гололедных явлений, заморозков.

1. Формирование рабочих выборок

Для создания решений необходима архивная выборка, в которой будут приведены в соответствие искомое явление и набор признаков (предикторов). Традиционным в метеорологии является подход с разбиением архивной выборки на обучающую и проверочную (экзаменационную). При этом полученное на этапе статистического обучения единственное решение просто проверяется на независимой выборке, и полученные результаты (как правило, с более низкими оценками) принимаются, как более достоверные для полученного решения. Кроме этого, далее обычно следуют оперативные испытания на новых данных, по результатам которых и принимается окончательное решение о принятии методики в эксплуатацию.

Для борьбы с неустойчивостью статистических решений применяются различные алгоритмические и методические подходы. В разработках СибНИГМИ используется ступенчатый подход, при котором на первом этапе получается множество решений, из которых в дальнейшем отбираются лучшие по заданным критериям. Алгоритм усложняется методическими проработками на каждом шаге, но это уменьшает потери при переходе на оперативные расчеты.

1.1. Предикторы

При выборе предикторов в прогностических методиках желательно опираться на наличие их значений в будущих описаниях атмосферы. В наше время гидродинамические модели атмосферы обеспечивают широким спектром выходных параметров на сроки до 5–7 дней. Если решения получать на фактических признаках, заменяя их

затем при восстановлении прогностическими (подход «PP»), то неучтенные ошибки в результатах моделирования могут негативно сказаться на конечных результатах прогнозов. Наиболее распространенным в мире является подход MOS, при котором предикторами являются выходные параметры моделей. При этом сохраняется негативный момент при внедрении изменений в модельных блоках. Поэтому существуют адаптивные алгоритмы, которые пересчитывают решения с заданной регулярностью. Для многоступенчатых вариантов задача усложняется. В последних разработках СибНИГМИ используется MOS-подход. В качестве базовых моделей выступают мезомасштабная COSMO_Sib13 и глобальная GFS(NCEP). Расчеты по первой производятся в вычислительном центре ЗСУГМС, по второй – скачиваются с сайта. Модели имеют разное разрешение по пространству: шаг COSMO_Sib13 равен 13,2 км, шаг GFS = 0,5 °широтной-долготной сетки.

Общие требования для успешного применения статистических алгоритмов на шаге формирования выборок являются:

- набор признаков должен иметь физически обоснованную связь с условиями возникновения метеорологических явлений;
- необходим учет пространственно-временного распределения заданного явления (суточный, сезонный ход, орография и т. п.).

Так, например, список потенциальных предикторов в задаче прогнозирования гроз включает не только температурно-влажностные параметры на различных уровнях, для оценки их стратификации, вертикальных и горизонтальных градиентов, но и расчетные индексы грозовой активности: индекс Вайтинга, Джефферсона, SWEAT, Total Total, Li. Для гололедных явлений важными параметрами являются суточные изменения приземной температуры воздуха и поверхности почвы, температуры и влажности на уровнях AT925 и AT850, их вертикальные градиенты, наличие/отсутствие осадков, изменение давления и т. п.

Второе условие выполняется тем, что в наших задачах выборки формируются по соответствующим сезонам года, а матрицы предиктант-предиктор строятся для каждой метеостанции и на каждый срок заблаговременности прогнозов.

1.2. Варианты представления предиктанта

Как правило, архивные выборки в прогностических методиках для опасных явлений ограничены. Ещё более они ограничены при подходе MOS и при использовании многоступенчатых алгоритмов. В

связи с этим для получения результативных решений необходимо продумать не только набор признаков, но и варианты представления предиктанта.

В своих разработках мы опираемся на данные наблюдений, поступающих с метеостанций в коде КН-01, при этом пытаюсь как бы расширить возможности их использования и получить явления с разной вероятностью в исходных выборках. Так в методе для гроз, предложено восемь основных вариантов классификации явления, как по его продолжительности, так и по расстоянию. По пространству рассматривались грозы на станции и в радиусах 50, 100, 150 км. В каждом кластере учитывались как кратковременные грозы (в срок наблюдения **или** между сроками), так и продолжительные (в срок **и** между сроками). В кластерах 100 и 150 км рассматривались грозы, распространенные по территории (обеспеченность более 25 % станций в кластере) и локальные (менее 25 % станций).

В методике для гололедных явлений разработана их кодировка согласно погодным условиям, поскольку из всех явлений в КН-01 представлен только непосредственно гололед. В кодировке учтены условия образования гололедицы, скрытой гололедицы, сохранения или таяния гололеда. Для каждого кода построены свои решения.

Полученные по разным вариантам решения дают пользователям возможность выбирать между качеством прогноза и детализацией по времени и по пространству. Чем более детализирован прогноз, тем меньше вероятность явления в рабочей выборке и больше вероятность ошибки на выходе.

2. Построение бинарных деревьев

Сам алгоритм представляет итерационный перебор исходных признаков (предикторов) с целью нахождения наилучших их значений для разделения условных вероятностей двух классов заданного предиктанта на зависимой выборке [1]. Разделение первоначальной выборки из двух классов определяемого явления происходит последовательно, с разделением ветвей до выполнения условий останова.

Несмотря на логическую простоту алгоритма, он содержит некоторые ключевые моменты, от которых зависит качество полученных результатов восстановления прогнозов на независимых данных. Определяющими являются:

- критерии оптимальной оценки разделения условных вероятностей на каждой итерации;

- критерии выбора результирующей пороговой вероятности предиктанта для всего дерева;
- способы уменьшения неопределенности полученных решений.

Многочисленные эксперименты показали, что для оценки оптимального разделения при переборе признаков подходит критерий Пирси-Обухова (4). А для выбора конечного порога использованы авторские критерии PRV (5) и минимальная из предупрежденностей первого и второго класса явления (6). Обозначения, используемые в различных оценочных характеристиках, представлены в таблице сопряженности бинарных (да/нет) прогнозов (табл. 1).

Таблица 1

Матрица сопряженности бинарных (да/нет) прогнозов:

Прогноз	Факт		
	да	нет	
да	k11	k12	П+
нет	k21	k22	П-
	Ф+	Ф-	k00

где k11, k12, k21, k22 – числа совпадений двух категорий (да/нет) прогнозов и фактов, П+ – число прогнозов «Да»; П- – число прогнозов «Нет»; Ф+ – число фактических случаев «Да»; Ф- – число фактических случаев «Нет»; k00 – суммарное число фактических случаев = количеству прогнозов.

Расчетные оценки качества прогнозов по таблице сопряженности:

– оправдываемость прогнозов П+, П-:

$$O+= k11/ П+, O-= k11/ П- \quad (1)$$

– оправдываемость всех прогнозов:

$$OO =(k11+k22)/k00 \quad (2)$$

– предупрежденность фактов Ф+, Ф-:

$$P+= k11/ Ф+, P-= k11/ Ф- \quad (3)$$

Т-критерий Пирси-Обухова:

$$T = k11/(Ф+)-k12/(Ф-) \quad (4)$$

prv – смещенный критерий баланса:

$$prv(P+ \geq O+) = 0,3*(P+)+0,7*(O+),$$

$$prv(P+ < O+) = 0,9*(P+)+0,1*(O+) \quad (5)$$

$$\min P_{12} = \min(P+, P-) \quad (6)$$

Пример построенного бинарного дерева по алгоритму DW приведен на рис. 1.

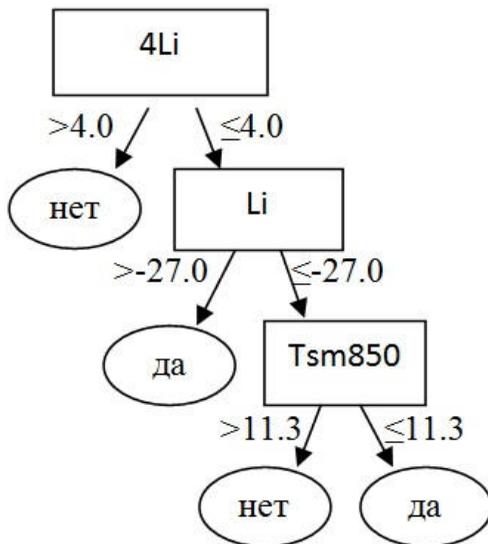


Рис. 1. Решение для прогноза гроз по модели GFS(NCEP) на 54 ч. Метеостанция Новосибирск (индекс 29637). Вариант R0. Li, 4Li – индексы Лифтинг с разных уровней, Tsm850 – температура смоченного термометра на уровне АТ-850

Наиболее трудоемкий и многоступенчатый этап связан с необходимостью учета неопределенности в полученных решениях. Для этого алгоритм DW был существенно доработан методикой получения нескольких независимых, равнозначных для будущего использования бинарных деревьев для каждого случая (т. е. для каждой станции, за одновременности, варианта по предиктантам).

В нашем случае для этой цели использовалось два подхода:

- сокращение списка базовых признаков и получение новых решений;
- сокращение веток в полученных деревьях, и соответственно получение новых решений с другими порогами для разделения классов.

Просеивание предикторов производилось путем пошагового удаления из списка параметров с наименьшей обеспеченностью в делении веток. Обеспеченность рассчитывалась в целом по территории, т. е. по 430 деревьям для каждой заблаговременности с учетом суточного хода предиктанта.

Сокращение веток в каждом дереве производится по степеням двойки. Варианты глубины деревьев для последующей селекции фиксируются принудительным расчетом итогового порога вероятности для каждого уровня глубины, а не только для конечного дерева.

Таким образом, на выходе после работы с обучающей выборкой мы имеем множество построенных решений для каждой станции и для каждой заблаговременности прогноза. Этот ряд имеет достаточно большой размер: число сокращений по параметрам, умноженное на число сокращений по веткам.

Последний этап – выбор оптимальных решений по результатам прогона решений по независимой выборке. Лучшие деревья по оценкам на независимой выборке передаются на оперативные испытания в производственные коллективы прогнозистов.

3. Результаты прогнозов по DW деревьям

3.1. Результаты прогноза гроз

Программное обеспечение получения прогнозов на базе полученных решений встроено в оперативную технологическую линию статистического пост-процессинга в ЗСРВЦ. Гидрометцентре Западно-Сибирского УГМС проведены оперативные испытания метода, выполнена оценка качества прогноза гроз, и принято решение по использованию нового метода в оперативной работе прогностических подразделений Управления [2].

В таблице 2 приведен пример результатов прогноза гроз по решениям для разных площадей с радиусами 0, и 100 км по Новосибирской области. Отметим, что эти варианты считаются для каждой метеостанции, полагая ее центром кластера. Оценки осреднены по территории и за теплый период 2017 г. Видно, что результаты лучше для тех случаев, где изначально в зависимой выборке вероятность гроз была выше. Так лучше прогнозируются дневные грозы в радиусе 100 км. Ещё понятней разница в качестве прогнозов по кластерам на рис. 2 для двух основных оценок O+ и P+.

Таблица 2

Оценки прогноза гроз по Новосибирской области. Май – сентябрь 2017 г.

Заблаговременность	Количество случаев					O+	O-	OO	P+	P-	T	прv
	k11	k12	k21	k22	k00	%						
R = 0												
24	216	681	320	4035	5252	24	93	81	40	86	0,26	0,29
36	426	848	224	3573	5071	33	94	79	66	81	0,46	0,43
48	230	761	285	3833	5109	23	93	80	45	83	0,28	0,30
54	440	896	225	3290	4851	33	94	77	66	79	0,45	0,43
R = 100												
24	822	834	520	3077	5253	50	86	74	61	79	0,40	0,53
36	996	824	337	2917	5074	55	90	77	75	78	0,53	0,61
48	844	902	442	2922	5110	48	87	74	66	76	0,42	0,54
54	926	750	408	2851	4935	55	87	77	69	79	0,49	0,60

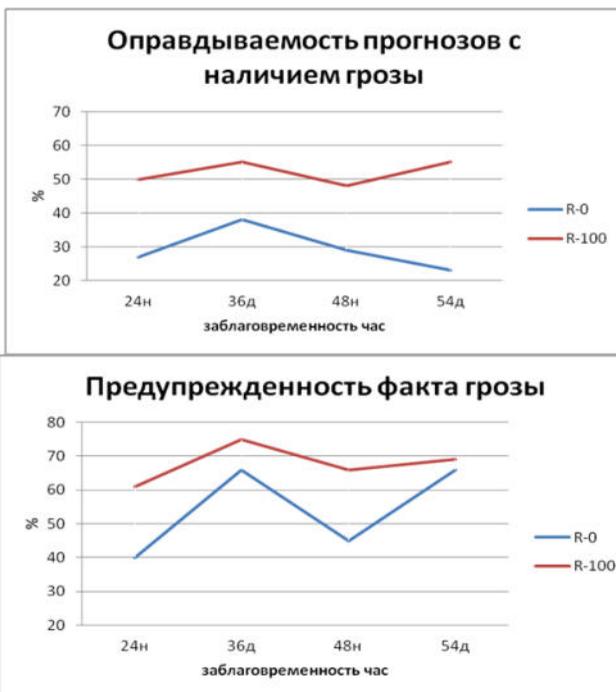


Рис. 2. Оценки оправдываемости и предупрежденности грозы по расчетам за 2017 г. для Новосибирской области

3.2. Результаты прогноза заморозков

В процессе исследования для прогноза заморозков было построено 7 вариантов ($p1-p7$) деревьев путем просеивания предикторов. Затем к каждому дереву применена процедура сокращения веток, получено $7*5$ итераций деревьев. Из этих 35 выбрано по девять лучших ($sp1-sp9$) по оценкам на зависимой выборке. Протестируем эти варианты ($7+9$) на независимых данных для того, чтобы выбрать наиболее результативный. Заметим, что для каждой станции и заблаговременности номер «лучшего» варианта может меняться.

В качестве независимой выборки для сравнительных оценок по разным вариантам и подходам использованы фактические и модельные данные весенне-осеннего сезона апрель – сентябрь 2018 г. Расчеты для 432 станций, общее количество случаев составило 64 500 для каждого варианта.

Для демонстрации различий в точности прогнозирования заморозков на рис. 3 представлены оценки для 16 вариантов искомым деревьев. Если для каждой станции отобрать лучший вариант (который в дальнейшем и будет использоваться на практике), получим оценки, изображенные как «best». Из выборки оценок для 432 станций по территории Урало-Сибирского региона возьмем минимальное, максимальное и среднее значение показателя prv , как характеристику баланса между оправдываемостью и предупрежденностью явления. Видно, что примерно до пятой итерации сокращения числа признаков среднее значение prv примерно сохраняется, а минимальное и максимальное падает. Наилучшие показатели у последнего варианта сокращения ($p7$), в котором в нашем случае оставлено три признака. Отметим, что на зависимой выборке первый вариант с полным набором признаков имеет самые высокие оценки. Приведенный пример подтверждает наличие неустойчивости в статистических решениях в ограниченных выборках, и поиск решений для борьбы с ней является необходимым шагом.

Заключение

Разработанные автоматизированные методы для прогноза гроз, заморозков и гололедных явлений используют современную прогностическую продукцию COSMO-RU_Sib и GFS (NCEP).

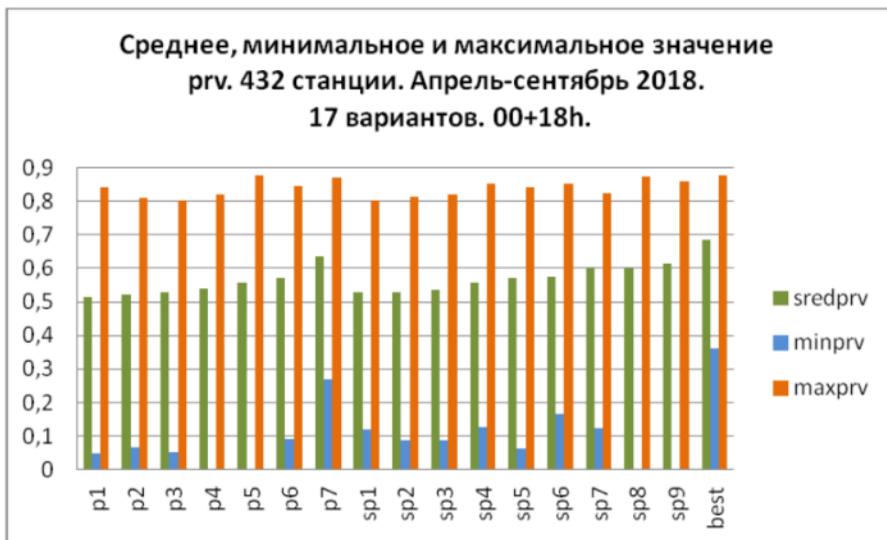


Рис. 3. Оценки **prv** по независимой выборке 2018 г. для предварительных вариантов деревьев для заблаговременности 18 ч

Проблема неустойчивости решений для редких природных явлений решалась за счет использования переменных радиусов для обучения, оценки и различных формулировок прогнозов. Технология расчета прогнозов гроз позволяет оценить явление, как в конкретной точке (на станции), так и в различных радиусах, за счет полученных многовариантных решений. Это дает синоптику возможность выбирать варианты между детализацией прогнозов или большей их устойчивостью.

Разработка доведена до полной автоматизации с очень экономичными оперативными расчетами на базе выходной модельной продукции COSMO-RU_Sib и GFS (NCEP). В настоящее время прогнозы гроз, основанные на данных GFS(NCEP), являются основными в силу более высокого качества, на базе COSMO-RU_Sib – вспомогательными. Предполагается продолжить сравнительный анализ оценок решений по двум моделям, тем более в связи с усовершенствованиями (например, уточнением описания топографии в модели COSMO-RU_Sib).

Список литературы

1. Лбов Г. С., Манохин А. Н. Распознавание образов при разнотипных признаках в условиях малой выборки // Статистические проблемы управления. Вильнюс, 1976. Вып. 14. С. 57–63.
2. Оперативная технология прогноза гроз в Сибири и результаты ее испытаний / В. М. Токарев, М. Я. Здерова, Н. А. Хлучина, Л. П. Воробьева, Н. А. Бабошина // Гидрометеорол. исслед. и прогнозы. № 2(368). С. 27–43.

МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ СУШИ

УДК 911.3:621.81

Изменения уровня режима оз. Байкал и расходов р. Ангары в современных климатических условиях

Н. В. Абасов (nva@isem.irk.ru)

Т. В. Бережных (berejn@isem.irk.ru)

В. М. Никитин (nikitin1310@mail.ru)

Е. Н. Осипчук (eugene.os@mail.ru)

Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск

Аннотация. Рассматривается влияние уровня режима озера Байкал и водохранилищ Ангарского каскада ГЭС (Иркутского, Братского, Усть-Илимского, Богучанского) на социально-экономические требования региона, их экологического состояния в условиях нормальной, экстремально высокой и экстремально низкой водности в современных климатических условиях. Дополнительные водохозяйственные, экологические, энергетические риски для функционирования водохозяйственной системы в рассматриваемых бассейнах возникли в период жесткого маловодья 2014–2017 гг. и противоречиями в этих условиях с нормативно-правовыми нормами основ регулирования стока для рассматриваемых бассейнов.

Ключевые слова: уровень режим оз. Байкал, регулирование стока, климатические изменения, Ангарский каскад, маловодный период.

Введение

Длительный маловодный период в бассейне оз. Байкал с 1996 г., включающий экстремально маловодье 2014–2017 гг., привел к работе многолетних запасов водохранилищ Ангарского каскада с нарушением устойчивости функционирования водохозяйственной системы бассейна р. Ангары в целом [4; 7].

Анализ климатических условий в этот период показал, что это маловодье было вызвано в большей степени экстремально низкими

показателями атмосферных осадков в летний период (июнь – сентябрь) в сочетании с аномально высокими летними температурами.

Наряду с природно-климатическими условиями, риски водохозяйственной системы обострились в рамках существующих правил использования водных ресурсов водохранилищ, расположенных в бассейне р. Ангары. Существующие правила ПИВР-1988 г. нуждаются в пересмотре, так как произошли значительные изменения социально-экономических условий в стране и требований водопользователей и водопотребителей [8]. Проект новых правил ПИВР-2013 не принят в эксплуатацию в связи с невозможностью выполнения Постановления Правительства № 234 при экстремальной водности и множественном противоречий между различными водопользователями.

1. Изменения природно-климатических и гидрологических условий в бассейне оз. Байкал и р. Ангары

Колебания водности в бассейнах р. Ангары и оз. Байкал во многом определяются климатическими изменениями и подтверждаются данными непрерывных гидрометеорологических наблюдений с начала XX в. Климатические изменения, происшедшие в бассейне оз. Байкал за последние два десятилетия (1996–2017 гг.) привели к уменьшению среднегодового полезного притока в озеро на 15 %.

Многолетние маловодные периоды могут приводить не только к полной сработке водохранилищ многолетнего регулирования, но и к специальным режимам управления водохозяйственной системы (ВХС), как это произошло в жесткий маловодный период 2014–2017 гг. в бассейнах р. Ангары и оз. Байкал. В эти периоды наиболее острыми проблемами стали:

- поддержание функционирования в нормальных эксплуатационных условиях водозаборов в нижних бьефах ГЭС (особенно Иркутской ГЭС с большим водопотреблением на участке «нижний бьеф Иркутской ГЭС – Братское водохранилище»);

- обеспечение нормальной работы водного транспорта и навигационных условий в Нижней Ангаре;

- учет экологических и санитарно-гигиенических требований, связанных с рыбным хозяйством и поддержанием качества воды в соответствии с установленными нормативами на каждом участке реки.

Изменение климата в бассейнах р. Ангары и оз. Байкал в последние два десятилетия связано с глобальными процессами, прежде всего, со значительным повышением температур воздуха, как годовых, так и сезонных и уменьшением площади льда в Арктике. Анализ

глобальных изменений климата Центральной Азии [1] показывает тенденцию повышения летних показателей давления и их понижений зимой, а также существенные корреляции с притоком воды в оз. Байкал, а также годовыми показателями уменьшения площади льда и повышением температур в Арктике в сентябре.

Положительные аномалии летних температур воздуха в 2014–2017 гг. наблюдались по всей территории бассейнов оз. Байкал и Ангары по сравнению с периодом 1950–1995 гг. до 2–3 °С. (рис. 1, б). При этом наибольшие отрицательные аномалии летних осадков до (40–60 мм) отмечались в центральной и южной частях бассейна оз. Байкал (рис. 1, а).

Полезный приток в оз. Байкал является основным, природообусловленным фактором, определяющим режимы регулирования водохранилищ на р. Ангара в соответствии со складывающимися гидрологическими условиями [3; 5]. Для Ангарского каскада характерна высокая изменчивость ежегодных притоков в каскад. Маловодные периоды различной интенсивности и продолжительности обычно сменяются на многоводные и наоборот. Как правило, маловодные периоды на оз. Байкал совпадают с маловодными периодами в бассейне р. Ангары (Братское водохранилище), но последние не всегда совпадают с водностью на других нижележащих водохранилищах Ангарского каскада Усть-Илимском и Богучанском (боковой приток). При совпадении маловодных периодов на оз. Байкал и Братском водохранилище, на Ангарском каскаде в целом устанавливаются экстремальное маловодье, как это было в 1976–1982 гг. [6].

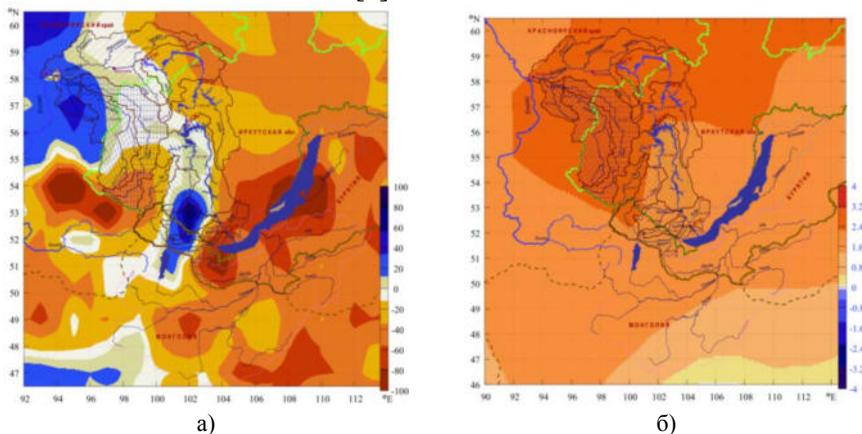


Рис. 1. Отклонение среднелетних осадков (а, мм) и температур (б, °С) для 6–9 месяцев между периодом 2014–2017 гг. и 1950–1995 гг.

Наиболее значимыми для Ангарского каскада ГЭС являются полезный приток в оз. Байкал (около 56 % общего притока) и боковой приток в Братское водохранилище (30 %). Динамика изменения данных притоков представлена на рис. 2. Боковые притоки в Усть-Илимское и Богучанское водохранилища сравнительно небольшие и имеют значимые составляющие только для периода весеннего половодья (табл. 1).

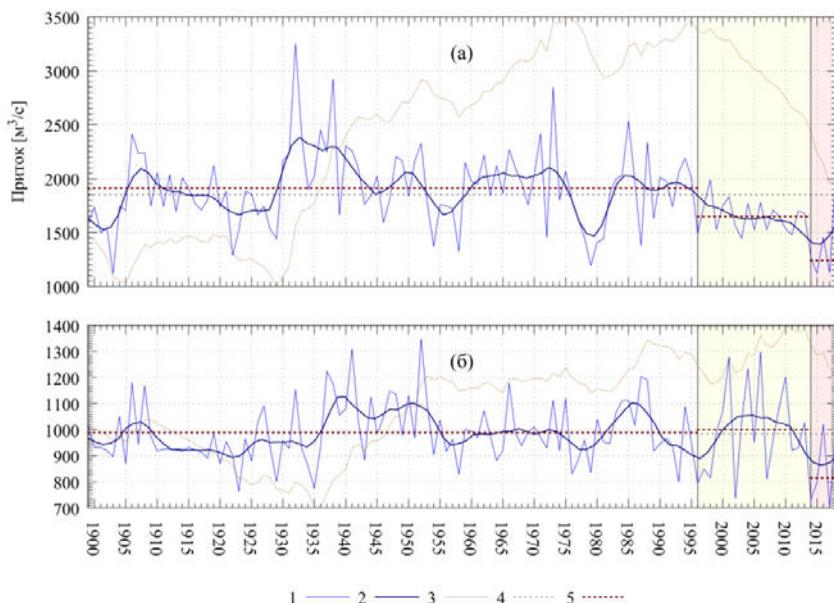


Рис. 2. Динамика изменения среднегодовых показателей притоков: полезного в оз. Байкал (а) и бокового в Братское водохранилище (б) 1 – исходный ряд; 2 – скользящее 5-летнее среднее; 3 – интегрально-разностная кривая; 4 – норма за весь период; 5 – средние для периодов: 1899–1995, 1996–2013, 2014–2017 гг.

Таблица 1

Общие объемы притока в водохранилища Ангарского каскада ГЭС по маловодным периодам, км³ в год

Периоды	Иркутское	Братское	Усть-Илимское	Богучанское (каскад в целом)
1976–1982 гг.	45,6	74,5	81,6	86,3*
1996–2013 гг.	54,5	86,8	93,7	100,3*
2014–2017 гг.	39,0	64,6	70,4	74,1
за весь период наблюдений	59,5	91,1	99,3	105,3

*расчетные значения

В период 1899–1995 гг. отмечалась положительная корреляция между притоками в оз. Байкал и Братское водохранилище. Для периода 1996–2013 гг. корреляция сменилась на обратную, что проявилось в увеличении среднего притока для Братского водохранилища и незначительном уменьшении притока для оз. Байкал и привело к мягкому маловодью в бассейне Ангары (снижение притока относительно среднелетней нормы на 7–10 %).

В период 2014–2017 гг. резко уменьшились притоки как в оз. Байкал, так и в Братское водохранилище, создав условия экстремального маловодья, самого значительного за весь период наблюдений. Приток воды в Братское, Усть-Илимское и Богучанское водохранилища составил в среднем 65–70 % от нормы, в Иркутское водохранилище (оз. Байкал) – 61–65 % (в 2015 и 2017 гг., приток воды в озеро был рекордно низким за 120 лет наблюдений и имел обеспеченность около 99 %).

Вследствие того, что около 2/3 притока воды в Братское водохранилище обеспечивается расходами Иркутской ГЭС, периоды водности для него в целом совпадают с соответствующими периодами на оз. Байкал, но имеют отличия, особенно внутри периодов, как правило коротких, связанные с изменчивостью бокового притока. На рис. 3 показано сравнение синхронности притоков в оз. Байкал и Братское водохранилище с помощью вейвлет преобразований их временных рядов [2]. Наблюдается частичная синхронность колебаний, при этом в начале 2000-х гг. значительно уменьшилась водность на оз. Байкал по сравнению с боковым притоком в Братское водохранилище, который имел повышенную водность вплоть до 2010 г. Так, период 1988–1995 гг. на Братском водохранилище был многоводный, 1996–2013 гг. средней водности (за исключением двух лет высокой водности бокового притока 2001 и 2006 гг.), а в 2014–2018 гг. маловодный.

2. Уровненный режим оз. Байкал и расходы р. Ангары в условиях экстремального маловодья 2014–2017 гг.

Учитывая наступившее маловодье и снижающийся уровень оз. Байкал, с октября 2014 г. по май 2018 г. были установлены минимальные расходы воды через Иркутскую ГЭС в объеме 1300 (1250) м³/с по условиям обеспечения нормальной работы водозаборов в нижнем бьефе. Такие низкие расходы поддерживались рекордно длительный период – более 40 месяцев подряд. За весь период эксплуатации ГЭС в период 1959–2013 гг. такие низкие расходы были использованы

при режиме работы ГЭС лишь дважды: 1 раз в течение 4-х месяцев – в ноябре, декабре 1979 г.; 2 раз в январе, мае 1980 г. Тем не менее, уровень Байкала последние 4 года не удается удерживать на установленной законодательством под № 234 на минимально допустимой отметке 456,00 м ТО.

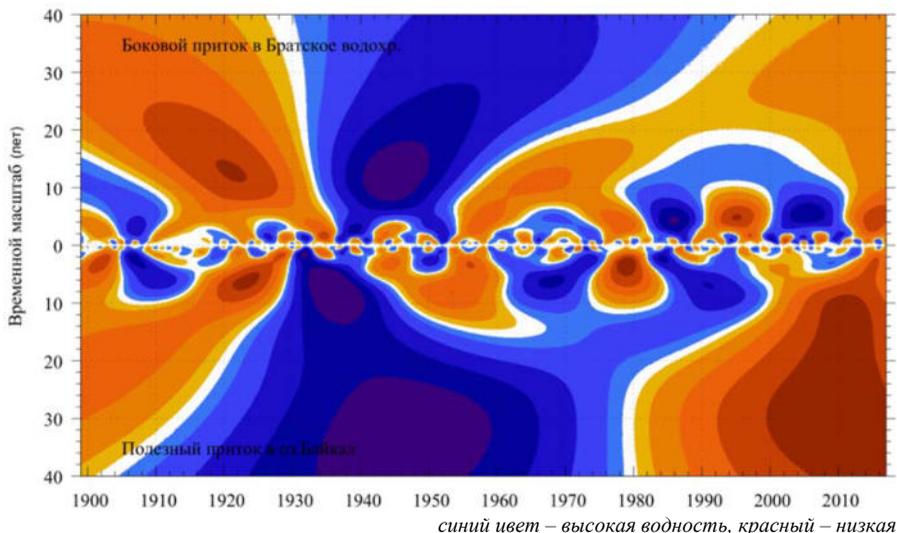


Рис. 3. Сравнение синхронности притоков в оз. Байкал (снизу) и Братское водохранилище (сверху)

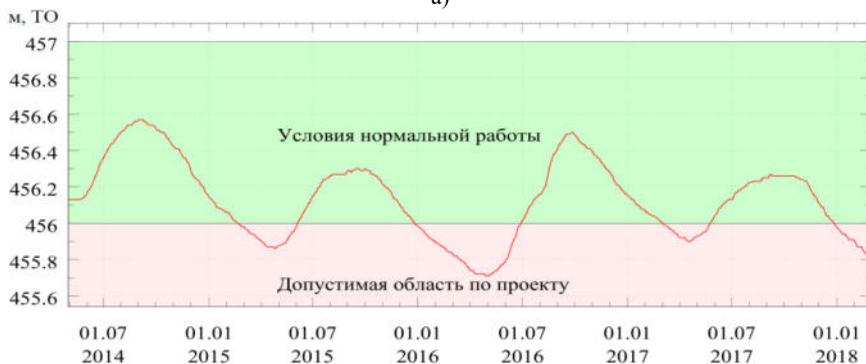
С наступлением критической гидрологической ситуации в качестве решения проблемы были выпущены специальные временные постановления Правительства (№ 97 от 04.02.2015, № 626 от 01.07.2016 и № 1667 от 27.12.2017), приостанавливающих действие постановления № 234 от 26.03.2001 «О предельных значениях уровня воды в озере Байкал при осуществлении хозяйственной или иной деятельности». Аналогичная ситуация складывается и на других ГЭС Ангарского каскада, где расходы близки к минимально допустимым значениям.

В жесткий маловодный период 2014–2017 гг. Иркутская ГЭС работала в условиях неизбежных противоречий – необходимостью поддержания уровня озера выше отметки 456 м ТО (в соответствии с Постановлением № 234) за счёт пониженных расходов через ИГЭС, как следствие – нарушение транспортных требований в летний период и энергетических – в зимний. Прошедший период наглядно показал невозможность выполнения в маловодные и многоводные годы Поста-

новления № 234, а следовательно, действующего на конец 2014 г. законодательства по регулированию водных ресурсов водохранилищ Ангарского каскада ГЭС и, как следствие, позволяющие выполнить требований водопользователей с нормативной надежностью. Однако выполнение законодательства в полном объеме оказалось возможным только в годы нормальной (средней) и близкой к ней водности.

В последние годы, особенно в 2017 г., наполнение Братского водохранилища в летний период не превышало 2–3 м при проектной призме регулирования 10 м. Крупнейшее в России и одно из крупнейших в мире водохранилище, выполняющее функции главного компенсатора энергоотдачи для всех гидроэлектростанций ЕЭС Сибири (Единой энеогетической системы), обеспечивающее наполнение нижележащих водохранилищ (Усть-Илимского и Богучанского) и навигационные расходы на нижней Ангаре и Енисее, в настоящее время практически полностью сработало свои многолетние гидроресурсы.

а)



б)

Рис. 4 Графики уровня оз. Байкал (а) и Братского водохранилища (б) за 2014–2018 гг.

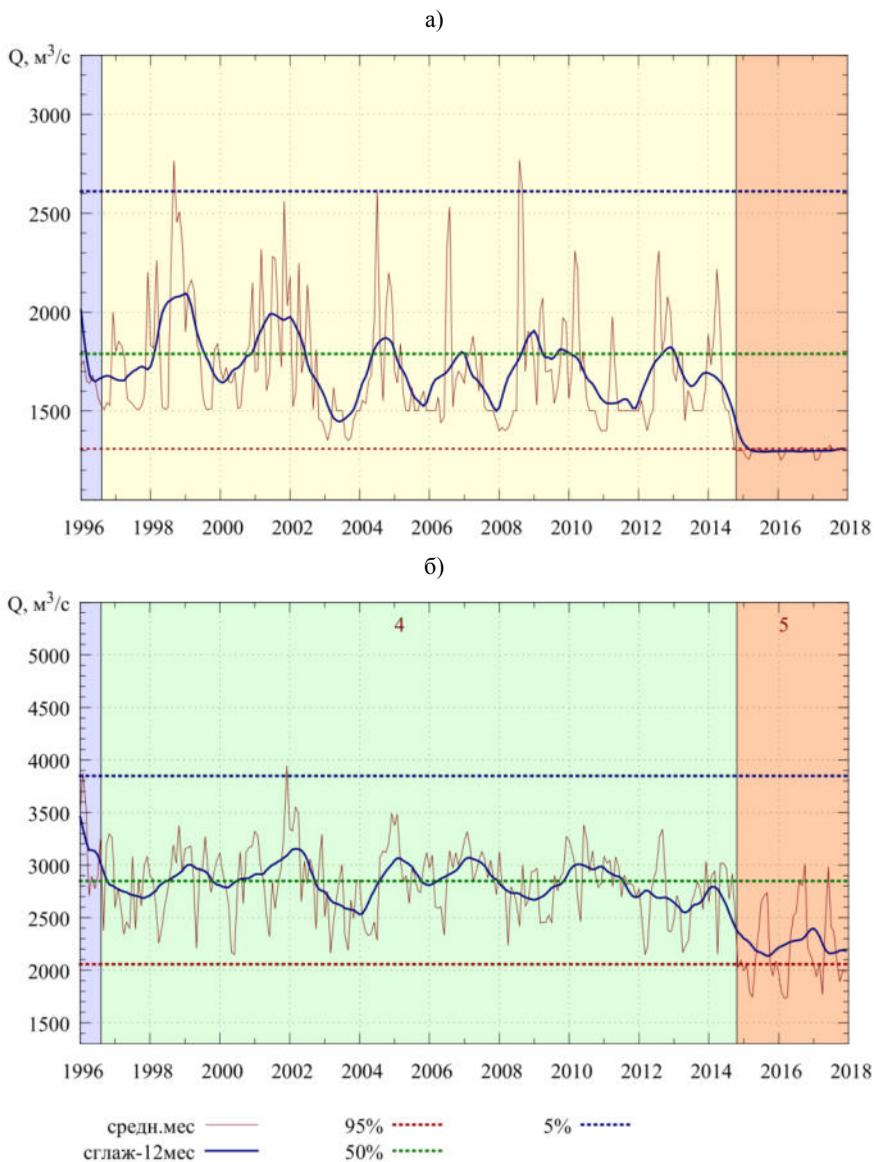


Рис. 5. Динамика среднемесячных расходов с отметками обеспеченностей 5, 50, 95 % для Иркутской (а) и Братской ГЭС (б) с выделением периодов высокой и низкой водности за период 1996–2018 гг.

В целом по Ангарскому каскаду, дефицит водных ресурсов в 2014–2018 гг. привел к сработке многолетних резервов водохранилищ и невозможности выполнения с нормативной надежностью требований водного транспорта (навигационных расходов и уровней) и требований гидроэнергетики (гарантированной, в том числе сниженной гарантированной среднемесячной зимней мощности ГЭС), других требований энергосистемы Сибири, особенно в конце рассматриваемого периода (2017–2018 гг.).

3. Влияние измененияуровенных режимов оз. Байкал и расходов р. Ангары на устойчивость водохозяйственной системы

В результате маловодья, особенно в бассейне р. Ангары существенно снизилась общая надежность и устойчивость работы энергетической и водохозяйственной систем, затруднена нормальная работа водопользователей и водопотребителей в нижнем бьефе Иркутской ГЭС. Имеются проблемы практически у всех участников водохозяйственного комплекса: промышленного и коммунально-бытового водоснабжения, водного транспорта, электроэнергетики, экологии.

В нижнем бьефе Иркутской ГЭС в связи с длительным периодом экстремально низких уровней воды ухудшились санитарно-гигиенические условия (качество воды), состояние экосистемы (в отличие от оз. Байкал, практически не исследуется). Аналогичные проблемы наблюдаются на Братском водохранилище, где резко ухудшается ситуация с водоснабжением в населенных пунктах, находящихся в береговой зоне.

Основным требованием водного транспорта в бассейне р.Ангара является обеспечение в период навигации нормируемых глубин и уровней по всей трассе судового хода как в водохранилищах, так и на незарегулированных участках реки (участках свободного русла), путем поддержания соответствующих расходов воды в контрольных створах опорных гидростов (Богучаны, Татарка, Енисейск). Нарушения навигационных требований отмечались в 2012, 2015, 2017 гг.

Маловодный период отрицательно сказался на эксплуатационной деятельности предприятий водного транспорта на Ангаре. Понижение уровней оз. Байкал, реки Ангары, Иркутского и Братского водохранилищ привело к уменьшению глубин судового хода (на 40–60 см) в истоке Ангары. Население 13-ти поселков на берегу Братского водохранилища лишилось возможности прямого водного сообщения с Иркут-

ском, Усолье-Сибирским и Свирском. Понижение уровня оз. Байкал привело к уменьшению глубин в истоке реки Ангары и невозможности прямого водного сообщения из Иркутска до пунктов на озере Байкал (Ольхон, порт Байкал).

За период 2014–2017 гг. существенно уменьшилась выработка электроэнергии Ангарского каскада ГЭС (на 25–30 %) относительно среднескользящих значений (без Богучанской ГЭС). При разработке новых ПИВР необходимо дополнительно обосновать и уточнить показатель гарантированной среднемесячной зимней мощности Ангаро-Енисейского каскада ГЭС. Возможно, данный показатель должен быть ограничен определенным периодом, соответствующим текущему состоянию и этапу развития энергосистемы.

Заключение

В связи со значительным уменьшением полезного притока в оз. Байкал за последние десятилетия, обеспечивающего водными ресурсами водохранилища Ангарского каскада (около 60 %), необходимо не только исследовать сценарии продолжения низкой водности, но и периодически (не реже одного раза в 5 лет) проводить уточнения всех водноэнергетических расчетов каскада, а также соответствия нормативным показателям обеспеченностей водопользователей и водопотребителей

Моделирование маловодных и многоводных периодов на Ангарском каскаде ГЭС показало невозможность выполнения для них Постановления Правительства № 234 от 2001 г., что требует существенного изменения законодательства по оз. Байкал и водохранилищам каскада.

Список литературы

1. Абасов Н. В., Бережных Т. В., Ветрова В. В. Исследование влияния Арктики на гидроэнергетический потенциал Ангарского каскада ГЭС // Гидрологические последствия изменений климата : тр. Британ.-рос. конф. Новосибирск : Изд-во Новосиб. гос. архитектур.-строит. Ун-та (Сибстрин), 2007. С. 63–72.
2. Абасов Н. В., Ветрова В. В. О применении вейвлет преобразований для анализа геоклиматических данных // Информационные и математические технологии в науке и управлении : тр. XIII Байкал. Всерос. конф. Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2008. Т. 2. С. 60–66.
3. О регулировании уровня режима озера Байкал / Н. В. Абасов, М. В. Болгов, В. М. Никитин, Е. Н. Осипчук // Водн. ресурсы. 2017. Т. 44, № 3. С. 407–416. DOI: 10.7868/S0321059617030026.
4. Изменение летней циркуляции атмосферы над Восточной Азией и формирование длительных маловодных периодов в бассейне реки Селенги / Т. В. Бережных, О. Ю. Марченко, Н. В. Абасов, В. И. Мордвинов // География и природ. ресурсы. 2012. № 3. С. 61–68.

5. Гидроэнергетические проблемы озера Байкал: прошлое и настоящее / В. М. Никитин, В. А. Савельев, Т. В. Бережных, Н. В. Абасов // Регион: экономика и социология. 2015. № 3(87). С. 273–295.
6. Озеро Байкал: риски маловодных и многоводных периодов / В. М. Никитин, Н. В. Абасов, Т. В. Бережных, Е. Н. Осипчук // География и природ. ресурсы. 2016. № 5. С. 29–38.
7. Ангаро-Енисейский каскад ГЭС в условиях изменяющегося климата / В. М. Никитин, Н. В. Абасов, Т. В. Бережных, Е. Н. Осипчук // Энергетическая политика. 2017. Вып. 4. С. 62–71.
8. Основные правила использования водных ресурсов водохранилищ Ангарского каскада ГЭС (Иркутского, Братского и Усть-Илимского). М.: М-во мелиорации и вод. хоз-ва РСФСР, 1988. 64 с.

УДК 378.096

К юбилею кафедры гидрологии и природопользования (прошлое, настоящее)

А. В. Аргучинцева (arg@math.isu.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Приводятся сведения об истории возникновения и развития кафедры гидрологии и природопользования в Иркутском государственном университете, освещаются современные тенденции и проблемы в работе кафедры.

Ключевые слова: кафедра гидрологии и природопользования, юбилей.

Наша конференция приурочена к 55-летию кафедры гидрологии суши – таково было первоначальное название кафедры в период её организации в 1964 г. Однако это не совсем так. Оказывается, ещё в 1937 г. (в рамках геолого-почвенно-географического факультета) была организована кафедра гидрологии, о создании которой нет сведений ни в одном Юбилейном сборнике университета, и лишь архивные документы позволили восстановить этот факт (рис.). Документ подписан директором Восточно-Сибирского государственного университета (так в ту пору назывался Иркутский госуниверситет). Кафедру создал и возглавил Молодых Иван Фёдорович (1898–1939) – доктор географических наук, профессор, известный как большой, неутомимый и очень плодотворный исследователь рек Сибири. По ложному необоснованному доносу в 1937 г. был арестован, а кафедра прекратила своё существование на долгие 27 лет. И. Ф. Молодых умер в иркутской тюрьме в сентябре 1939 г., реабилитирован только в мае 1957 г.

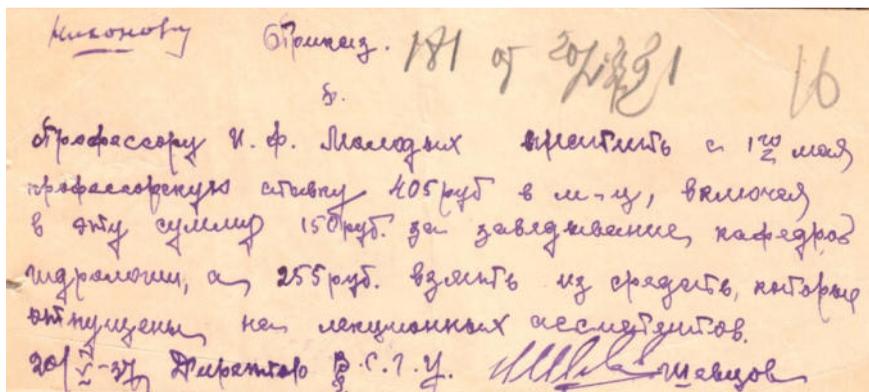


Рис. Подлинный документ из архива Иркутского госуниверситета

В 1964 г. возрождается кафедра гидрологии суши и проводится первый набор на специальность «Инженер-гидролог». Кафедру (1964–1975) возглавил кандидат географических наук, доцент Александр Елизарович Черкасов – выпускник Ленинградского высшего военно-морского училища им. Макарова. Под его руководством подобран штатный состав сотрудников кафедры, создана имитационная гидравлическая лаборатория. Естественно, функции кафедры – готовить не только грамотных специалистов для нужд народного хозяйства, но и давать фундаментальные научные знания. В указанный период сотрудники кафедры совместно со студентами изучали водные ресурсы рек Сибири, Забайкалья, а также гидрологию бассейна оз. Хубсугул.

В течение последующих 12 лет (1975–1986) кафедра работала под руководством кандидата географических наук Крашенинникова Михаила Владимировича, участника Великой Отечественной войны и парада Победы. Сотрудники продолжали тематику изучения режима водных объектов Сибири и бассейна оз. Хубсугул, что было связано непосредственно с выполнением многолетней совместной программы советско-монгольской комплексной Хубсугульской экспедиции, организованной в 1978 г.

С 1986 по 1992 г. кафедру возглавляет доцент, кандидат географических наук Степан Иванович Захарченко. Превалирующие научные исследования – структура и динамика речных стоков горных районов, рассолы в гидрохимическом режиме рек. Много усилий потребовала работа над созданием атласа озера Хубсугул.

Времена шли, сменялись заведующие, изменялись учебные программы, ориентации научных исследований. Кафедра многократно

переименовывалась по объективным и субъективным причинам, но в основе её названия всегда оставалось ключевое слово «гидрология».

Социально-экономические и политические преобразования в России в 90-х гг. привели, к сожалению, к необходимости пересмотра учебных планов специальностей и специализаций. Появилось распоряжение о возможности руководства кафедрой только доктором или профессором. Факультет был вынужден в 1992 г. объединить ряд кафедр, в том числе, и кафедру гидрологии суши с молодой (организованной в 1989 г.) кафедрой охраны природы. Совместная кафедра получила название «Кафедра гидрологии и охраны природы», заведующий – Александр Петрович Хаустов, доктор геолого-минералогических наук, профессор. Теперь выпускающая кафедра ведёт подготовку по специальностям Природопользование и Гидрология (с присвоением квалификации инженер-гидролог). Спектр учебных дисциплин и тематик научных исследований кафедры значительно расширяется: появились работы в области изучения подземного стока, охраны водных ресурсов. В 1994 г. А. П. Хаустов переезжает в Москву (Университет дружбы народов). К этому времени в стране снимается ограничение на заведование кафедрой по учёной степени и учёному званию, и кафедру возглавляет кандидат технических наук, доцент Сергей Николаевич Александренко (с 1994 по 1997 г.). Кафедра получает наименование «Кафедра гидрологии и охраны водных ресурсов».

Курирование подготовкой гидрологов постоянно осуществлял Ленинградский гидрометеорологический институт (ЛГМИ), переименованный в дальнейшем в Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), который для будущих инженеров-гидрологов страны разрабатывал учебные программы, методические указания, основные учебники и учебные пособия. Позднее в стенах Министерства высшего образования было решено, что инженеров-гидрологов университеты не могут готовить, а потому гидрологическое образование в ИГУ перешло под эгиду географического факультета МГУ с последовавшими довольно значительными изменениями учебных программ в сторону их географичности и вычленения приставки «инженер». Хотя в дальнейшем ЛГМИ переименовали в РГГМУ (институт в университет), но положение дел сохранилось.

В качестве позитивного момента, следует отметить получение в 1995 г. лицензии на открытие новых специальностей «Природопользование» и «Геоэкологии», подготовку по которым осуществляет кафедра гидрологии и охраны водных ресурсов. Первый выпуск специа-

листов экологов-природопользователей состоялся в 1999 г. В эти годы впервые стали осуществлять набор студентов на коммерческой основе.

С 1997 г. по настоящее время кафедрой возглавляет Аргучинцева Алла Вячеславовна (сперва кандидат физико-математических наук, доцент, затем – доктор технических наук, профессор). С начала века произошли значительные изменения в высшем образовании. Мы перешли от хорошо отработанной схемы подготовки специалистов к так называемой ступенчатым направлениям: бакалавриат – магистратура – аспирантура, потеряв при этом некоторую целостность в образовании, так как в магистратуру на двухлетний курс обучения разрешено поступать лицам, не имеющим соответствующего бакалаврского образования, что иногда вызывает существенные трудности в общении даже на уровне терминологии. Всё это приводит зачастую к безудержной погоне за «корочкой» (и не одной), но отнюдь не к твердым знаниям. Ситуация усугубляется полной зависимостью преподавателя от контингента бюджетных студентов (чего не было в советские и перестроечные времена), коммерческого наполнения, постоянным возрастанием аудиторной нагрузки и, как следствие, – увеличение количества преподаваемых дисциплин и другой учебной нагрузки на одного преподавателя. К тому же ещё надо выдавать «на-гора» научную продукцию. Тем не менее, сотрудники кафедры довольно успешно справляются с возложенными на них обязанностями. Разработаны эффективные алгоритмы тематического дешифрирования спутниковых измерений для картографирования полей гидрофизических характеристик озера Байкал: ледовой обстановки в периоды становления, нарастания и разрушения льда, детектирования температуры поверхности воды и прозрачности вод озера. Кафедрой разработана авторская методика оценки экологических индикаторов для целей устойчивого развития, сохранения биоразнообразия, поддержания безопасности жизнедеятельности и эффективного управления поселениями. Особая роль в вопросах выявления загрязненных территорий отводится математическому моделированию как теоретико-вероятностному, так и на основе аналитических и численных решений дифференциальных уравнений, описывающих физические процессы в гидро- и атмосфере. С помощью таких моделей решено немало прикладных задач, имеющих практическое значение, причем не только в Иркутской области, но и далеко за её пределами (Монголия, Китай, Омск, Хабаровск, Чита, Гусиноозёрск, Улан-Удэ и др.). Это, например, оценка потенциала рассеивающей способности и накопления (осаждения) загрязняющих веществ, попадающих в атмосферу (выбросы двигателями внутренне-

го сгорания, приподнятыми промышленными и бытовыми источниками, пыление золоотвалов ТЭЦ и карьерных отвалов); в водотоки и водоемы (сброс через затопленные трубы, осаждение атмосферных антропогенных выбросов, скат с сельхозугодий, нерациональное использование вод жителями прилегающих районов); выявление виновников аварийных выбросов, приведших к повышенному обращению жителей в медицинские учреждения и даже летальным исходам; обоснованный запрет строительства одного из горно-обогатительного предприятий; перенос мест скаутских лагерей и некоторых садоводческих участков в экологически безопасные зоны; оптимальный выбор мест размещения постов слежения за загрязнением атмосферного воздуха; оценка акустического воздействия автотранспорта на жителей селитебных районов; необходимость ликвидации конкретного юртового поселка, влияющего на взлетно-посадочные условия аэропорта; выявление придонных тепловых источников в Северном Байкале; картирование территорий по опасности их загрязнения и пр.

Надо отметить, что исследования, причем большая их часть, ведутся из научного интереса, но существуют и такие, которые выполняются по заказу тех или иных структур. По результатам проведенных кафедрой работ получено свыше 40 актов внедрения в практику народного хозяйства, опубликованы статьи, монографии. Кроме того, материалы исследований вошли в различные атласы: «Экологический атлас бассейна озера Байкал», «Экологический атлас Байкальской природной территории», «Атлас Иркутской области: экологические условия развития».

Конечно, большую помощь в сборе необходимого для исследований материалов оказывают наши студенты, магистранты, аспиранты. Для них – это темы производственных практик, курсовых и выпускных работ, тезисов, научных статей, докладов на конференциях, диссертаций, грантов. Теоретические предпосылки и материалы исследований используются в ряде дисциплин учебного процесса, включая учебные и производственные практики.

Так как тематика большинства научных работ связана с охраной природы, то с 2015 г. кафедра называется «Кафедра гидрологии и природопользования».

За последнее десятилетие сотрудниками кафедры гидрологии и природопользования ИГУ защищены четыре кандидатских и одна докторская диссертации; к защите подготовлены ещё одна кандидатская и одна докторская диссертации.

Кафедра гордится своими выпускниками, работающими в производственных, научных и учебных учреждениях. В настоящее время 70 % сотрудников кафедры – это её выпускники. К учебному процессу привлекаются высококвалифицированные работодатели и представители научно-исследовательских институтов СО РАН, как правило, с докторской учёной степенью.

Специалисты-гидрологи востребованы. Специальность в настоящее время довольно редкая, и всего только семь вузов страны готовят классических гидрологов. Спрос велик, заявок приходит гораздо больше, чем выпускников. Но в последние годы произошла резкая переориентация молодёжи на видение своей будущей заработной платы, «тёплой» трудоустройство, превалирует культ лёгкой обеспеченной жизни. Вопрос «А сколько я буду иметь?» – не так уж редко звучит среди абитуриентов и студентов. Выпускники потеряли романтику дальних дорог. Камчатка, Сахалин, Якутск, Салехард, Воркута и пр. с довольно приличными окладами и возможностями самостоятельного принятия решений их в основном не устраивают. Наукой они считают заниматься непрестижно, а в высших учебных заведениях с ассистентским окладом без стажа в 13 тыс. руб. неприемлемо. Среди первокурсников-гидрологов часто оказываются поступившие не по призванию, а по необходимости получения заветной «корочки», так как по конкурсу не прошли на другие направления. И это печальный факт с вытекающими последствиями: нет стремления к глубоким профессиональным знаниям, поверхностное изучение дисциплин, нежелание работать по специальности, большой процент отчисления или «вечных» студентов с затянутыми по различным причинам годами обучения. Может это и хорошо, что выпускников меньше, чем поступивших, так как остаются истинные по призванию. Кстати, подобную ситуацию отмечают и в других родственных вузах. Кафедра тоже испытывает потребность в высококвалифицированных сотрудниках и приливе новых молодёжных сил. Возможно, а главное – надеемся, что ситуация в ближайшее время изменится и не приведёт к тому, что останутся только «старые» гидрологи-практики. Потребность в специалистах-гидрологах, особенно востребованных в инженерных изысканиях, не уменьшается, а возрастает.

Наверное, следует обратить внимание и на имевшую когда-то практику распределения выпускников. Ведь на бюджетное образование каждого молодого человека государство тратит немалые деньги, и жаль, когда это не имеет отдачи. Если выпускник без уважительных причин не работает по специальности или отчислился – пусть вернёт

деньги. С другой стороны, работодатель, получивший выпускника по распределению, всегда заинтересован его удержать, создавая приемлемые условия.

Что ж, хочется надеяться и верить в разумные и оптимальные решения.

Лучшее, конечно, – впереди!

УДК 556.551

Мониторинг гидрохимического режима озёр Восточной Антарктиды за последние 10 лет

К. В. Артамонова (ksusha.vniro@gmail.com)

Л. А. Духова (dukhova@mail.ru)

О. Н. Лукьянова (olukian@mail.ru)

В. В. Масленников (vvmaslen@vniro.ru)

Н. М. Зозуля (hopezoz@mail.ru)

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, г. Москва

Аннотация. Приведены результаты мониторинговых наблюдений гидрохимических характеристик (общей минерализации, концентраций кислорода, биогенных элементов и главных ионов) антарктических пресноводных озёр в районе оазиса Холмы Ларсеманн. Исследования выполнены во время сезонных работ 54–64-й Российских Антарктических экспедиций (РАЭ) за период наблюдений с 2009 по 2019 г. Изучена межгодовая изменчивость в распределении гидрохимических характеристик 10 озёр в летний антарктический период (декабрь–февраль). Приведена классификация всех исследуемых озёр по ионно-катионному составу. Показано, что озера оазиса по соотношению основных ионов относятся к хлоридно-натриевым водоемам III типа и для большинства озер характерны достаточно высокие концентрации растворенного кремния и низкие значения содержания минеральных форм азота и фосфора в исследуемый период. При этом резкое увеличение в содержании как минеральных, так и органических форм азота и фосфора связано с влиянием деятельности антропогенного или природного (жизнедеятельность птиц) характера в конкретный момент времени.

Ключевые слова: озёра, Антарктика, гидрохимические показатели, межгодовая изменчивость.

Введение

Оазис Холмы Ларсеманн (69°23' ю. ш., 76°53' в. д.) представляет собой свободный ото льда участок юго-восточного побережья Залива Прюдс, берег Ингрид Кристенсен, Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида [5]. На территории оазиса расположены сотни

пресноводных озер различных размеров, глубин, флоры и фауны. Подстилающими породами озерных котловин являются по большей части гнейсы. В основном озера летом полностью или частично освобождаются ото льда и, как правило, хорошо перемешиваются стоковыми ветрами в летние месяцы, в зимние месяцы покрыты льдом толщиной в среднем около 2 м [4]. Приледниковые водоемы оазиса или водоемы с большими снежниками и локальными ледниками не всегда успевают за летний период вскрыться ото льда. По питанию озера являются снежниковыми, ледниковыми, атмосферными и грунтовыми (инфильтрационными). Ионный состав озёр определяется составом и происхождением питающих их вод, а также особенностями процессов притока и стока вод. Изменение объема притока и стока в значительной степени влияет на характеристики состава вод и их изменчивость.

Первые научные исследования в этом районе проводились в 30-е гг. прошлого века в экспедициях норвежского исследователя Ларса Кристенсена. Активная научно-хозяйственная деятельность в оазисе началась в середине 1980-х гг., когда появилась российская научная станция «Прогресс», на сегодняшний день являющаяся Центром российских исследований в Антарктике, и продолжается по сегодняшний день. В настоящее время в оазисе находятся три научные станции (российская, австралийская и китайская). Большая часть исследуемых водоемов, расположенных в непосредственной близости от станций, попадают под прямое антропогенное воздействие. Самое изученное озеро Прогресс (Progress) в настоящее время используется как питьевой водоем, расположенный в приледниковой зоне на высоте 65 м над уровнем моря и является самым глубоким в оазисе, максимальная глубина составляет 34 м, а площадь водного зеркала – 158 тыс. км². Глубина большинства других озер оазиса не превышает 9 м [3].

Особый интерес по изучению гидрохимического режима озер оазиса Холмы Ларсеманн представляют работы, выполненные австралийскими исследователями на сезонной станции Лоу, подробное описание которых дано в отчетах Австралийской Национальной Антарктической Научной Экспедиции [6]. На данный момент наблюдения за пресноводными экосистемами оазиса проводятся лишь во время коротких сезонных экспедиций, что не позволяет дать полную информацию о современном состоянии водоемов. Для более детального исследования необходимы постоянные мониторинговые наблюдения. Для оценки сезонной изменчивости данных недостаточно, так как основные работы ведутся только в летний период, с декабря по февраль.

В данной работе представлен обширный материал по гидрохимическим характеристикам десяти озер оазиса Холмы Ларсеманн и по их межгодовой изменчивости в летний период (декабрь – февраль) с 2009 по 2019 г. Следует отметить, что антарктические материковые озера – объект уникальный и малоизученный, при этом часть озер используются в качестве питьевых источников, поэтому изучение их гидрохимических характеристик представляет особый интерес. В тоже время в последние годы идет активное строительство, как на российской, так и на китайской антарктических станциях, сопровождающееся увеличением антропогенной нагрузки на близлежащие озера, в связи с чем представленные результаты многолетней работы исследователей ФГБНУ «ВНИРО» особенно актуальны.

Материалы и методы

В рамках программы гидрохимического мониторинга пресноводных водоемов были проанализированы гидролого-гидрохимические характеристики 10 озер оазиса Холмы Ларсеманн, расположенных в окрестностях российской антарктической станции Прогресс (рис. 1, табл. 1).

База данных включала в себя измерения температуры воды, растворенного кислорода, рН, минерального фосфора, растворенного кремния, нитритного, нитратного и аммонийного азота, органических форм азота и фосфора за летний антарктический период (декабрь – февраль) с 2009 по 2019 г., а также общей минерализации и ионно-катионного состава за декабрь-февраль с 2013 по 2019 г.

Пробы на гидрохимический анализ отбирались в прибрежной зоне, если озера были полностью или частично свободны ото льда. Когда озера были полностью закрыты, отбор проб проводился из нескольких лунок при помощи механического бура.

Обработка проб воды на растворенный кислород и биогенные элементы проводилась в судовой лаборатории в соответствии со стандартными методиками [2]. Пробы на изучение общей минерализации и ионно-катионного состава отбирались, фильтровались и их дальнейший анализ выполнялся в стационарной лаборатории гидрохимии ФГБНУ «ВНИРО» с помощью системы капиллярного электрофореза КАПЕЛЬ-104Т.



Рис. 1. Схема положения озер в районе Оазиса Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида

Таблица 1

Географические координаты исследованных водоемов

Озера	Координаты (широта (ю. ш.), долгота (в. д.))
Степед	69°22'32.81" 76°23'8.94"
Б. питьевое	69°22'36.81" 76°22'40.32"
Зонг Шан	69°22'21.31" 76°21'57.32"
Лоу	69°23'22.25" 76°22'55.58"
Рейд	69°23'12.59" 76°22'35.75"
Скандретт	69°23'22.77" 76°22'21.83"
Сибторп	69°23'48.87" 76°23'30.98"
Прогресс	69°24'4.52" 76°23'15.62"
Дискашн	69°23'21.04" 76°21'3.05"
Ледниковое	69°24'44" 76°24'10"

Результаты и обсуждения

Температура воды, рН, растворенный кислород

Исследуемые водоемы оазиса, за исключением озера Прогресс, неглубокие, от 1,5 до 9 м. В летний период при отсутствии ледяного покрова могут значительно прогреваться. В многолетнем распределении летних температур воды прослеживается прямая зависимость от локальных климатических условий в конкретный период времени. Если за летний период озера не успевают вскрыться ото льда, то температура воды в них около нуля на поверхности и увеличивается с глубиной. Так, в самом глубоком озере Прогресс подо льдом толщиной около 1 м, температура воды на поверхности была около 0 °, на глубине 2 м уже составляла 4,9 °С и оставалась постоянной во всем десятиметровом слое, а затем до дна наблюдалось небольшое ее увеличение до 5,2 °С. Если же в исследуемый период озера частично или полностью открыты ото льда, то особенно мелкие водоемы могут прогреваться до 10–17 °С. При этом с 2009 г. можно отметить положительный тренд в изменении температуры воды. По концентрации ионов водорода большинство водоемов оазиса имеют нейтральную или слабощелочную среду. Значения рН изменяются в пределах от 7,1 до 8,8 и в ряде случаев повышаются в крупных озерах (табл. 2). По концентрации растворенного кислорода все исследуемые озера можно отнести к хорошо аэрированным водоемам, при этом содержание кислорода за период наблюдений с 2009 по 2019 г. изменялось в широких пределах от 4–5 мл/л при закрытом режиме до 10–11 мл/л, когда водоемы были полностью открыты. По насыщению воды кислородом, которое варьирует от 44 до 120 %, и главным образом зависит от температуры воды и локальных климатических условий в период отбора, исследуемые водоемы можно отнести к I классу по качеству воды.

Общая минерализация и ионно-катионный состав

Воды антарктических озера оазиса Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида) характеризуются малой минерализацией, значения которой варьировало в летние сезоны 2013–2018 гг. от 9,5 до 901,0 мг/л, проявляя значительную межгодовую изменчивость. Наименее минерализованное за счет пополнения ледниковой водой озеро Ледниковое (9,5–175,0 мг/л) расположено в ледниковой зоне и не всегда успевает за летний период вскрыться ото льда (рис. 1). Повышенные значения общей минерализации характерны для озера Степед и Рейд (175–901 мг/л), вода в которых значительно прогревалась на мелководье в летний сезон 2016–2017 гг. Возможно, в озера периодически происходит заток морской воды. Наименьшая межгодовая изменчивость содержания главных ионов (65,0–86,6 мг/л) отмечена для озера Скандретт, имеющего сток в залив Нелла-Фьорд.

Таблица 2

Интервалы изменений гидрохимических показателей вод озер оазиса Холмы Ларсеманн в летний сезон 2013–2018 гг.

Озера	Т°С	рН	О ₂ мл/л	О ₂ %	Концентрация, мМ							
					N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N _{орг}	Si-SiO ₃ ²⁻	P-PO ₄ ³⁻	P _{орг}	Fe общее
Прогресс	0,01–9,90	8,75–8,77	4,89–9,83	68–115	0,15–3,73	0,00–0,27	0,03–6,64	6,30–46,88	5,46–32,22	0,01–0,33	0,02–0,54	0,9–91,9
Степед	0,15–17,80	7,58–7,66	7,88–9,46	98–121	0,34–31,80	0,01–0,18	0,0–4,52	15,48–49,04	8,53–24,86	0,01–0,30	0,04–0,52	36,7–163,6
Рэйд	0,70–8,60	8,17–8,78	4,43–9,56	44–111	0,55–6,60	0,00–0,12	0,00–0,88	10,83–56,99	0,52–21,86	0,00–0,20	0,06–0,35	73,9
Зонг Шан	0,04–15,00	6,8	7,76–8,98	95–115	0,50–3,96	0,00–0,68	0,03–13,26	8,50–44,32	7,17–20,67	0,05–1,30	0,13–1,04	55,0–88,9
Скандретт	0,00–9,50	7,53–7,61	5,87–9,68	59–113	0,07–3,14	0,00–0,10	0,00–7,24	3,66–52,53	3,49–49,90	0,00–0,22	0,00–1,72	11,5
Дискашн	5,20–12,7	7,05–8,20	7,97–11,67	109–134	0,20–2,25	0,00–0,05	0,14–4,25	6,13–27,65	9,28–21,30	0,00–0,10	0,04–0,33	
Сибторп	1,40–8,20	7,88–8,43	8,69–9,56	103–105	0,08–1,59	0,00–0,29	0,00–2,14	3,99–21,63	16,70–35,80	0,00–0,86	0,05–0,97	97,3–234,1
Б. питьевое	4,40–9,90	7,12–7,37	7,13–9,31	96–108	0,43–29,73	0,01–0,48	0,00–10,38	15,42–37,20	5,30–33,59	0,01–0,72	0,00–0,27	222,1
Лоу	1,30–11,3	8,20–8,23	7,20–9,69	73–112	0,34–5,12	0,00–0,09	0,00–2,16	10,85–56,98	3,96–16,02	0,00–0,08	0,03–0,28	104,8
Ледниковое	0,80–1,20	7,1	8,65–11,74	88–127	1,02–7,92	0,01–2,31	0,25–67,85	2,48–48,70	1,53–16,38	0,04–0,77	0,00–0,59	

Исследованные озера по соотношению основных ионов главным образом относятся к хлоридно-натриевым водоемам III типа. Источники поступления главных ионов (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^{2-} , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+) в исследованные озера определяют ионный состав воды. Получено, что соотношение между содержанием главных ионов в водах исследуемых озер приближено к соотношению концентраций ионов в морской воде (табл. 3). Количественное соотношение концентраций главных ионов в морской воде не зависит от солености [1]. Осредненные за летние сезоны 2013–2018 гг. значения концентраций основных ионов для озера Скандретт приведены на рис. 2.

Таблица 3

Интервалы изменений состава главных ионов вод озер оазиса Холмы Ларсеманн в летний сезон 2013–2018 гг.

Озера	Доля иона в 1 л воды в % мг-экв					
	Cl^-	SO_4^{2-}	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
Прогресс	40,3–46,0	3,3–5,6	0,8–1,0	35,7–38,6	2,6–4,8	8,0–9,6
Степед	34,6–43,8	4,5–7,1	0,4–1,0	37,1–39,9	1,9–5,1	6,8–8,2
Рейд	42,3–47,2	1,9–3,8	0,4–1,0	39,8–40,4	1,4–2,9	6,5–8,8
Зонг Шан	39,1–40,0	5,1–6,6	0,8–0,9	36,5–36,8	4,3–5,5	7,2–8,3
Скандретт	32,4–44,9	3,1–5,3	0,6–0,9	36,5–40,5	2,4–4,8	4,4–8,6
Дискашен	37,1–43,3	6,5–8,1	0,7–0,9	35,9–39,5	2,3–5,8	6,6–8,0
Сиппторп	33,8–45,5	3,5–6,7	0,8–1,5	29,9–39,4	2,4–11,6	7,2–9,1
Б. питьевое	49,4–49,5	8,5–8,9	0,7–0,9	37,9–37,9	2,5–2,7	8,6–8,9
Лоу	43,8–45,5	2,1–2,8	0,6–0,8	37,6–38,3	2,0–3,6	8,1–9,3
Ледниковое	37,2–41,8	5,0–10,6	0,8–1,0	31,1–40,5	2,2–11,3	6,3–8,9

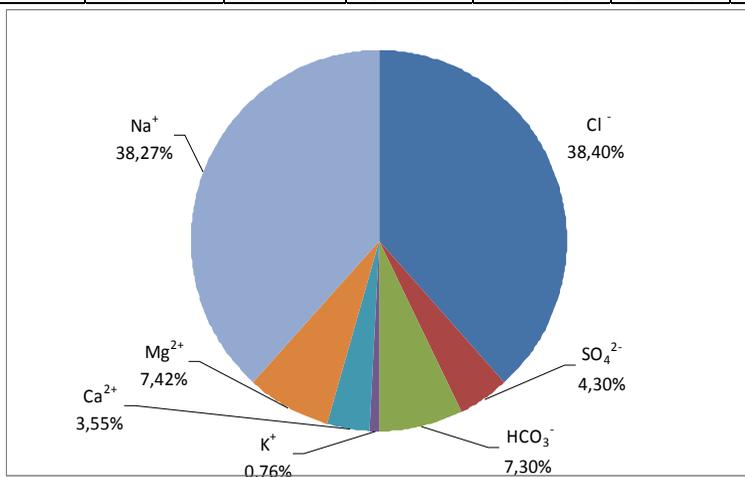


Рис. 2. Осредненные за летние сезоны 2013–2018 гг. концентрации главных ионов для озера Скандретт

Полученные результаты показывают, что наиболее вероятным механизмом поступления главных ионов в озера оазиса Холмы Ларсеманн является принос солей с морской поверхности ветром. Наблюдаемые некоторые отклонения от соотношения ионов для морской воды могут объясняться и другими явлениями, такими как поступление главных ионов в озера при растворении пород в районе водосбора или при таянии накопленного в зимний период снега, а также антропогенная деятельность на территории водосбора.

Изменчивость биогенных элементов

Анализ полученных результатов показал, что концентрации биогенных элементов в озерах изменялись в широком диапазоне, в зависимости от их местоположения, ледового покрова, природной (колонии птиц) и антропогенной нагрузки. Однако для большинства озер характерны низкие значения содержания фосфатов (PO_4), нитритов (NO_2) и нитратов (NO_3) и более высокое содержание силикатов (SiO_2), что типично для водоемов полярных районов.

В исследуемый период с 2009 по 2019 г. отмечался широкий диапазон концентраций в распределении растворенного кремния в разных озерах (от 0,5 до 49,9 μM). При средних его концентрациях для всех исследуемых водоемов от 15 до 30 μM , можно выделить озера с пониженным содержанием растворенного кремния (менее 15 μM), со средним (15–20 μM) и повышенным (более 20 μM). К первой группе озер можно отнести главным образом Ледниковое, а также Лоу и Рейд. Ко второй группе озер относятся большинство исследуемых водоемов, а к третьей – озеро Сибторп. При этом в каждом из исследуемых водоемов наблюдается большая межгодовая изменчивость, когда концентрации растворенного кремния уменьшались практически до нулевых значений, а в некоторые годы превышали 50 μM . Такая изменчивость определяется особенностями условий на водосборах озер, интенсивностью снеготаяния и притока ледниковых вод.

Все исследованные водоемы содержат незначительное количество минерального фосфора, его концентрации в большинстве озёр за летний антарктический период с 2009 по 2019 г. не превышали 0,3 μM . Наиболее обеднены по содержанию фосфатов были озера Дискашн (от 0 до 0,1 μM), Лоу и Рейд (от 0 до 0,2 μM). При этом наблюдались и достаточно высокие значения минерального фосфора (0,7–1,3 μM) на озерах Б. Питьевое и Зонг Шан, расположенных в непосредственной близости от антарктических станций Прогресс и Чжаньшунь. Такое резкое увеличение фосфатов по сравнению с фоновыми низкими величинами может быть связано с антропогенным воз-

действием со стороны станций. Кроме того, на некоторых озерах, находящихся вдали от станций, также наблюдались достаточно высокие концентрации минерального фосфора (0,7–0,9 μM), что связано с жизнедеятельностью поморников, которые активно осваивают свободные ото льда акватории водоемов. Осредненные концентрации органического фосфора для всех озер за исследуемый период были выше минерального и изменялись в пределах от 0,02 до 0,54 μM . В многолетнем распределении отмечается зависимость концентраций органического и минерального фосфора, от жизнедеятельности птиц. Так, на озере Скандретт, в период, когда оно полностью было свободно ото льда, а вдоль его берегов наблюдались скопления поморников, содержание органического фосфора было максимальным и составляло 1,72 μM .

Аналогичные закономерности распределения минеральных и органических форм фосфора прослеживались и в характере распределения минеральных и органических форм азота. В большинстве исследуемых озер с 2009 по 2019 г. отмечалось пониженное содержание нитритов (от нулевых значений до 0,3 μM). Также можно отметить достаточно широкий диапазон изменчивости нитратов (от нулевых значений до 67,8 μM), аммония (от 0,07 до 29,7 μM) и органического азота (от 4 до 86 μM). Содержание нитратов более 10 μM , аммонийного азота более 1–4 μM , органического азота более 20 μM свидетельствуют о наличии антропогенного или природного (жизнедеятельность птиц) воздействия в данный момент времени.

Заключение

Антарктические материковые озера – объект уникальный и малоизученный. Впервые на протяжении 10 лет выполнялся постоянный мониторинг гидрохимического режима озер оазиса Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида), в результате которого получена новая информация об межгодовой изменчивости и факторах формирования химического состава вод исследованных озер.

Характер межгодовой изменчивости химического состава вод за период наблюдений с 2009 по 2019 г. для большинства озер схож и определяется особенностями притока и стока вод для каждого озера, а также изменением интенсивности этих процессов.

Показано, что соотношение главных ионов в озерах приближено к соотношению главных ионов для морской воды и не зависит от общей минерализации озер. Максимальная общая минерализация озер наблюдалась в период наибольшего прогрева воды (2016–2017 гг.).

Полученные результаты свидетельствуют, что наиболее вероятным механизмом поступления главных ионов в озера оазиса Холмы Ларсеманн является принос солей с морской поверхности ветром. Наблюдаемые некоторые отклонения от соотношения ионов для морской воды могут объясняться и другими явлениями, такими как поступление главных ионов в озера при растворении пород в районе водосбора или при таянии накопленного в зимний период снега, а также антропогенная деятельность на территории водосбора.

Анализ полученных результатов в летний период с 2009 по 2019 г. показал, что концентрации биогенных элементов в озерах изменялись в широком диапазоне, в зависимости от их местоположения, ледового покрова, природной (колонии птиц) и антропогенной нагрузки. При этом для большинства озер характерны низкие значения содержания фосфатов, нитритов и нитратов и достаточно высокое содержание силикатов. Повышенное содержание аммония и органических форм азота и фосфора свидетельствует о влиянии деятельности антропогенного или природного (жизнедеятельность птиц) характера в конкретный момент времени.

Авторы выражают огромную благодарность всем коллегам, участвующим в отборе и анализе проб из антарктических озёр: И. А. Гангнусу, В. Л. Зубаревичу, Н. И. Торгуновой, Е. А. Серебренниковой, К. В. Кодряну, О. В. Котовой, Д. А. Широкову, С. В. Кашину и В. Л. Кузнецову

Список литературы

1. Алевкин О. А., Ляхин Ю. И. Химия океана. Л. : Гидрометиздат, 1984. 344 с.
2. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод. М. : Изд. ВНИРО, 2003. 202 с.
3. Федорова И. В. Состояние и устойчивость к воздействию внутренних водоемов Антарктиды : дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2003.
4. Evidence for a lacustrine faunal refuge in the Larsemann Hills, East Antarctica, during the Last Glacial Maximum / L. Cromer, J. A. E. Gibson, K. M. Swadling, D. A. Hodgson // Journal of Biogeography. 2006. Vol. 33. P. 1314–1323.
5. Encyclopedia of Antarctica and the Southern Oceans // Polar Research Institute England. 2002.
6. The freshwater lakes of the Larsemann Hills, East Antarctica: chemical characteristics of the water column / M. Gasparon, R. Lanyon, J. S. Burgess, I. A. Sigurdsson. 2002. Anare report 147. Australian Antarctic Division.

УДК 621.315.612

Разработка акустико-эмиссионной системы для контроля образования трещин в бетонных конструкциях гидротехнических сооружений

У. Т. Ашрапов (ashrapov@inp.uz)¹

Г. Р. Алимов (gleb@inp.uz)¹

К. Д. Салямова (klara_51@mail.ru)²

А. Г. Естифеева (estifeeva_ag@mail.ru)³

¹ *Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент*

² *Институт механики и сейсмостойкости сооружений Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент*

³ *АО «Гидропроект», г. Ташкент*

Аннотация. Приведены результаты научных исследований по разработке, изготовлению, градуировки и испытанию четырехканальной акустико-эмиссионной (АЭ) системы для неразрушающего контроля бетонных конструкций гидротехнических сооружений.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, бетонная конструкция, развивающаяся трещина, пьезокерамика, пьезодатчик акустической эмиссии, модуль счетчиков, системный блок, сбор и анализ АЭ данных.

В Узбекистане эксплуатируются свыше 60 гидротехнических сооружений (ГТС), из них более половины построены 60–70 лет тому назад. С течением времени основная часть элементов ГТС изнашивается и требуют пристального внимания, поэтому возникает острая необходимость их комплексного мониторинга безопасного состояния ГТС гидроэлектростанций, опирающегося на обработку и анализ данных натурных наблюдений за состоянием ГТС, результатов проводимых научно-исследовательских работ, в свете международных требований. Обеспечение безопасной и надежной работы гидротехнических сооружений является важнейшей задачей, направленной на обеспечение экономической, социальной и экологической безопасности в глобальном масштабе. В этой связи приобретает актуальное значение представленные результаты научных исследований по разработке метода и прибора по автоматизированному мониторингу их состояния.

Акустико-эмиссионный (АЭ) метод является высокочувствительным методом неразрушающего контроля для определения трещин в бетонных конструкциях [1; 2].

В бетонном объекте гидротехнического сооружения источниками АЭ импульсов являются локальные области, в которых происходит

динамическая перестройка структуры материала в виде пластической деформации, фазовых превращений, роста трещин, различных видов физико-химических процессов.

Целью работы является разработка, изготовление, градуировка и испытание АЭ системы для определения трехмерных координат развивающихся дефектов и трещин в бетонных конструкциях гидротехнических сооружений.

В Институте ядерной физики АН РУз были проведены исследования по разработке и изготовлению опытной четырех канальной АЭ системы для определения трещин в бетонных конструкциях гидротехнических сооружений.

Для регистрации упругих импульсных АЭ сигналов, возникающих в объекте контроля гидротехнического сооружения при образовании трещины была разработана и изготовлена четырехканальная АЭ система, которая содержит: 4 пьезодатчика акустической эмиссии (ПАЭ), системный блок, состоящий из компьютера, клавиатуры, монитора и модуля счетчиков СЧМ-32 и программного обеспечения для сбора и обработки АЭ данных (рис.1).

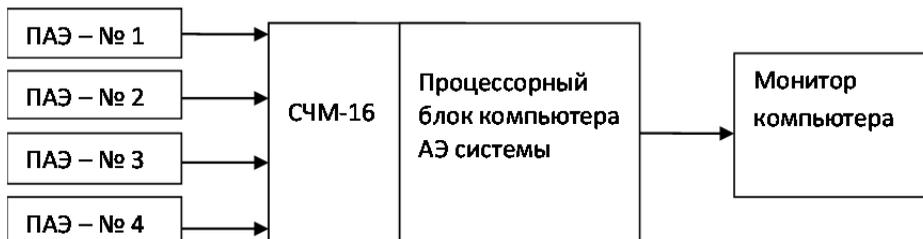


Рис. 1. Функциональная схема АЭ системы: ПАЭ (пьезодатчики) № 1, 2, 3, 4, процессорный блок с модулем счетчиков СЧМ-16, монитор компьютера

В ПАЭ в качестве чувствительного элемента использовали пьезо-керамический элемент ЦТС-19 в форме диска [3]. Основные физические характеристики пьезокерамики ЦТС-19 полученные экспериментальным путем по методике, описанной в работе [4] приведены в табл. 1.

Экспериментальным путем было определено, что наиболее целесообразно использование пьезокерамики типа ЦТС-19 в форме диска с размерами $\varnothing = 16$ мм, $h = 8$ мм, который обеспечивает резонансный режим работы ПАЭ АЭ системы с увеличением амплитуды АЭ сигналов при наиболее высокой чувствительности ПАЭ $1,0 \cdot 10^{-3}$ В/Н (рис. 2).

Таблица 1

Основные физические характеристики пьезокерамики типа ЦТС-19

Физические характеристики пьезокерамики типа ЦТС-19	Значения
Частотная постоянная k_{h2} , кГц·мм	1650
Плотность, 10^3 кг/м ³	7,40
Пьезомодуль, 10^{-12} Кл/Н: d_{33} , d_{31}	250, 120
Диэлектрическая проницаемость ϵ_{33} , 10^{-11} ф/м	1551
Коэффициент электромеханической связи k_{33}	0,4
Пьезоконстанта e_{33} , Кл/м ²	16
Пьезоконстанта деформации h_{33} , 10^9 В/м	12
Модуль Юнга E' , 10^{11} Па	0,7
Коэффициент Пуассона	0,33

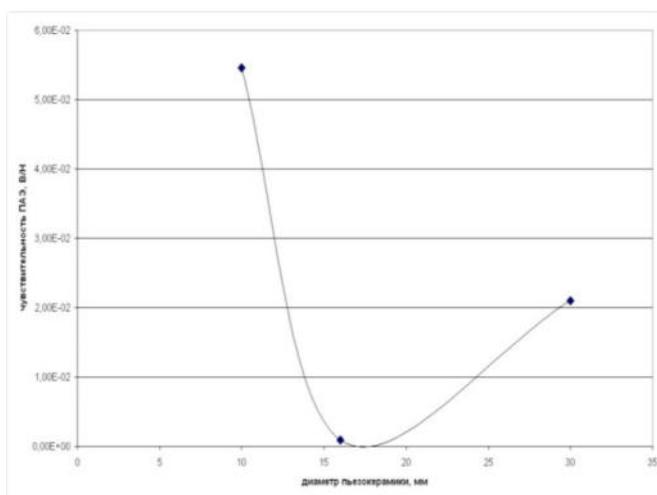


Рис. 2. Зависимость чувствительности ПАЭ от диаметра пьезокерамики ЦТС-19

Конструкционная схема ПАЭ показана на рис. 3, где ПАЭ крепится к объекту бетонной конструкции путем просверливания углубления и закрепления звукопровода на поверхности исследуемой бетонной конструкции гидротехнического сооружения.

Предварительный усилитель АЭ сигналов размещается непосредственно в корпусе ПАЭ выполненный на микросхеме КР544УД2. В ПАЭ усиленный АЭ сигнал по напряжению пропускается через фильтр, имеющий полосу пропускания от 45 до 300 кГц, и дополнительно усиливается с помощью усилителя, собранного на микросхеме типа КР544УД2. С выхода усилителя АЭ сигнал подается на вход дискриминатора, выполненного на микросхеме КР544СА3 (рис. 4).

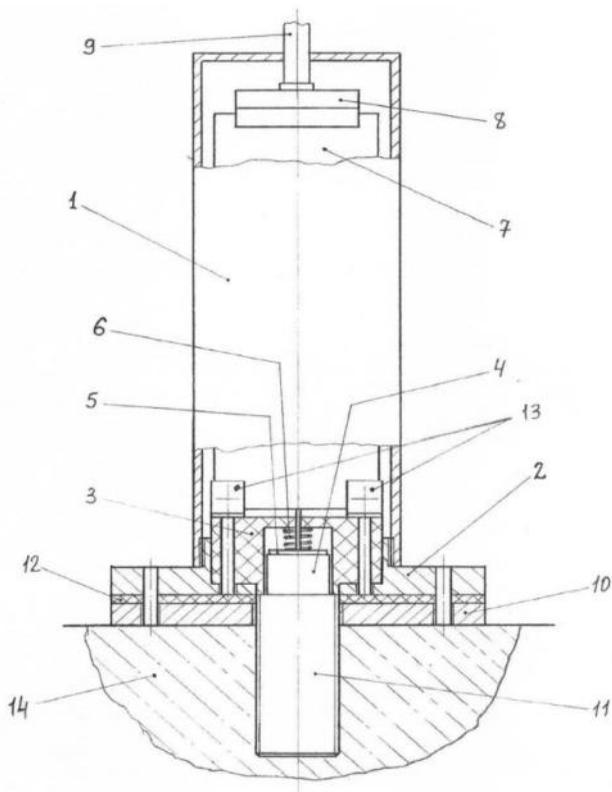


Рис. 3. Конструкционная схема ПАЭ,

где 1 – корпус, 2 – основание, 3 – фторопластовая электроизоляционная втулка, 4 – пьезоэлемент, 5 – диск токопроводящего стержня, 7 – плата электронной схемы усилителя, дискриминатора и формирователя АЭ импульсов, 8 – разъем, 9 – коаксиальная кабель, 10 – установочный фланец крепежного элемента ($\varnothing=65$ мм), 11 – резьбовая шпилька крепежного элемента (звукопровод цилиндрической формы $\varnothing=20$ мм, $L=50$ мм), 12 – резиновая прокладка, 13 – уголки с крепежными шурупами, 14 – бетонная конструкция гидротехнического сооружения

Дискриминатор нижнего уровня имеет регулируемый порог и отсекает шумы предусилителя, а также преобразует синусоидальный сигнал в импульсный. В ПАЭ формирователь импульсов обеспечивает формирование выходных импульсов с длительностью 2 мсек.

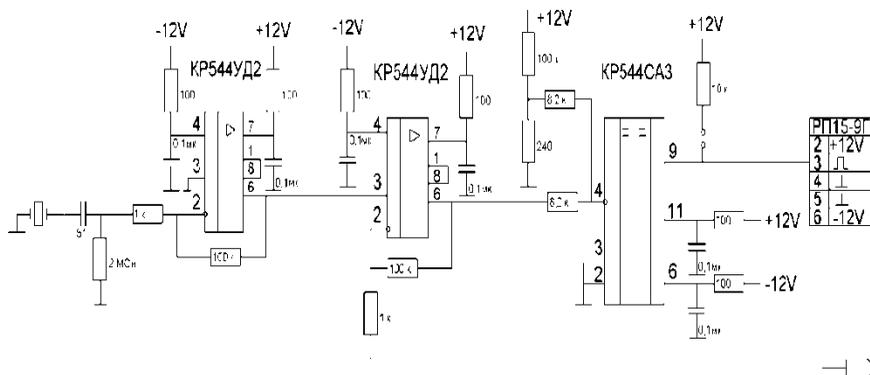


Рис. 4. Конструкционная схема предварительного усилителя ПАЭ

Усилитель и дискриминатор смонтированы на печатной плате, который размещен непосредственно внутри корпуса пьезодатчика. Электрическое питание (± 12 В) предварительного усилителя с дискриминатором осуществляется от отдельного блока питания. Выходной сигнал с пьезодатчика передается через блок преобразования в компьютер.

Рабочую частоту ПАЭ выбирали, исходя из условий шумов и затухания АЭ сигнала в исследуемом бетонном объекте гидротехнического сооружения. Коэффициент электроакустического преобразования ПАЭ не изменяется более чем на 3 дБ в измеряемом диапазоне температур. Разброс коэффициентов преобразования ПАЭ для партии пьезопреобразователей ЦТС-19, не превышает 3 дБ. ПАЭ соединяется с АЭ-системой с максимальной длиной коаксиального кабеля (150 м), а потери АЭ-сигнала в кабеле не превышают 1 дБ на 30 м длины кабеля при электрической емкости не превышающий 30 пФ/м.

Для подавления мешающих акустических помех использовали регистрацию сигналов по амплитудному анализу, который позволяет легко подавить (срезать) ложные сигналы дискриминатором, объединенным с предварительным усилителем. Поскольку окружающий шум ограничен сверху частотами порядка 50–100 кГц [5], то устранение низкочастотных составляющих позволило существенно ограничить прохождение на регистратор ложных сигналов, связанных с шумами. С распространением на расстояние сильно уменьшается высокочастотная составляющая АЭ сигнала. Эта ситуация была учтена нами при выборе полосы пропускания предварительного усилителя, т. е.

она была выбрана в интервале частот от 100 кГц до 500 кГц. В АЭ системе повышали входное сопротивление усилителя до значения 2 МОм, при этом шунтированием пьезокерамики входной цепью усилителя можно было пренебречь, а среднеквадратические значения уровня шума, приведенного к входу предварительного усилителя, при полосе пропускания в сотни килогерц была порядка единиц микровольт. Уровень дискриминации имеет значение 10 мВ и определяется соотношением выходных сопротивлений 100 кОм и 100 Ом.

Таким образом, усилитель двухкаскадный имеет полосу пропускания от 100 кГц до 300 кГц с коэффициентом усиления 58 дБ. Дискриминатор имеет регулируемый уровень дискриминации 1–200 мВ.

Технические характеристики усилителя ПАЭ показаны в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики предусилителя ПАЭ

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1.	Коэффициент усиления	58 дБ
2.	Полосовой фильтр	45–300 кГц
3.	Напряжение питания	±12 В
4.	Потребляемый ток	+40 мА
5.	Неравномерность АЧХ в пределах частотного диапазона, не более	±3 дБ
6.	Ослабление сигнала за пределами рабочего диапазона при расстройке на октаву относительно граничных частот, не менее	30 дБ
7.	Эффективное значение напряжения собственных шумов приведенное ко входу, не более	5 мкВ

На рисунке 5 показан амплитудно-частотная характеристика предусилителя № 1 ПАЭ с полосой пропускания 95–125 кГц.

На рисунке 6 показан общий вид опытного образца АЭ системы с двумя ПАЭ, который имеет процессорный блок с промышленным компьютером (РЕАК 602VL, NEXCOM, Тайвань) и монитор компьютера с изображением АЭ спектра трещинообразования в режиме реального времени.

Для градуировки ПАЭ использовали медицинские песочные часы по методике, описанной в работе [5]. При градуировке ПАЭ в результате взаимодействия струи песка с поверхностью звукопровода изготовленного из алюминиевого сплава Д16, с размерами (1,5×10×300) мм возникал поток акустических сигналов, т. е. удары отдельных песчинок давали элементарные акустические сигналы, поток которых при достаточном их количестве приводил к стационарному случайному процессу, уровень которого измеряли ПАЭ.

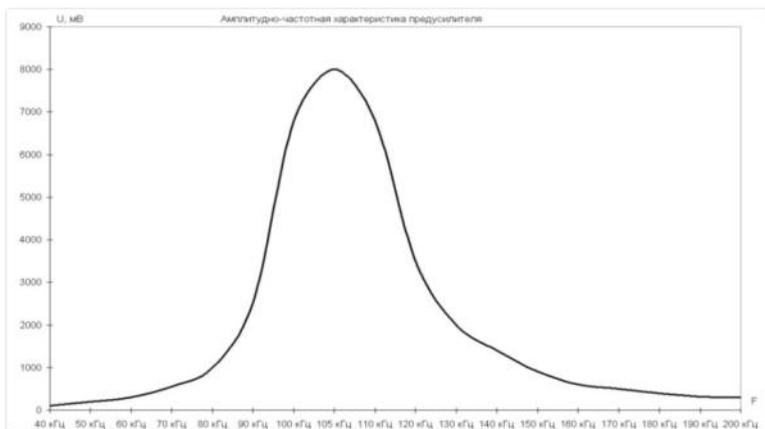


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика предусилителя № 1 ПАЭ

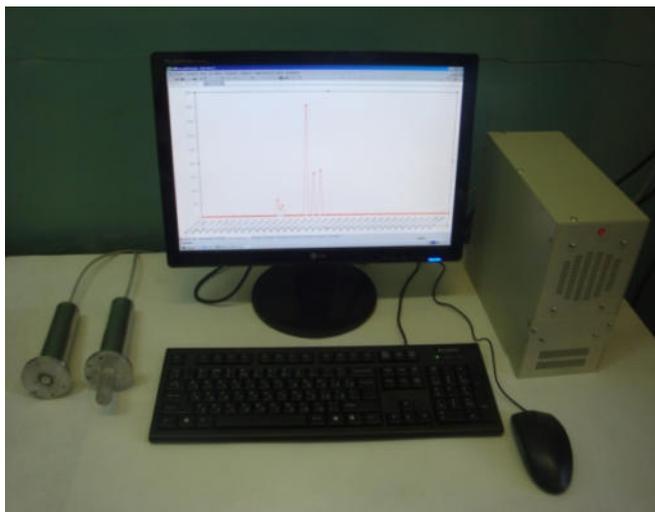


Рис. 6. АЭ система с двумя ПАЭ

Лабораторный стенд для градуировки ПАЭ АЭ системы показан на рис. 8.

ПАЭ АЭ системы градуировали в полосе частот от 45 кГц до 75 кГц и от 95 кГц до 125 кГц, в этих же диапазонах частот определяли чувствительность ПАЭ. В диапазоне частот от 95 кГц до 125 кГц чувствительность ПАЭ составляла $1,0 \times 10^{-3}$ В/Н, в диапазоне частот от 45 кГц до 75 кГц чувствительность ПАЭ составляла $2,1 \times 10^{-3}$ В/Н.



Рис. 8. Лабораторный стенд для градуировки ПАЭ

Большинство известных методов калибровки АЭ системы либо технически трудно реализуемы, либо не дают желаемых результатов, поэтому для градуировки АЭ системы нами предложено использование образцов гамма облученного монокристаллического кремния. В работах [6; 7] описано, что в монокристаллическом кремнии при гамма-облучении формируется ячеистая микроструктура, которая в интервале дозы 10^6 – 10^9 Рад становится нестабильной, и после прекращения гамма-облучения определенное время излучает АЭ волны.

Для градуировки АЭ системы были использованы образцы монокристаллического кремния в форме призматических стержней размерами $(1,0 \times 3,0 \times 35)$ мм и $(1,2 \times 4,1 \times 28,7)$ мм, которые облучали на гамма установке ИЯФ АН РУз с источником ионизирующего излучения ГИК-7-4 Со-60 при поглощенных дозах $\geq 1 \cdot 10^8$ Рад. Затем образцы кремния гамма-облученные фиксировали на пьезоэлементе ПАЭ АЭ системы и измеряли АЭ спектры.

На рисунке 9 показан АЭ спектр гамма-облученного образца монокристаллического кремния дозой $\geq 1 \cdot 10^8$ Рад.

Исследование по детектированию АЭ сигналов трещинообразования проводили на бетонных блоках размерами $(380 \times 130 \times 50)$ мм. Каждый бетонный блок содержал три отверстия с диаметром $\varnothing=40$ мм, расположенные на одной половине бетонного блока, а на второй половине бетонного блока были установлены ПАЭ.

Для создания источника АЭ в бетонном блоке использовали сухие деревянные бруски ($\varnothing=40$ мм, $h=55$ мм), которые плотно фиксировали в отверстия бетонного блока и погружали в воду. Впитывание влаги сухими деревянными брусками приводило к процессу набухания деревянных брусков, и вследствие этого к деформированию бе-

тонного блока, сопровождавшееся трещинообразованием с возникновением АЭ сигналов (рис. 10).

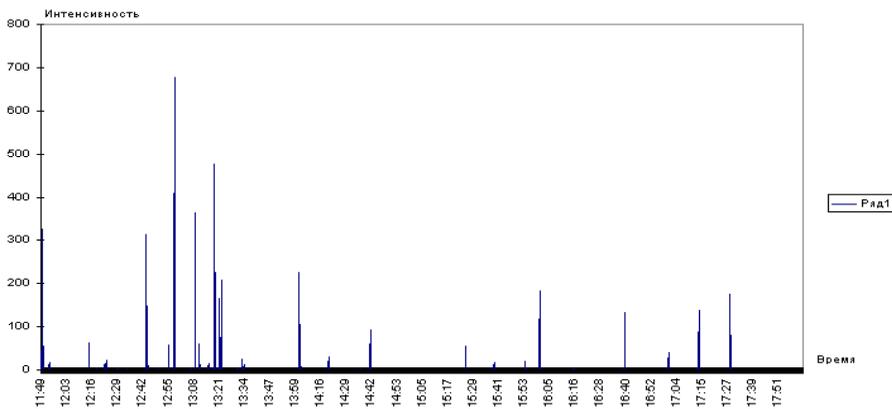


Рис. 9. АЭ спектр образца кремния гамма-облученного дозой $\geq 1 \cdot 10^8$ Рад



Рис. 10. Регистрация АЭ сигналов ПАЭ образования трещины в бетонном стенде

На рисунке 11 показан АЭ спектр процесса образования трещины в бетонном стенде.

Для качественной оценки состояния исследуемого объекта гидротехнического сооружения и оперативного принятия решения о проведении ремонтных работ, необходимо в ходе контроля трещинообразования определение трехмерных координат локальных дефектных мест. Обследуемый по данному АЭ методу объект гидротехнического

сооружения имеет, как правило, сложную конструкцию и большую массу, поэтому, проведение технического диагностирования таких объектов представляет определенную сложность, так как количество пьезодатчиков, необходимых для проведения контроля исследуемого объекта гидротехнического сооружения на 100 % определяется степенью затухания ультразвуковой волны и особенностями конструкции исследуемого объекта гидротехнического сооружения.

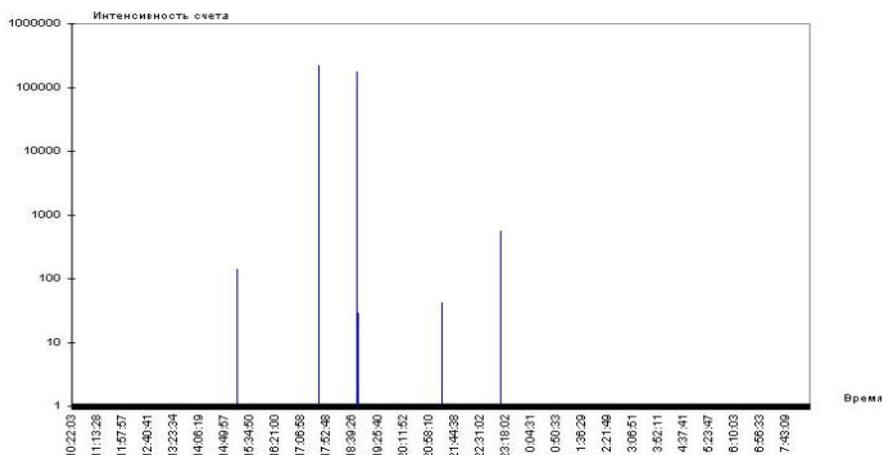


Рис. 11. АЭ спектр процесса образования трещины в бетонном стенде

Рассмотрим один из вариантов определения местоположения источников АЭ сигналов на исследуемом объекте контроля с использованием 4 пьезодатчиков. Для этого контролируемую поверхность исследуемого объекта разделили на четыре зоны. На рисунке 12 представлена схема расположения пьезодатчиков (Д) АЭ сигналов в координатах X,Y.

На поверхности исследуемого объекта в каждую зону помещали по одному пьезодатчику. Расстояние между пьезодатчиками определяли степенью затухания ультразвуковой АЭ волны. Выбор зоны нахождения источника АЭ сигнала осуществляли в зависимости от порядка срабатывания датчиков. При этом, срабатывание четырех датчиков было обязательно.

В исследуемом бетонном объекте для расчета трехмерных координат X,Y,Z источников АЭ сигналов были разработаны формулы и алгоритм компьютерной программы определения трехмерных координат X,Y,Z источников АЭ сигналов.

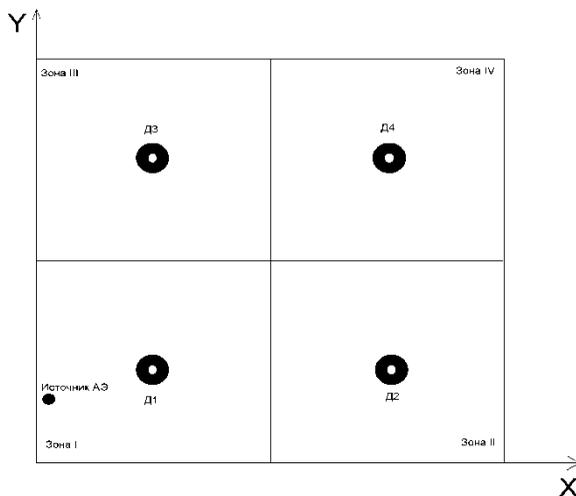


Рис. 12. Схема расположения пьезодатчиков (Д) АЭ сигналов в координатах X, Y

Для определения в бетонных образцах источника АЭ сигналов развивающей трещины на координатах X, Y, Z был разработан алгоритм компьютерной программы с решением следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned}
 & x^2 + y^2 + z^2 - r^2 = 0, \\
 & (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + z^2 = (d_2 + r)^2 \\
 & (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + z^2 = (d_3 + r)^2 \\
 & (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + z^2 = (d_4 + r)^2 \\
 & \{x, y, z, r\}
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4$ – координаты датчиков Д1, Д2, Д3, Д4, $d_2 = (\ln I_1 - \ln I_2)/k$, $d_3 = (\ln I_1 - \ln I_3)/k$, $d_4 = (\ln I_1 - \ln I_4)/k$; $I_1 - I_4$ – интенсивности сигналов зарегистрированные датчиками Д1, Д2, Д3, Д4; k – поправочный коэффициент.

Значение коэффициента k предварительно определяли для каждого объекта контроля.

Решение системы уравнений по формулам 2, 3, 4 следующее:

$$x \rightarrow \left(d_2 d_4^2 y_3 - d_4 (x_3^2 y_2 + y_3 (d_2^2 - x_2^2 - y_2^2 + y_2 y_3)) + d_3^2 (d_4 y_2 - d_2 y_4) + d_2 (-x_4^2 y_3 + (x_3^2 + y_3 (y_3 - y_4)) y_4) + d_3 (-d_4^2 y_2 + x_4^2 y_2 + y_4 (d_2^2 - x_2^2 - y_2^2 + y_2 y_4)) \right) / (2 (-d_4 x_3 y_2 + d_3 x_4 y_2 + d_4 x_2 y_3 - d_2 x_4 y_3 - d_3 x_2 y_4 + d_2 x_3 y_4)), \quad (2)$$

$$y \rightarrow \left(-d_2^2 d_4 x_3 + d_3^2 (d_4 x_2 - d_2 x_4) + d_4 (x_2^2 x_3 + x_3 y_2^2 - x_2 (x_3^2 + y_3^2)) + d_3 (-d_4^2 x_2 + d_2^2 x_4 - x_2^2 x_4 + x_2 x_4^2 - x_4 y_2^2 + x_2 y_4^2) + d_2 (d_4^2 x_3 + x_3^2 x_4 + x_4 y_3^2 - x_3 (x_4^2 + y_4^2)) \right) / (2 (d_4 x_3 y_2 - d_3 x_4 y_2 - d_4 x_2 y_3 + d_2 x_4 y_3 + d_3 x_2 y_4 - d_2 x_3 y_4)), \quad (3)$$

$$z \rightarrow \frac{1}{2} \sqrt{\left(- \left(-x_3^2 x_4 y_2 - x_3 x_4^2 y_2 + d_2^2 x_4 y_3 - x_2^2 x_4 y_3 + x_2 x_4^2 y_3 - x_4 y_2^2 y_3 + x_4 y_2 y_3^2 + d_4^2 (x_3 y_2 - x_2 y_3) - d_2^2 x_3 y_4 + x_2^2 x_3 y_4 - x_2 x_3^2 y_4 + x_3 y_2^2 y_4 - x_2 y_3^2 y_4 - x_3 y_2 y_4^2 + x_2 y_3 y_4^2 + d_3^2 (-x_4 y_2 + x_2 y_4) \right)^2 + (d_2 d_4^2 y_3 - d_4 (x_3^2 y_2 + y_3 (d_2^2 - x_2^2 - y_2^2 + y_2 y_3)) + d_3^2 (d_4 y_2 - d_2 y_4) + d_2 (-x_4^2 y_3 + (x_3^2 + y_3 (y_3 - y_4)) y_4) + d_3 (-d_4^2 y_2 + x_4^2 y_2 + y_4 (d_2^2 - x_2^2 - y_2^2 + y_2 y_4)) \right)^2 + (-d_2^2 d_4 x_3 + d_3^2 (d_4 x_2 - d_2 x_4) + d_4 (x_2^2 x_3 + x_3 y_2^2 - x_2 (x_3^2 + y_3^2)) + d_3 (-d_4^2 x_2 + d_2^2 x_4 - x_2^2 x_4 + x_2 x_4^2 - x_4 y_2^2 + x_2 y_4^2) + d_2 (d_4^2 x_3 + x_3^2 x_4 + x_4 y_3^2 - x_3 (x_4^2 + y_4^2)) \right)^2 / (d_4 x_3 y_2 - d_3 x_4 y_2 - d_4 x_2 y_3 + d_2 x_4 y_3 + d_3 x_2 y_4 - d_2 x_3 y_4)^2 \right)}, \quad (4)$$

На рисунке 13 приведена блок-схема алгоритма получения координат X,Y,Z трещинообразования на исследуемом объекте.

Пример полученных данных в результате имитации образования трещины (дефекта) представлен на рис. 14.

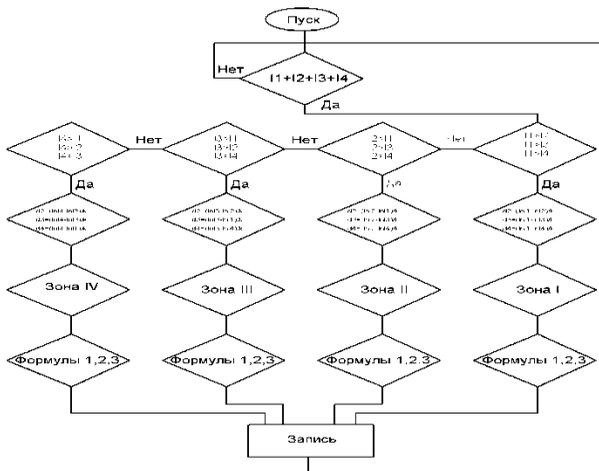


Рис. 13. Блок-схема алгоритма получения координат X,Y, Z трещинообразования на исследуемом объекте (D1, D2, D3, D4 – срабатывание датчиков)

Отчет по результатам измерения интенсивности N													1.	1.		
описание																
произвел		Время нач.										23/08/2011 15:16				
заверил		окончания										23/08/2011 15:20				
дополнит. информ.																
<input checked="" type="checkbox"/> Автомат. перезапуск		<input type="checkbox"/> Измерение		<input type="button" value="Сброс"/>												
плата N		Параметры устройства				x2	y2	z2	Результат и кол. замеров		Результат измерений кол. замеров		18			
1		изм. вход N1	изм. вход N2	изм. вход N3	изм. вход N4	50	0	0								
		1	2	3	4	x3	y3	z3								
		Параметры измерения				0	50	0	средн. знач. дисперсия		средн. знач. дисперсия		#ИМЯ?			
koef1		задано	текущее	остаток		x4	y4	z4								
0.0392		измерение	1000	19	982	50	50	0								
		время изм.	1	0		x1	y1	z1								
						0	0	0								
Данные замеров																
№	время старта	D1	D2	D3	D4	I1	I2	I3	I4	d2	d3	d4	x	y	z	состояние
1	23/08/2011 15:16	1	1	1	1											выполн.
2	23/08/2011 15:16	422	46	41.4	23					15	-59	-2.7	9.31	43.03	8.48	выполн.
3	23/08/2011 15:16	26745	8256	7430.4	4128					15	-33	-2.7	9.90	42.34	7.27	выполн.
4	23/08/2011 15:16	25038	7548	6793.2	3774					15	-33	-2.7	10.01	42.20	8.74	выполн.
5	23/08/2011 15:16	25147	7924	7131.6	3962					15	-32	-2.7	9.78	42.47	5.41	выполн.
6	23/08/2011 15:16	1	1	1	1											выполн.
7	23/08/2011 15:16	1	1	1	1											выполн.
8	23/08/2011 15:16	4852	1059	953.1	529.5					-15	-18	-5.7	39.46	41.58	13.47	выполн.
9	23/08/2011 15:16	6742	2489	2240.1	1244.5					-15	-18	-4.3	41.74	44.27	17.54	выполн.
10	23/08/2011 15:16	10603	4068	3661.2	2034					-15	-18	-4.2	42.39	45.03	21.51	выполн.
11	23/08/2011 15:16	1	1	1	1											выполн.
12	23/08/2011 15:16	1	1	1	1											выполн.
13	23/08/2011 15:17	1	1	1	1											выполн.
14	23/08/2011 15:20	1	1	1	1											выполн.
15	23/08/2011 15:20	1	1	1	1											выполн.
16	23/08/2011 15:20	8971.2	4984	29999	9968					15	-31	-2.7	9.42	42.90	6.90	выполн.
17	23/08/2011 15:20	9314.1	5174.5	32737	10349					15	-32	-2.7	9.76	42.49	5.03	выполн.
18	23/08/2011 15:20	9075.6	5042	31110	10084					15	-31	-2.7	9.60	42.68	2.90	выполн.
19	23/08/2011 15:20	0	0	147	0											ч/измер

Рис. 14. Результат определения трехмерных координат X,Y,Z развивающейся трещины в бетонном образце

Компьютерная визуальная демонстрация расположения развивающейся трещины в координатах X,Y,Z в бетонном стенде с размерами (60×60×20)см представлена на рис. 15.

Заключение

Разработан и изготовлен опытный образец высокочувствительного АЭ системы с четырьмя пьезодатчиками ПАЭ, имеющие следующие технические характеристики: коэффициент усиления АЭ сигналов – 58 дБ, полоса пропускания от 45 до 300 кГц, регулируемый уровень дискриминации 1÷50 мВ. ПАЭ АЭ системы стационарно фиксируются на бетонной конструкции гидротехнического сооружения.

АЭ спектра образования дислокаций [8].

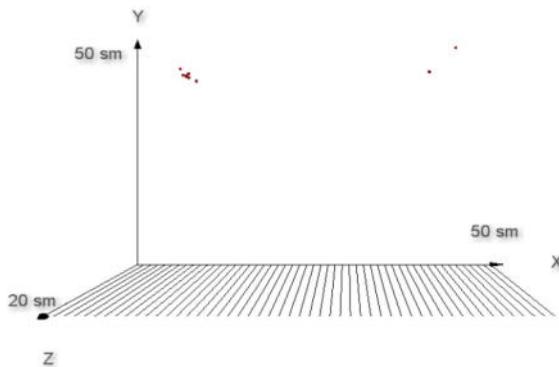


Рис. 15. Визуальная демонстрация расположения развивающейся трещины в бетонном стенде с трехмерными координатами X,Y,Z

Градуировка АЭ системы проведена медицинскими песочными часами, а также с образцами монокристаллического кремния гамма-облученными при поглощенных дозах $\geq 1 \cdot 10^8$ Рад с получением

Для определения трехмерных координат X,Y,Z источников АЭ сигналов возникающих при образовании трещины в исследуемом бетонном объекте были разработаны формулы расчета, алгоритм компьютерной программы определения трехмерных координат X,Y,Z источников АЭ сигналов и метод визуальной демонстрации расположения развивающейся трещины в бетонном стенде.

Опытная АЭ система была апробирована в лабораторных условиях: получены АЭ спектры трещинообразования в бетонном стенде, проведены предварительные испытания по определению трехмерных координат X,Y,Z развивающейся трещины в бетонном стенде.

В дальнейшем планируется проведение исследований по применению АЭ системы на конкретных эксплуатирующихся ГТС Республики.

Работа выполнена по научно-техническому проекту ФА-А14-Ф070 программы прикладных проектов Академии наук Республики Узбекистан.

Список литературы

1. Calabrese L., Campanella G., Proverbio E. Use of Cluster Analysis of Acoustic Emission Signals in Evaluating Damage Severity in Concrete Structures / J. Acoustic Emission, 2010. 28, 129.
2. Хайдаров Т., Айрапов В. Т., Каримов Ю. Н. // Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности : сб. тр. X Междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2010. С. 307–309.

3. Глоzman И. А. Пьезокерамика. М. : Энергия, 1972.
4. Баранов В. М. Акустические измерения в ядерной энергетике. М. : Энергоатомиздат, 1990.
5. Баранов В. М., Губина Т. В. О калибровке акустическо-эмиссионной аппаратуры // Дефектоскопия. 1988. № 5.
6. Малыгин Г. А. Механизм формирования микрополос сдвига при пластической деформации нанокристаллических материалов // ФТТ. 2009. 1, 9, 1709.
7. Малыгин Г. А. Процессы самоорганизации дислокаций и пластичность кристаллов // УФН. 1999. 169, 979.
8. Ультразвуковое исследование образования дислокаций в монокристаллическом кремнии / У. Т. Ашрапов, Ш. А. Махмудов, М. Б. Юлдашев, М. У. Алиева // Фундаментальные и прикладные вопросы физики : сб. тр. Междунар. конф. Ташкент, 2017. С. 220–223.

УДК 378.016

Подготовка гидрологов в России

О. А. Бархатова (barhat@geogr.isu.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Приведена краткая история становления высшего гидрометеорологического образования в России. Отражены основные направления при подготовке гидрологов и область их профессиональных интересов.

Ключевые слова: гидрометеорологическое образование, гидрология, гидрологи.

Природные воды на Земле и гидрологические процессы изучает комплекс наук, объединяемых общим понятием, гидрология. Гидрология принадлежит к циклу наук о Земле и тесно соприкасается с науками геофизического, геологического и биологического циклов. Гидрология имеет большое значение для решения задач водоснабжения, гидроэнергетики, водного транспорта, орошения, осушения, агрономии, лесного хозяйства, обоснования мостовых переходов и др.

Специалисты гидрологи исследуют круговорот воды в природе, влияние на него деятельности человека и управление режимом водных объектов и водным режимом отдельных территорий; проводят анализ гидрологических элементов для отдельных территорий и Земли в целом; дают оценку и прогноз состояния и рационального использования водных ресурсов.

Поэтому объем подготовки гидрологов – это обширная область знаний, включающая в себя много разделов, главными из них которых являются учение о водном балансе, учение о речном стоке, учение о динамике речных русел и русловом процессе, химическом режиме, загрязнении природных вод и многое другое. Используя учение о сто-

ке, гидрологические расчеты и прогнозы гидрология представляет собой инженерную науку – инженерную гидрологию, осуществляющую расчеты водного баланса речных систем и бассейнов, водных ресурсов земного шара, России и отдельных регионов, изменчивость ресурсов во времени, вероятность появления экстремальных значений и других характеристик.

Гидрометслужбы всех стран мира, а также Университеты и НИИ, работающие в этих областях, ведут исследования соответствующих научных проблем: накопление, подземный и наземный сток воды, общий гидрологический режим регионов, использование вод для различных целей – водопотребление населением, водный транспорт на реках и озёрах, водная энергетика, создание искусственных водохранилищ и многое другое.

Оперативные гидрологические службы, опирающиеся на данные сети специальных пунктов водомерных измерений, проводят расчёты водостоков и расходов с применением мощной вычислительной техники и обеспечивают народное хозяйство и население оперативной как текущей (диагностической), так и прогностической гидрологической информацией.

Таким образом, в сферу гидрологии входит изучение и оперативное информационное обеспечения хозяйства всех стран мира.

За рубежом нет специальных гидрометеорологических вузов. Подготовка гидрологов обычно осуществляется на естественных и физико-математических факультетах университетов, в транспортных и других вузах, а также в политехникумах, так как многое в профессии гидрологов связано с работой инженеров. Такова современная практика подготовки гидрологов во многих государствах Западной Европы и Америки [2; 3].

В России до революции гидрологов специально не готовили. Лишь некоторые выпускники ряда университетов специализировались в области гидрометеорологии, например, на физико-математических факультетах Московского и Петербургского университетов, технических институтов, особенно Петербургского института инженеров путей сообщения и Петербургского политехнического института, а также морских училищ и морской академии.

В конце XIX в. на физико-математических факультетах университетов начинают создаваться кафедры географии, где в курсах физической географии вводятся разделы гидрометеорологии, а в Петербургском институте путей сообщения читаются лекции по некоторым

разделам гидрологии, связанным с решением инженерных задач, в первую очередь в области водного транспорта.

Как самостоятельная отрасль высшего образования направление гидрометеорологии сформировалась после революции. В 20-е гг. XX в. начинается специализация гидрометеорологов в ряде университетов, особенно в Московском и Ленинградском университетах. В 1925 г. открывается географический факультет в Ленинградском университете, в учебном плане которого был включён цикл гидрометеорологических дисциплин. В годы первой пятилетки в связи с недостатком в стране кадров гидрометеорологической службы на геолого-географических, геолого-почвенно-географических, а затем и на географических факультетах в университетах вводятся гидрометеорологические специальности. В 1930 г. в составе Гидрометеорологической службы СССР открывается первый в мире Московский гидрометеорологический институт, организованный на базе геофизического факультета МГУ. В 1932 г. был открыт Харьковский гидрометеорологический институт. Эти институты обеспечивали подготовку высококвалифицированных гидрометеорологов для народного хозяйства и обороны страны. В 1934 г. в Московском гидрометеорологическом институте вводится курс гидрологических прогнозов под руководством Б. А. Апполова.

Ситуация изменилась с началом Великой Отечественной Войны. Военные действия потребовали резкого увеличения числа специалистов в области прогнозирования гидрологических процессов и явлений на реках и озерах, планирования и ведения военных действий в условиях изменчивости водного, ледового, руслового режима водотоков и водоемов. Институты, эвакуированные в Среднюю Азию, готовили кадры военных гидрологов и метеорологов. В 1943 г. на базе гидрологических отделов Центрального института погоды и Государственного гидрологического института были созданы два отдела Центрального института погоды, ныне Гидрометцентра России, ставшего главным научно-методическим центром страны по всем видам гидрометеорологических прогнозов.

В послевоенные годы страна особенно нуждалась в специалистах гидрологов, так как на фоне восстановления разрушенных гидротехнических сооружений, строительства новых объектов, интенсивно развивались водный транспорт и дорожное строительство, велась прокладка нефте- и газопроводов, проводилась мелиорация земель, создавался каскад крупнейших водохранилищ на Волге, Днепр, строились гидроэлектростанции на реках Сибири было принято решение от-

крыть подготовку гидрологов именно на географических факультетах госуниверситетов.

Важнейшей составляющей учебного процесса стало развитие теории речного стока, как географического фактора, объединяющего через потоки воды, наносов, химических веществ, биологических субстанций, тепла и, частично, гидравлической энергии всех компонентов природных ландшафтов.

В результате выпускники гидрологи, имея комплексное представление о структуре и взаимосвязях в географической оболочке, могли на нетрадиционной основе решать разнообразные гидрологические и водохозяйственные задачи.

Высшее гидрометеорологическое образование в СССР осуществлялось в [2]:

- Ленинградском гидрометеорологическом институте, созданном на базе Московского гидрометеорологического института (специальности: метеорология со специализациями – аэрология и численные методы прогнозов погоды, гидрология и океанология);

- Одесском гидрометеорологическом институте, созданном на базе Харьковского гидрометеорологического института (специальности: метеорология, сельскохозяйственная метеорология, гидрология),

- различных университетах: Московском (специальности: метеорология, климатология, гидрология, океанология, физика атмосферы, физика моря), Ленинградском (специальности: метеорология, климатология, гидрология, океанология, физика атмосферы), Дальневосточном – во Владивостоке, Казахском – в Алма-Ате, Ташкентском (метеорология и гидрология), Киевском, Томском и Черновицком (климатология и гидрология), Казанском и Саратовском (метеорология), Воронежском (гидрология), Иркутском (гидрология и метеорология).

Обучение на гидрологических направлениях осуществлялось и до сих пор осуществляется по следующим профилирующим дисциплинам:

- на специальности гидрология – геодезия, гидрометрия, гидромеханика, гидравлика, гидрология рек, озероведение, гидрологические расчёты, водные исследования, гидрологические прогнозы, гидрогеология, водохозяйственные расчёты, динамика русловых потоков, гидрохимия, гидротехника, гидрография;

- на специальности океанология – геодезия, астрономия, теоретическая механика, гидромеханика, гидрохимия моря, гидрология, кораблевождение, физика моря, океанология, методы наблюдений, морские расчёты и прогнозы, морская геология, гидробиология, моря СССР, сток и устья рек.

Кроме комплекса специальных дисциплин и дисциплин географического цикла, большое место в учебных планах занимает физика, радиоэлектроника, математика, программирование и конечно же полевые учебные и производственные практики.

В настоящее время в России высшее образование по направлению «Гидрометеорология» можно получить в вузах с географическим или гидрографическим факультетом [4]:

- Российский государственный гидрометеорологический университет;
- Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова;
- Санкт-Петербургский государственный университет;
- Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского;
- Волжский государственный университет водного транспорта;
- Башкирский государственный университет;
- Пермский государственный национальный исследовательский университет;
- Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова;
- Южный федеральный университет;
- Уральский федеральный университет им. Б. Н. Ельцина;
- Национальный исследовательский Томский государственный университет;
- Иркутский государственный университет
- Забайкальский государственный университет

На сегодняшний момент гидрология приобрела не только теоретическую базу, но и стала одной из наиболее востребованных в практическом отношении.

В последнее десятилетие гидрология вступила в новый этап развития. Он характеризуется возникновением новых направлений в гидрологии (при сохранении интереса к ее традиционным разделам) на фоне развития и становлением в обществе экологического мировоззрения. Таким примером является экологическая гидрология (гидроэкология) – раздел новой междисциплинарной науки геоэкологии. Появляются новые запросы к прикладной гидрологии. Активно внедряются компьютерных технологий в практику научной деятельности. В совокупности с фундаментальными знаниями о процессах в водных объектах суши оно объективно создает предпосылки для возникнове-

ния особых направлений в развитии методов прикладной гидрологии, математического моделирования гидрологических процессов [1].

В обучении студентов и в организации научной работы стараются добиться ситуации, при которой математические модели гидрологических процессов переводятся из разряда уникальных методических средств, подвластных лишь узким специалистам, в состав программных комплексов, позволяющих неспециалисту получать сведения о реальном или потенциальном процессе в диалоговом режиме.

Одной из наиболее перспективных и сложных задач прикладной гидрологии также является создание электронных каталогов водных объектов, разноплановых баз данных и знаний, разработка новых и совершенствования существующих средств гидрологических расчетов, прогнозов физических, химических и биологических процессов в реках и водоемах.

Эти аспекты исследования процессов в объектах гидросферы, создания методических средств решения разнообразных гидрологических задач, подготовки специалистов для работы в ведомственных и академических учреждениях, вузах стали приоритетными направлениями в обучении гидрологов в последнее время.

Выбирая профессию гидролога, необходимо хорошо представлять себе ее особенности. На сайтах в интернете для поступающих можно найти различные мотивационные рекомендации для выбора специальности гидрологии [4; 5].

Во-первых, профессия гидрология потенциально опасна. Работа на водных объектах всегда связана с риском. Поэтому гидролог должен уметь плавать, быть дисциплинированным и соблюдать правила техники безопасности. В экстренной ситуации ему могут пригодиться навыки спасения на воде и оказания первой помощи.

Во-вторых, гидролог должен быть в хорошей физической форме. Ведь таким специалистам приходится работать с тяжелым оборудованием, натягивать трос для переправы, много передвигаться пешком, строить и ремонтировать водомерные посты. Однако это не значит, что гидрология предназначена только для мужчин. Женщины тоже часто становятся хорошими специалистами, справляясь со своими задачами не хуже коллег мужского пола.

В-третьих, немало времени гидрологи проводят в кабинетах: обрабатывают полевые журналы, изучают карты, занимаются расчетами, строят графики, пишут отчеты. Эти занятия требуют усидчивости и внимательности. Компьютеризация, впрочем, заметно ускорила и облегчила этот труд: к услугам AutoCAD и Excel, программы для

гидрологических расчетов, ГИС-технологии. Но даже если все расчеты сделает компьютер, отвечать за результат все равно будет человек. Хороший специалист недоверяет слепо электронике и знает, как выполнить все измерения с помощью простейших приборов, а расчеты – вручную. Он независит от техники, а полагается на свои знания и опыт. Чем больше внимания будущий гидролог уделит учебе, тем лучше сложится его карьера.

Сегодня уже никого не надо убеждать в том, что качественное высшее образование – залог успешного, обеспеченного будущего. Оно необходимо каждому человеку в современном мире, чтобы добиться успеха и реализовать себя. Гидрология – одна из тех профессий, которая высоко ценится на рынке труда из-за её важности, хотя одно огорчает, что среди современной молодежи о ней известно мало, хотя хорошие гидрологи сейчас навес золота.

Список литературы

1. *Алексеевский Н. И.* Новые тенденции в области гидрологии и гидрологического образования. М.: МГУ
2. *Калинин Г. П.* Гидрометеорологическое образование [Электронный ресурс]. URL: <http://pedagogic.ru/pedenc/item/f00/s00/e0000527/index.shtml>.
3. *Путьшева Н.* Праздники и будни гидрологов МГУ [Электронный ресурс] // Природно-ресурсные ведомости. 2009. № 3 (24). URL: <http://www.priroda.ru/reviews/detail.php?ID=8848>.
4. <https://postupi.online/professiya/gidrolog>.
5. <http://vuzopedia.ru/spec/24/vuzy>.

УДК 551.482.6: 551.459 (571.54)

Морфодинамика вершины дельты р. Селенги на современном этапе развития

А. А. Гаврилова (gavryusha.dipsi@mail.ru)¹

Е. А. Ильичева^{2,3}

М. В. Павлов²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

² Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск

³ Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Представлены результаты исследований динамики и эволюции вершины дельты реки Селенги с 1956 по 2018 г. Картографическим методом произведен анализ развития излучины и даны морфометрические характеристики на 4 временных срезах.

Ключевые слова: дельта, субаэральная поверхность, берега, аккумуляция, эрозия, Байкал, Селенга.

Введение

Векторизация растровых изображений, полученных в результате ДДЗ, и их сравнительный анализ с картографическими изображениями прошлых лет дает возможность оценить развитие морфоскульптурных элементов речной сети. В данном исследовании рассматривается вершина дельты реки Селенги, формирующая разбой стока на три направления: Лобановское, Селенгинское и Среднеустьевское, названные по именованию основных протоков дельты реки Селенги. На современном этапе рельефообразования, который, мы предполагаем отсчитывать от установления уровня Иркутского водохранилища в 70-х гг. прошлого века до настоящего времени, происходило постепенное перемещение узла разбоя, фиксируемое картографическими методами. По имеющимся данным со времени строительства Иркутской ГЭС и по настоящее время узел бифуркации изменил свое положение [2; 5].

А. Н. Афанасьевым предложен вековой уровенный цикл высотных уровней Байкала [2]. К августу 1962 г., после строительства Иркутской ГЭС, уровень достиг отметки соответствует 453,82 м в Балтийской системе высот, применяемой на топографических картах или 454,34 в Тихоокеанской системе. Позднее, к 1980 г., в результате регулирования уровень снизился на 1,2 м, а в период 1985–1995 гг. поднялся приблизительно на 1 м. Далее происходили незначительные колебания в пределах 0,30 м, но в целом отмечается постепенное снижение уровня. Период с 1959 по 1972 г. представляет собой максимальную фазу третьего векового уровенного цикла, предложенного А. Н. Афанасьевым, начавшегося в начале XX в. В этот период отмечались наивысшие уровни Байкала за последние 270 лет. Во многом этот подъем обусловлен техногенным вмешательством в естественный режим при строительстве и заполнении водохранилища Иркутской ГЭС. Маловодный период, продолжающийся с начала 2000-х гг., мог бы ознаменовать окончание третьего уровенного цикла Байкала по А. Н. Афанасьеву. Уровенный режим Байкала оказывает прямое влияние на Селенгу: в результате изменения базиса эрозии менялся рисунок русловой сети и дельтовой равнины и наблюдалось смещение основных узлов бифуркации [1].

Актуальность исследований формирования дельт выдвигания, имеющих значительные субаэральные поверхности, во всем мире имеют большое практическое применения для планирования землепользования. В дельте реки Селенги, имеющей площадь около 600 км²

расположен Кабанский заказник федерального значения, здесь находятся важнейшие сельскохозяйственные территории. Плановые деформации русел, вызванные естественными и техногенными процессами, требуют постоянного мониторинга для создания модели развития, актуальной для современных землепользователей. Уникальность исследования заключается в междисциплинарном подходе с привлечением гидрологических, геоморфологических и картографических методов.

Материалы и методы

Для сравнительного картографического анализа использовались топографические карты 1956, 1986, 1998 гг. издания, панхроматический снимок 2011 г. и современные ортофотопланы полученные с борта БПЛА в 2017–2018 гг. летних полевых сезонов. В работе использованы карты 100 000 масштаба, космоснимки с разрешением 1 м и ортофотопланы с точностью 0,14 м. Проведена нивелирная съемка местности для заверки плановых очертаний в локальных высотах. Полученный материал векторизовался для создания цифровой модели плановых и высотных положений берегов.

На предварительном этапе космические снимки Landsat обрабатывались в программе QGIS, где для интерпретации выбирались 7, 6, 4. Эта комбинация дает изображение близкое к естественным цветам, но в тоже время позволяет анализировать состояние атмосферы и дым. Растительность отображается в оттенках темно и светло зеленого, урбанизированные территории выглядят белыми, зелено-голубыми и малиновыми, почвы, песок и минералы могут быть очень разных цветов. Практически полное поглощение излучения в среднем ИК-диапазоне водой, снегом и льдом позволяет очень четко выделять береговую линию и подчеркнуть водные объекты на снимке. Полученный в результате файл GeoTIF обрабатывался и векторизовался в программе QGIS.

Основываясь на работах Р. С. Чалова, В. В. Иванова, А. С. Завадского, были изучены основные типы излучин, их морфометрические элементы и параметры [3; 6; 9; 10]. Каждая излучина состоит из двух крыльев – верхнего и нижнего. При последовательном расположении излучин нижнее крыло одной переходит в верхнее крыло ниже расположенной. Переход от верхнего крыла к нижнему на отдельной излучине соответствует её вершине, в створе вершины излучины происходит изменение направления русла по отношению к оси долины. Отрезок русла в районе вершины называют иногда привершинной частью

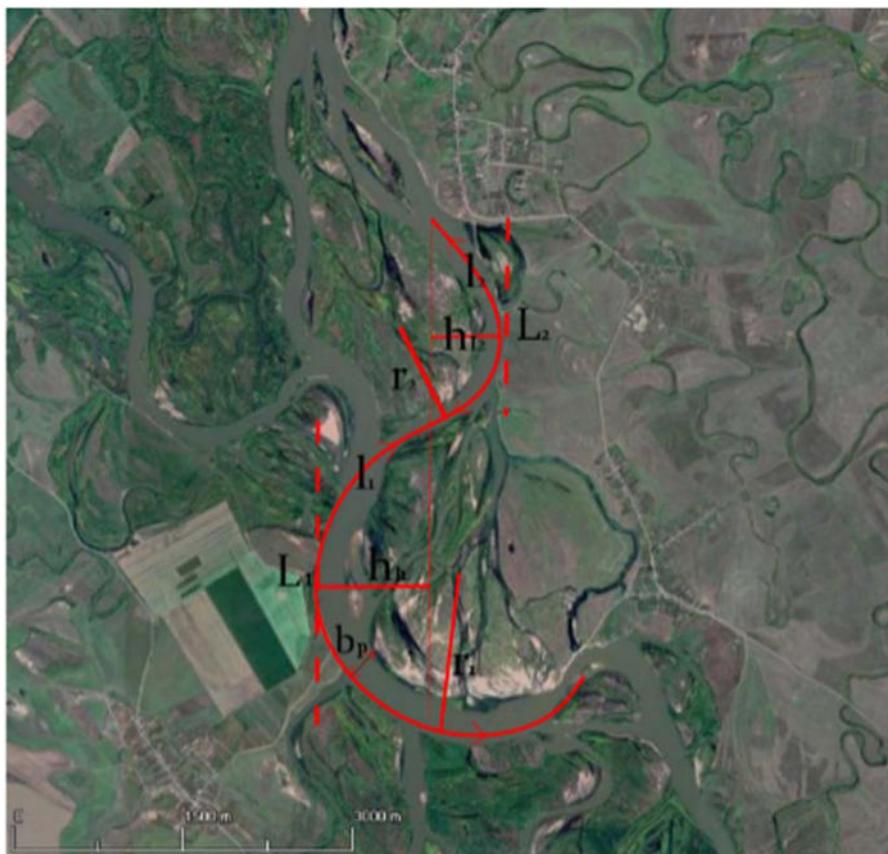


Рис. 2. Район исследования и графическое отображение морфометрических элементов

Результаты и обсуждение

Для изучения был выбран участок вершины дельты реки Селенги, формирующая разбой стока на три направления: Лобановское, Селенгинское и Среднеустьевское [7] и временной промежуток с 1956 по 2018 г.

Излучина была разбита на 2 сегмента (нижнее (1) и верхнее (2) крыло) и для каждого временного промежутка была проведена оценка размеров и формы каждого крыла.

Таблица 1

Морфометрические параметры и коэффициенты

год	№ сегмента излучины	L , м	l , м	r , м	b_p , м	$h_{из}$, м	l/L	$r/h_{из}$
1956	1	2347,8	3173,5	1347,5	222,7	406,8	1,352	3,313
	2	2570,6	3518,8	1494,2	431,7	463,5	1,369	3,224
1986	1	2191,7	2270,6	1257,6	403,2	557,2	1,036	2,257
	2	2397,4	2531,5	1343,7	390,5	484,7	1,056	2,772
1998	1	2682,7	2973,8	1515,3	273,2	670,1	1,108	2,261
	2	2122,3	2470,3	1368,2	287,2	532,3	1,164	2,570
2011	1	2700,5	3140,0	1428,6	258,2	881,9	1,163	1,620
	2	1881,9	2259,7	928,6	261,0	533,0	1,201	1,742
2018	1	2577,4	3146,4	1293,0	323,4	841,6	1,221	1,536
	2	1946,3	1440,8	917,7	223,0	552,3	0,740	1,662

На топографической карте 1956 г. издания в вершине дельты на протяжении 1,5 км наблюдается прямолинейное русло с обрывистыми высокими (до 2,5 м) левым и правым берегами. В русле развит процесс островной и пойменной многоруканности [9]. Ширина русла составляет 1,2 км. Высота намывных островов 1,3–1,7 м. Ниже острова Еремиха происходит разбой стока на Селенгинское (Твороговское) и Лобановское (Красноярское) направления стока [7].

После установления нового техногенно обусловленного уровня в 1970-х гг. создаются условия для подпора вод Селенги, результатом чего становится плановая перестройка речной сети дельты и смена руслового процесса в ее вершине. Топокарта 1986 г. отображает ситуацию развития русловой сети дельты после установления высокого уровня. Русловой процесс островной многоруканности сменяется на меандрирование. Основной сток смещается к левому берегу. Появляются зачатки сегментной адаптированной (врезанной) излучины. Скорость эрозии левого берега составляет 5–6 м в год. На правом берегу начинают развиваться песчано-галечные пляжи на островах, разделенными отмирающими протоками [4].

Между временными срезами 1986–1998 гг. в бассейне реки наблюдался маловодный период. За это время излучина вершины дельты окончательно сформировалась. Практически весь сток проходит вдоль левого берега со скоростью эрозии 10 м год. Правый берег полностью осушился, на поверхности которого развит гривовый рельеф.

На современной этапе эволюции излучины вершины дельты происходит размыв левого берега и смещение вниз по течению. Основываясь на полученных данных, можно сделать вывод, что излучина является сегментной развитой и наблюдается новый этап в развитии из-

лучины, поскольку кардинально поменялась степень ее развитости. В целом за период с 1956 по 2018 г. смещение центра излучины составило порядка 260 м.

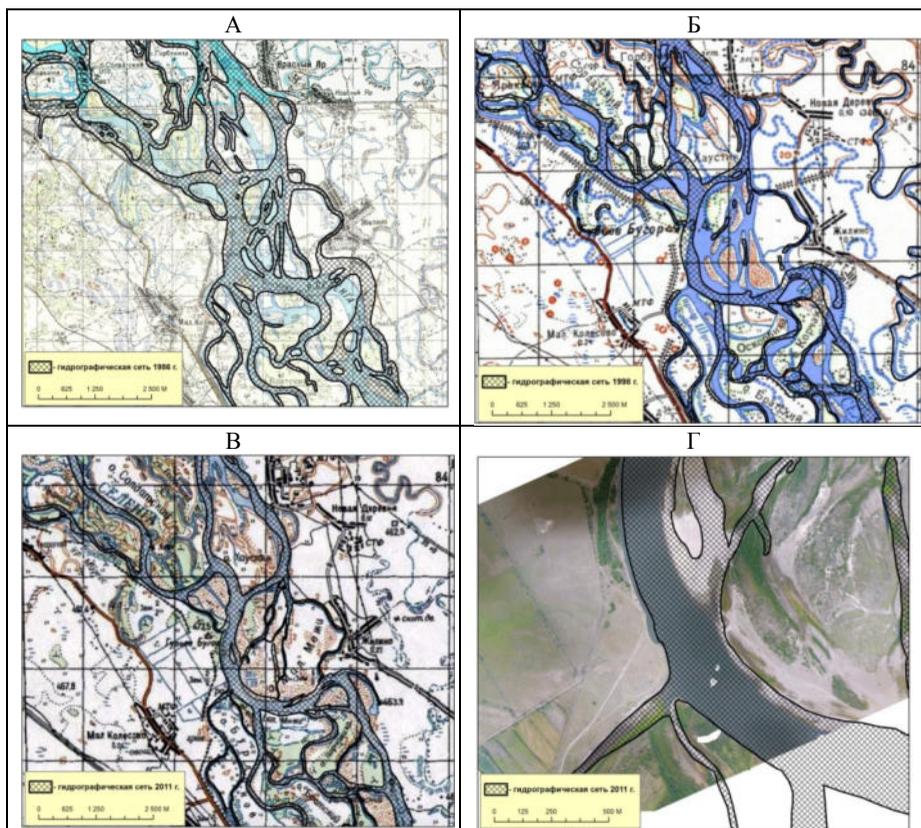


Рис. 3. Морфодинамика вершины дельты в различные годы.

А – карта 1956 г., штриховкой показана ситуация 1986 г.; Б – карта 1986 г., штриховкой показана ситуация 1998 г.; В – карта 1998 г., гидрографическая сеть по космоснимку 2011 г.; Г – ортофотоплан 2018 г., гидрографическая сеть 2011 г.

Исследования проводятся при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-29-05052 офи_м «Экзоморфолитогенез устьев Байкальских притоков на современном этапе гидроклиматического цикла: моделирование и прогноз»

Список литературы

1. Айбулатов Д. Н., Ильичёва Е. А., Павлов М. В. Морфодинамические типы русел, гидролого-морфологические процессы и ландшафты в дельте р. Селенга // Современные проблемы эрозионных, русловых и устьевых процессов : материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием и 31 пленарного межвузовского координационного совещания. Астрахань, 2016. С. 51–53.
2. Афанасьев А. Н. Водный баланс оз. Байкал // Тр. Байкал. лимнол. станции / Исследования гидрологического режима Байкала. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1960. Т. 18. С. 7–154.
3. Завадский А. С., Каргаполова И. Н., Чалов Р. С. Стадии развития свободных излучин и их гидролого-морфологический анализ // Вестн. Моск. ун-та Сер. 5. География. 2002. № 2. С. 17–22.
4. Ильичёва Е. А., Гагаринова О. В., Павлов М. В. Гидролого-геоморфологический анализ формирования ландшафтов дельты реки Селенги // География и природ. ресурсы. 2015. № 3 С. 85–93.
5. Ильичёва Е. А., Павлов М. В., Савельева Л. А. Динамика субэаральной поверхности дельты реки Селенги // География и природные ресурсы, 2016. С. 128–136.
6. Иванов В. В., Чалов Р. С. Прямолинейные неразветвленные русла как морфодинамический тип // Геоморфология. 1991. № 2. С. 67–73.
7. Гидролого-морфологический подход к районированию дельты р. Селенги / Л. М. Корытный, Е. А. Ильичева, М. В. Павлов, И. Ю. Амосова // География и природ. ресурсы. 2012. № 3. С. 47–54.
8. Павлов М. В., Ильичева Е. А. Морфогенез Сарминского и Селенгинского побережий озера Байкал // Вестн. Бурят. гос. ун-та. Сер. Биология и география. Улан-Удэ, 2017. № 4. С. 116–132.
9. Речные излучины / ред. Р. С. Чалова. М. : МГУ, 2004. 371 с.
10. Чалов Р. С. Русловедение: теория, география, практика. М. : КРАСАНД, 2011. Т. 2. 960 с.
11. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (13.02.2018).

УДК 556.5

Метод краткосрочного прогнозирования расходов воды с применением фрактальной диагностики

Е. В. Гайдукова (oderiut@mail.ru)

А. Е. Баймаганбетов (azamat.baima@gmail.com)

В. С. Девятов (dafdet@mail.ru)

*Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ),
г. Санкт-Петербург*

Аннотация. Рассматривается метод краткосрочного прогнозирования речного стока, особенностью которого является фрактальная диагностика рядов расходов воды за период параметризации прогностической модели. Диагностика показывает число фазовых переменных, характеризующих процесс формирования речного стока и позволяющих получать устойчивые решения модели. Произведена апробация метода на водосборах, отличающихся условиями формирования речного стока.

Ключевые слова: речной сток, корреляционная размерность, динамическая параметризация, поверочные прогнозы.

Введение

При прогнозировании расходов воды с небольшой заблаговременностью в различные периоды года возникает потребность учета основных компонент, характеризующих процесс формирования речного стока. Число компонент, необходимых для надежного прогноза, можно определить методом фрактальной диагностики [1].

Особенностью рассматриваемого прогностического алгоритма является то, что диагностика рядов расходов воды осуществляется за период параметризации. Результатом диагностики является фрактальная размерность, показывающая число фазовых переменных, характеризующих процесс формирования речного стока и позволяющих получать устойчивые решения прогностического уравнения.

В статье представлены метод краткосрочного прогнозирования расходов воды с применением фрактальной диагностики и результаты его апробации на водосборах, отличающихся условиями формирования речного стока.

Метод прогнозирования

Рассматриваемый метод краткосрочного прогнозирования основан на фрактальной диагностике рядов речного стока и динамической параметризации прогностического уравнения.

Схема метода прогноза показана на рис. 1 [5].

По периоду параметризации проводится фрактальная диагностика, показывающая число фазовых переменных необходимых для надежного прогноза, т.е. размерность прогностической модели, например, первого или второго порядка. Считается, что порядок модели сохранится и на период заблаговременности прогноза. После прохождения временного промежутка заблаговременности период параметризации сдвигается к дате выпуска прогноза – применяется так называемая динамическая параметризация.

Для параметризации прогностической модели берутся 15 суток (или 30 суток), предшествующие дню выпуска прогноза. Параметры модели считаются оптимальными, если соотношение S/σ_{Δ} (S – среднеквадратическая погрешность поверочных прогнозов, σ_{Δ} – среднеквадратическое отклонение прогнозируемой величины за период заблаговременности) минимально, а число оправдавшихся поверочных прогнозов P (%) максимально [2].

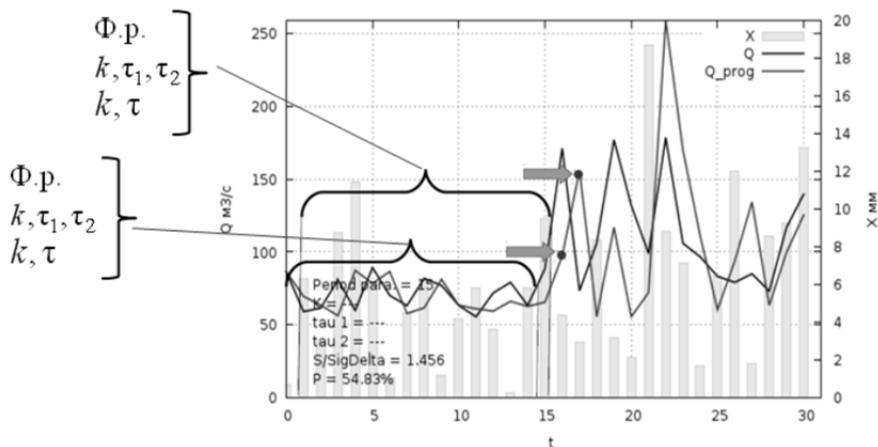


Рис. 1. Схема краткосрочного прогноза расходов воды

Фрактальная диагностика временных рядов расходов воды проводится с использованием метода, основанного на расчете корреляционной размерности [2]. Фрактальная размерность, округленная до ближайшего целого, называется размерностью пространства вложения, которая показывает число фазовых переменных в математической модели, описывающей изучаемую систему.

Апробация метода прогнозирования

Апробация метода прогноза с учетом фрактальной размерности рядов стока производилась с использованием динамических моделей формирования суточных расходов воды в виде дифференциальных уравнений первого и второго порядков, соответственно содержащих одну и две фазовые переменные [2]:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{1}{k\tau}Q + \frac{X^{\&}}{\tau}, \quad (1)$$

$$\tau_2 \frac{d^2Q}{dt^2} + \left(\frac{\tau_2}{k\tau_1} + 1 \right) \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{k\tau_1}Q = \frac{1}{\tau_1} X^{\&}, \quad (2)$$

где Q – расход (модуль, слой) стока; $X^{\&}$ – интенсивность осадков; k – коэффициент, характеризующий потери на водосборе; τ – время ре-

лаксации речного бассейна; τ_1 – время добегающего поверхностного стока; τ_2 – время добегающего подземного стока.

На рисунке 2 показаны результаты фрактальной диагностики для суточных расходов воды в летне-осенний период для 52-х водосборов Северо-Западного региона. Практическое применение метода представлено в виде картосхемы с фоновым прогнозом процесса изменения модулей стока с недельной заблаговременностью на рис. 2, б [4].

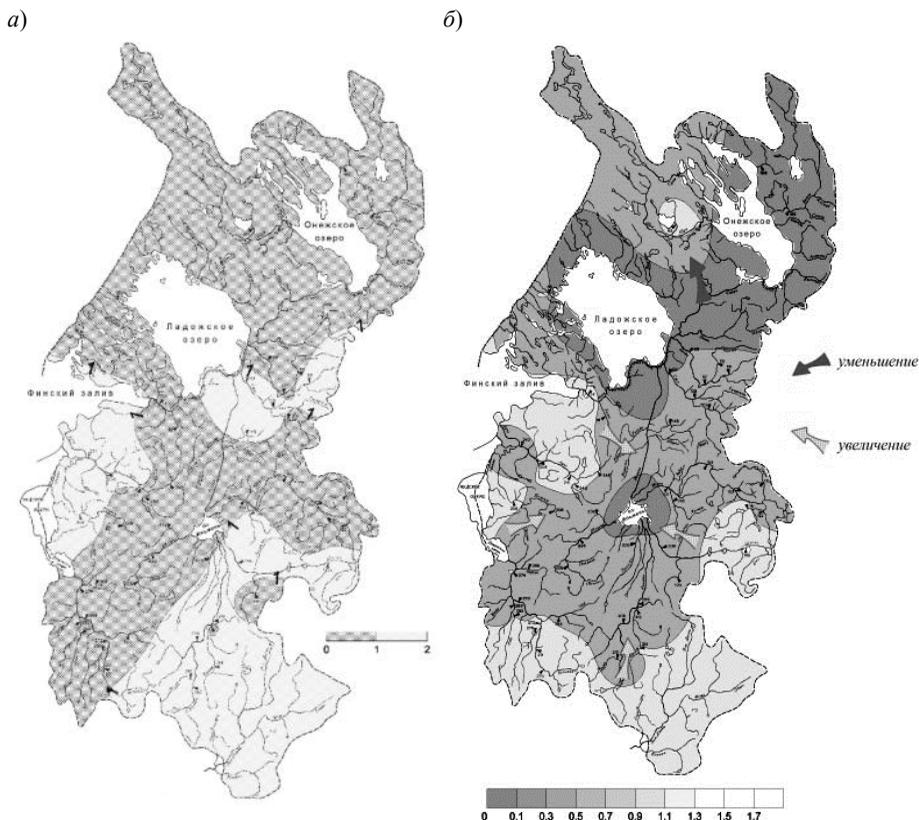


Рис. 2. Пример апробации метода для Северо-Западного региона:

а – распределение размерности пространства вложения (карта построена по рядам суточных расходов за летне-осенний период 1980 г.), б – пример картосхемы, показывающей динамику увеличения и уменьшения модулей стока в течение восьми суток

Данный алгоритм был применен к речным бассейнам Колумбии (рис. 3, *а*), которые располагаются в полугорной местности и характеризуются кратковременными паводками дождевого происхождения [5].

Оценивая результаты фрактальной диагностики по колумбийским рекам, отметим, что размерность пространства вложения равная двум встречается в 32 % случаев, поверочные прогнозы по модели второго порядка не дают лучших результатов по сравнению с моделью первого порядка (см. рис. 3, *б*). Это связано, скорее всего, с тем, что при заблаговременности прогноза одни сутки осадки не успевают добежать до замыкающего створа водосбора в виде подземного стока.

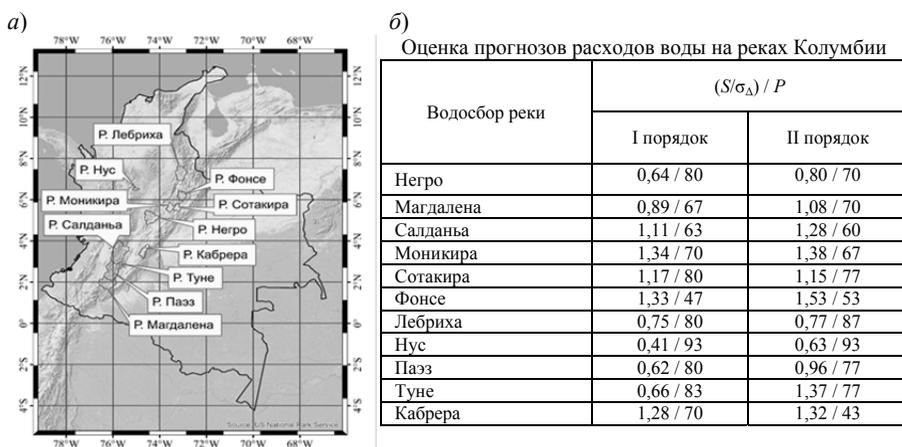


Рис. 3. Местоположение водосборов на территории Колумбии (*а*) и оценка прогнозов расходов воды для этих водосборов (*б*)

Апробация метода была выполнена также на речных водосборах Казахстана, отличающихся малым количеством выпадающих осадков. В качестве исследуемых объектов были использованы 3 гидрологических пункта на территории Казахстана в бассейне реки Есиль: р. Есиль – с. Турген, р. Есиль – с. Волгодоновка и р. Жабай – с. Атбасар.

Оценка поверочных прогнозов расходов воды на реках Казахстана показала (см. рис.4, *б*), что результаты метода прогнозирования по уравнению первого порядка можно считать удовлетворительными по обоим критериям качества, по уравнению второго порядка метод считается удовлетворительным только по числу оправдавшихся прогнозов.

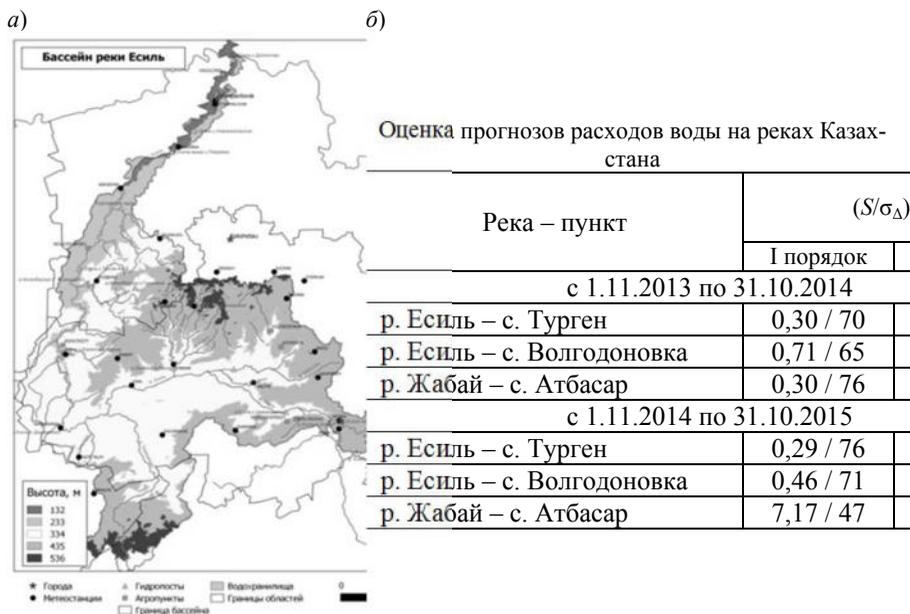


Рис. 4. Водосбор реки Есиль (а) и оценка прогнозов расходов воды с суточной заблаговременностью для этого водосбора (б)

Выводы

В статье был рассмотрен метод краткосрочного прогнозирования расходов воды с применением фрактальной диагностики. Апробация этого метода, произведенная на реках России (Северо-Западный регион), Колумбии и Казахстана, показала следующие результаты: а) для водосборов равнинных рек с достаточным увлажнением оправдавшиеся прогнозы получены по дифференциальным уравнениям (моделям) первого и второго порядка, размерность модели определяется фрактальной диагностикой ряда расходов воды за предшествующий период; б) для условий формирования суточного стока полугорных рек Колумбии более надежные результаты дает дифференциальное уравнение (модель) первого порядка; в) для рек полузасушливого климата Казахстана более точные значения расходов воды прогнозируются по уравнению первого порядка.

Список литературы

1. Гайдукова Е. В. Фрактальная диагностика в моделировании гидрологических процессов. СПб.: Астерион, 2017. 98 с.

2. Коваленко В. В., Викторова Н. В., Гайдукова Е. В. Методические указания по дежурству в учебном бюро гидрологических прогнозов. СПб. : Изд. РГГМУ, 2013. 30 с.

3. Коваленко В. В., Гайдукова Е. В. Вычисление фрактальных размерностей временных гидрологических рядов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 2013. № 2013619898.

4. Методика фонового краткосрочного прогнозирования изменения водности / В. В. Коваленко, Е. В. Гайдукова, Н. В. Викторова, М. Н. Громова, Е. В. Шевнина, В. С. Девятков // Метеорология и гидрология. 2012. № 10. С. 65–70.

5. Эстифия С. Э. Ф., Гайдукова Е. В., Коваленко В. В. Краткосрочный прогноз расходов воды на реках Колумбии с использованием фрактальной диагностики // Учен. зап. Рос. гос. гидрометеорол. ун-та. 2017. № 47. С. 16–24.

УДК 556.55+627.8

Оценка суммарной эмиссии метана с поверхности водохранилищ РФ по материалам глобальной БД и натурным наблюдениям

М. Г. Гречушникова (allavis@mail.ru)

МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва

Аннотация. Приведены результаты оценки суммарной эмиссии метана с водохранилищ РФ на основе классификации ее характерных значений для водохранилищ различных природных зон мира, дополненной материалами наблюдений автора. В качестве основного фактора предложено использовать величину коэффициента водообмена, характеризующего проточность водоемов, определяющую возможность возникновения в них бескислородных условий. Эмиссия с поверхности водохранилищ РФ оценивается в 0,53 Тг $\text{CH}_4/\text{год}$.

Ключевые слова: эмиссия метана, проточность, коэффициент водообмена, водохранилища.

Введение

Водоохранилища являются источником дополнительной эмиссии парниковых газов, в частности, метана [10]. Несмотря на наличие многих работ по оценкам эмиссии метана с их поверхности, данная проблема остается актуальной, поскольку эти оценки основаны на ограниченном числе данных и имеют довольно большой разброс: 69 Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [8], 95–122 Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [6], 2–4 Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [7], 4,8 Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [9], 17,9 Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [4]. Большой разброс оценок может быть связан как с переучетом суммарной площади водохранилищ (если расчет выполнен в том числе для зарегулированных озер), так и с отсутствием дифференциации водоемов по глубине и проточности. По данным архива из [6] интенсивность эмиссии метана существенно

различается в зависимости от возраста водохранилищ, их проточности, сезона наблюдений и многих других факторов [3; 11]. В России вопрос эмиссии метана с водохранилищ изучен недостаточно, имеются единичные полевые данные с результатами измерений потока метана [5].

Материалы и методы

Величина удельного потока метана с поверхности водохранилищ в атмосфере зависит от его потока из донных отложений, непосредственного образования в воде, поступления с поверхности водосбора (в том числе с притоками и в составе промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод), а также от окисления метана в водной толще и соотношения диффузионной и пузырьковой составляющей эмиссии [2; 7].

Для оценки эмиссии метана с поверхности искусственных водоемов России проведен анализ базы данных (БД) по интегральному потоку метана и его составляющим (диффузионному и пузырьковому потоку), использованной для оценки глобальной эмиссии с поверхности водохранилищ [4]. Важнейшими предикторами считаются возраст водохранилища и географическая широта, на которой расположен водоем, как характеристика климатических условий. В водохранилищах низких широт большие значения эмиссии метана наблюдаются из-за температурного фактора. В [4] отмечается важная роль первичной продукции, которая состоит в увеличении потока детрита на дно, являющегося источником метана. Однако при этом не учитывается то, что активный фотосинтез приводит к пересыщению поверхностного слоя кислородом, что может сокращать поток метана в атмосферу. Для уточнения полученных закономерностей данные по водохранилищам, использованные в статье [4], были разделены на 2 группы в зависимости от проточности водоема. Данный фактор ранее не рассматривался, между тем коэффициент водообмена зачастую определяет характер вертикального распределения температуры воды в водохранилищах и возникновение бескислородных условий. В водохранилищах сезонного регулирования стратификация устанавливается лишь периодически, бескислородные условия в придонном горизонте наблюдаются редко. Внутри каждой группы дальнейшее деление производилось в зависимости от климатических условий, в которых находился водоем (табл. 1). Анализ базы данных, выявил, что наибольшие значения удельного потока метана характерны для водохранилищ, испытывающих большой антропогенный пресс (например, находящиеся

в городской черте Lago de Guadalupe и Pampullha или маленькие мелководные водохранилища Nielisz и Rzeszów, испытывающие влияние урбанизированной и сельскохозяйственной территории). Данные объекты исключены из обобщения и расчета средних значений удельного потока метана для соответствующего типа климата, поскольку не могут являться репрезентативными. Имеющихся данных по натурным измерениям потока метана с поверхности водохранилищ весьма мало: 49 объектов в группе слабопроточных водохранилищ и 45 объектов в группе проточных водохранилищ, что ставит задачу дальнейшего измерения потока метана с водохранилищ перед научным сообществом.

Результаты и обсуждение

Согласно [1], суммарная площадь водохранилищ СССР объемом более 0,1 млн м³ за исключением зарегулированных озер, составляет 116 776 км². При этом не учитываются озера с зарегулированным водным режимом (Байкал, Онежское, Ильмень, Имандра, Ондозеро, Ковдозеро и др.).

На основании данных [1] и табл. 1 произведена оценка возможных значений эмиссии метана с поверхности искусственных водоемов на территории РФ (рис.1). При расчете учтено строительство Бурейского и Богучанского водохранилищ, не вошедших в справочник, и изменение административно-территориального деления. Наибольшая эмиссия метана (более 20000 тСН₄-С/год) характерна для таких субъектов РФ как респ. Татарстан, респ. Марий-Эл, Самарская, Саратовская, Нижегородская области, что связано с наличием крупных водохранилищ, относящихся к территории данных субъектов. Астраханская, Челябинская, Курская, Пензенская, Воронежская и Тамбовская области хотя и отличаются наибольшим количеством водохранилищ (более 80 каждая), но это преимущественно небольшие по площади водоемы, поэтому суммарная эмиссия для этих областей сравнительно невелика. Наименьшие значения эмиссии метана (менее 20 тСН₄-С/год) характерны для Омской, Псковской и Сахалинской областей, что обусловлено малым числом небольших водохранилищ или суровыми климатическими условиями.

По данным проведенной оценки суммарная годовая эмиссия с водохранилищ РФ составляет 0,4 Тг СН₄-С/год (0,53 Тг СН₄/год), т. е. 3 % от суммарной эмиссии по оценке, опубликованной в [4]. Суммарная площадь водохранилищ РФ составляет 17,7 % от площади водохранилищ, учтенной в [Там же] (без учета зарегулированных озер).

Осредненные значения удельной плотности потока метана для водохранилищ ($\text{мгCH}_4\text{-C}/(\text{м}^2\text{сут})$)
в различных климатических условиях с различным коэффициентом водообмена

Климатические условия	Кол-во водоемов в БД	Диапазон значений удельного потока, $\text{мгCH}_4\text{-C}/(\text{м}^2\text{сут})$	Средний удельный поток, $\text{мгCH}_4\text{-C}/(\text{м}^2\text{сут})$	Примечание	Зависимость от средней глубины
Кв менее 2					
Тропический климат	6	22–370	200,00	эвтрофныевдхр.	нет
<i>Тропический климат</i>	1	700,00		<i>вдхр. Lago de Guadalupe в черте г. Мехико*</i>	-
Тропический и субтропический климат	5	1,4–10	4,40	олиготрофные, глубина более 15 м	нет
	3	22–36	30,00	глубина менее 15 м	нет
Умеренный климат	12	0,1–3,3	1,30	олиготрофные преимущественно глубоководные водоемы, ср. глубина в группе 44 м	нет
	11	4,5–17	13,00	мезотрофно-эвтрофныевдхр (без учета мелководного вдхр. Lokka 91,3 $\text{мгCH}_4\text{-C}/\text{м}^2\text{сут}$)	нет
Умеренно-холодный климат средних широт	11	0,4–8	5,00	<i>без учета мелководного вдхр. Laforge-1 (20,5 $\text{мгCH}_4\text{-C}/\text{м}^2\text{сут}$)</i>	нет
Кв более 2					
<i>Тропический климат</i>	2	228,6, 591,3	-	<i>эвтрофные относительно мелководные вдхр, Н менее 20 м; Corumbá (с/х территории); Patupulha (в черте г. Белу-Оризонти)*</i>	-
Тропический климат	7	26–55	41,00		$f(H) = 56,13e^{-0,016x}$ $R^2 = 0,70$
Субтропический климат	5	2–15	8,00	мезотрофно-эвтрофныевдхр.	$f(H) = 113,1x^{-0,921}$ $R^2 = 0,62$
Умеренный климат	16	0,1–8,5	2,70	олиго-и мезотрофныевдхр.	$f(H) = 5,24x^{-0,747}$ $R^2 = 0,76$
	7	10–180	50,00	мезотрофные и эвтрофныевдхр, ср. глубина менее 25 м	$f(H) = 376,92x^{-1,07}$ $R^2 = 0,62$
	2	1623; 1720	-	<i>глубина менее 2 м (вдхр. Nielisz, Rzeszów), городская и с/х территория*</i>	-
Умеренно-холодный климат средних широт	6	0,02–18	8,00		$f(H) = 25,4e^{-0,13x}$ $R^2 = 0,67$

* Водоохранилища с аномальными значениями УПП метана, исключенные из расчета

Несмотря на многочисленные оценки глобальной эмиссии метана и попытки параметризации удельного потока метана для не охваченных наблюдениями водоемов, данный вопрос требует дальнейшего изучения. Приведенную оценку следует рассматривать как ориентировочную. Необходимо пополнять банк данных из [Там же] измерениями на разнотипных водохранилищах в различных природных зонах с учетом степени антропогенного воздействия и загрязнения водоемов.

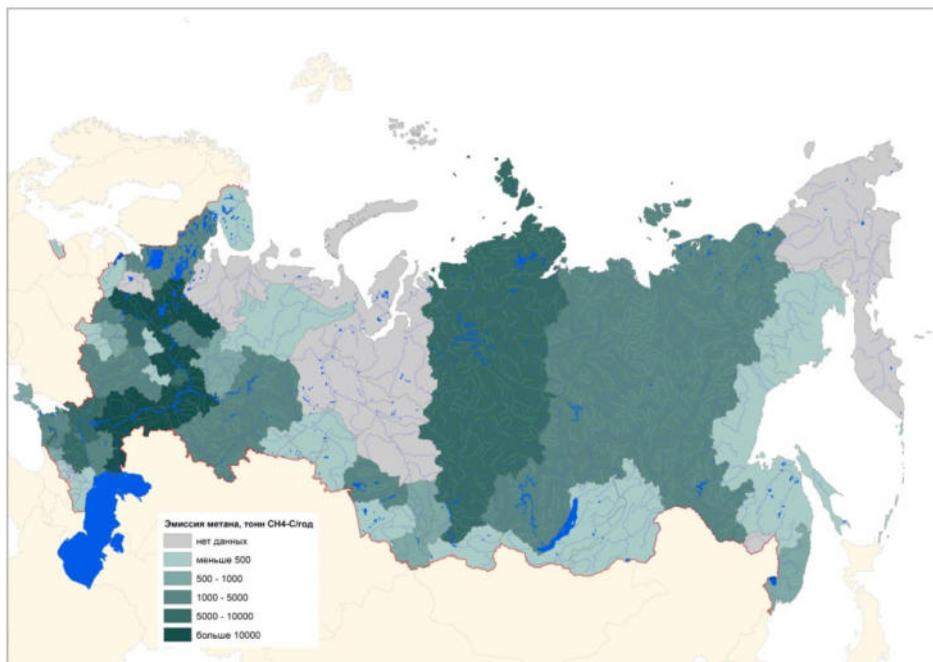


Рис. 1. Эмиссия метана с водохранилищ субъектов РФ, тонн CH_4 -С/год

Полевые измерения проведены в рамках проекта РФФИ-РГО (№ 17-05-41095), анализ и обобщение произведено в рамках темы 1.10 «Гидрологический режим водных объектов суши в условиях изменения климата и антропогенного воздействия» (ГЗ, номер ЦИТИС: АААА–А16–116032810054-3).

Автор выносит благодарность Д. И. Школьному за помощь в подготовке карты.

Список литературы

1. Справочник водохранилищ СССР. Ч. 1: Водохранилища объемом 10 млн³ и более. М.: Союзводпроект, 1988. 323 с.
2. Метан в водных экосистемах / Ю. А. Федоров, Н. С. Тамбиева, Д. Н. Гарькуша, В. О. Хорошевская. Ростов н/Д. М.: Ростиздат, 2005. 329 с.
3. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude / N. Barros, J. J. Cole, L. J. Tranvik, Y. T. Prairie, D. Bastviken, P. A. del Giorgio, F. Roland, VLM. Huszar // *Nature Geoscience*. 2011. N 4. P. 593–596.
4. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis / B. R. Deemer, J. A. Harrison, S. Li, J. J. Beaulieu, T. DelSontro, N. Barros, J. F. Bezerra-Neto, S. M. Powers, M. A. dos Santos, J. A. Vonk // *BioScience*. 2016. Vol. 66, N 11. P. 949–964. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw117>.
5. Reservoir Greenhouse Gas Emissions at Russian HPP / M. P. Fedorov, V. V. Elistratov, V. I. Maslikov, G. I. Sidorenko, A. N. Chusov, V. P. Atrashenok, D. V. Molodtsov, A. S. Savvichev, A. V. Zinchenko // *Power Technology and Engineering*. 2015. Vol. 49, N 1. P. 33–36. doi: 10.1007/s10749-015-0569-3/.
6. Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower // *Nature*. 2006. Vol. 444. P. 524–525.
7. Methane emissions from large dams as renewable energy resources: a developing nation perspective / I. Lima, F. Ramos, L. Bambace, R. Rosa // *Mitigation Adaptation Strategy Global Change*. 2006. Vol. 13. P. 1381–1386.
8. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate / V. L. Louis, C. A. Kelly, E. Duchemin, J. W. M. Rudd, D. M. Rosenberg // *Bioscience*. 2000. Vol. 50. P. 766–775.
9. Greenhouse Gas Emissions from Reservoirs / O. Varis, M. Kumm, S. Härkönen, J. T. Huttunen // Tortajada C., Altinbilek D., Biswas A. (eds.) *Impacts of Large Dams: A Global Assessment*. Water Resources Development and Management. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. P. 69–94.
10. Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments. Environmental Science Series / A. Tremblay, L. Varfalvy, C. Roehm, M. Garneau (eds.). New York: Springer, 2005. 732 p.
11. [UNESCO-IHA] International Hydropower Association, United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization. 2010. GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs. IHA. (23 August 2016; www.hydropower.org/ghg-measurement-guidelines). 2012. GHG Risk Assessment Tool (Beta Version) User Manual. IHA. (23 August 2016; www.ceeg.uqam.ca/Prairie/Publications_files/USER%20MANUAL-Risk%20Assessment%20Tool%20-%20BetaVersion.pdf).

УДК 532.517.3+504.47

Протаивание и береговая эрозия рек на повороте русла в условиях криолитозоны

И. И. Грицук (grizli2881@mail.ru)^{1,2,3}О. Я. Масликова (oksana68@mail.ru)¹Д. Н. Ионов (dima_ionov@mail.ru)¹Е. Н. Долгополова (dolgopolova@gmail.com)¹¹ Институт водных проблем РАН, г. Москва² Российский университет дружбы народов, г. Москва³ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва

Аннотация. В результате оттаивания криолитозоны происходит смещение на север границы между непрерывной и прерывистой зонами вечной мерзлоты, и как следствие – изменяется физическое состояние береговой линии рек, протекающих в пограничных областях. Сезонное оттаивание-промерзание в данный момент имеет иную степень глубины и иные временные рамки, чем это было 20–30 лет назад. Лабораторией динамики русловых потоков и ледотермики ИВП РАН предложена модель деформации берегового склона рек, в том числе и меандрирующих, в данных меняющихся условиях.

Ключевые слова: криолитозона, изменение климата, эрозия берегов, протаивание, поворот русла.

Введение

В настоящее время криолитозона представляет собой самую физически неустойчивую систему. Причина не только в том, что снег и лед, преобладающие на её территории и входящие в состав грунтов, являются крайне нестабильными твёрдыми веществами по причине непосредственной зависимости от температуры, а также в том, что потепление спровоцировало тенденцию оттаивания мерзлоты на большей части её территории, причем не только в зоне прерывистой мерзлоты. Наблюдения последних 20–30 лет [6] показали, что мерзлота оттаивает в определенных ландшафтных условиях в южной части своих прежних границ на европейском севере и на северо-западе Сибири. В результате происходит смещение на север границы между сплошной и прерывистой зонами вечной мерзлоты. Физическое состояние береговой линии рек, принадлежащих к зоне смещения этой границы, изменяется, оттаивание-промерзание в настоящий момент имеет иную степень глубины и иные временные интервалы. Всё это влияет на устойчивость имеющихся гидротехнических сооружений и должно

учитываться при строительстве в дальнейшем. При проектировании речных гидротехнических сооружений необходимо учитывать как сложившиеся, так и спрогнозировать возможные положение и состояние русла. Такой прогноз позволяет повысить надежность проектируемых конструкций. Лабораторией динамики русловых потоков и ледотермики ИВП РАН предложена модель деформации берегового склона рек, в том числе и меандрирующих, в данных меняющихся условиях.

Обзор литературы

Исследования последних лет показывают, что динамика мерзлоты в России изменяется в зависимости от региона. Отмечено, что среднегодовые температуры воздуха были значительно меньше в Северной Европе, чем в Центральной Якутии и Западной Сибири. Однако повышение температуры вечной мерзлоты в европейской части России было в несколько раз больше, чем в Центральной Якутии, и было сопоставимо с таковыми в Западной Сибири. Одной из причин этих различий может быть большее увеличение атмосферных осадков в европейской части России. Максимальное увеличение глубины снежного покрова в последние десятилетия отмечалось также в западной части российской Арктики. Этот регион является одним из наиболее уязвимых для будущего потепления. В обозримом будущем в этом регионе можно ожидать значительной деградации вечной мерзлоты.

Также потепление привело к оттаиванию невозмущенной ранее вечной мерзлоты в районах, близких к южной границе зоны вечной мерзлоты. Наиболее заметное оттаивание произошло в районах Воркуты и Уренгоя, где в нескольких местах длительное оттаивание привело к возникновению новых закрытых таликов [5], а глубина мерзлоты за 30 лет снизилась на 8,6 м. Здесь же недавно возникший изолированный талик слился с существующим боковым таликом, и увеличился почти до 16 м. В целом, существовавшие ранее изолированные талики за 30 лет распространились в глубину от 0,6 до 6,7 м в зависимости от их генетического типа, географического положения, содержания льда и состава отложений, а также гидрологических, гидрогеологических и других факторов. В целом, наблюдается смещение южной границы вечной мерзлоты на несколько десятков километров к северу.

Криолитозона также деградирует в Надымском и Уренгойском районах исследований, где мерзлота оттаивает в лесных и кустарниковых областях и образует замкнутые талики.

Многие исследования эрозии берегов северных рек посвящены решению проблем гидротехнического строительства и берегоукрепле-

ния в криолитозоне. Ещё Маккавеев писал, что на размыв берегов и боковую эрозию рек сильно влияют также процессы, связанные с оттаиванием вечной мерзлоты и погребенного льда под воздействием речной воды [12]. К. Scott [7] проводил натурные исследования рек на севере Аляски в период ежегодного весеннего паводка. Многолетняя мерзлота была названа им как причиной крайней стабильности, так и необычной нестабильности на территории криолитозоны. Считалось, что вечная мерзлота упрощает изучение процессов, происходящих на реках северных регионов, за счет его влияния на свойства почв. Однако это привело к спектру несогласованных результатов.

Лоулер опровергал теорию о большей устойчивости мерзлых грунтов, придя к выводу в своих исследованиях, что меньшая речная эрозия происходит в незамерзающих регионах. Он отмечал, что критическое разрушение структуры материала берега часто происходит зимой с последующим обрушением в периоды потепления. Меньшая речная эрозия происходит в незамерзающих регионах, что опровергает теорию о большей устойчивости мерзлых грунтов [3].

Роль изменяющихся климатических условий при деградации мерзлоты была исследована на границе сплошной и прерывистой вечной мерзлоты в нижнем течении Енисея в [8]. Измерения температуры почвы, мониторинг мерзлоты и анализ спутниковых изображений показали, что повышение температуры воздуха за последние сорок лет привело к снижению степени зимнего промерзания и деградации мерзлоты. В криолитозоне происходит увеличение влагоемкости почв и возрастание количества незамерзших грунтовых вод в зимние месяцы. Зимние выбросы в стоки рек зависят от количества летних осадков, так как постепенное снижение толщины слоя сезонного промерзания позволяет накапливать достаточное количество влаги в течение зимнего периода. Влияние изменения климата на деградацию мерзлоты было описано также в [9] для озер-водосборников, где было показано, что в идеальном сценарии значительное увеличение сброса подземных вод в потоки, вероятно, произойдет в ответ на деградацию вечной мерзлоты из-за климата.

Термоэрозионный размыв берегов арктических рек в условиях криолитозоны обусловлен совместным действием термической и механической составляющих движущейся воды [11]. В [1] сообщается об обнаружении большого термоэрозионного туннеля, который сформировался на северо-востоке Гренландии летом 2015 г. Хотя информации было недостаточно, данное исследование дает представление о редком событии, влияющем на вечную мерзлоту, местную геоморфо-

логию и среду обитания. С усилением климатических изменений в арктических регионах прогнозируется повышенная деградация вечной мерзлоты и увеличение температуры воды в реках, что повышает потенциал развития термоэрозийной ниши и связанного с ней обрушения берега. Это изменение может иметь значительные последствия для физико-химической среды и, в свою очередь, потоков бентосных сообществ путем изменения условий водной среды обитания.

Роль льдистости в составе материала склона рек была рассмотрена в статье [4], где были представлены уникальные данные о тепловых режимах речных берегов, а также редкая информация о морфологических свойствах и характеристиках игольчатого льда. Были идентифицированы четыре механизма прямого переноса игольчатого ледяного осадка на берегах рек: прямое осаждение частиц, русловые осадки, скользящие откаты и обрушения. Тем не менее подчеркивается косвенная подготовительная роль игольчатого льда и усиленная речная эрозия, связанная с предшествующим замораживанием материала берега.

Также роль льдистости была изучена в [2], где в лабораторных экспериментах исследовали влияние содержания льда и механического воздействия потока воды на оттаивание и эрозию невязких мерзлых грунтов. Было идентифицировано критическое содержание льда, выше которого термическая эрозия приводит к абляции. Модель абляции применима к рекам с несвязным материалом берегов, высоким содержанием льда и подвержена воздействию скоростей потока. Эти результаты применимы только к предварительно замороженным пескам, так как даже небольшой процент связующего материала изменит описанные зависимости.

Результаты исследования

Ранее [12] авторами была получена формула для транспортирующей способности водного потока с учетом изменения льдистости:

$$S = 2,4 * 10^{-9} \frac{U^3}{ghw(i^2 + 10^{-6})}, \quad (1)$$

где S – количество смытого с участка вещества, U – средняя скорость потока, h – глубина потока, w – гидравлическая крупность незамерзшего материала, i – льдистость за счет ледяных включений в долях единицы (д. е.).

Из формулы транспорта наносов (1) и формулы Дарси-Вейсбаха для потока на склоне с учетом льдистости получаем формулу размыва твердого вещества поверхностным стоком [13]:

$$S = \frac{6 \cdot 10^{-9}}{w(i^2 + 10^{-6})} \frac{\sqrt[3]{gq_{ск}}}{\lambda^{4/3}} tg \propto^{4/3}, \quad (2)$$

где $q_{ск}$ – удельный расход склонового потока; λ – коэффициент сопротивления, или потери энергии на трение по длине – определяется экспериментально, α – тангенс угла наклона берега.

Протаивание и размыв

Наиболее полное теоретическое исследование движение фронта протаивания в зависимости от глубины размыва талого грунта для различных скоростей движения фронта эрозии проведено в работе [15]. Там же установлены закономерности процесса. При увеличении скорости фронта эрозии (рис.1) происходит увеличение скорости фронта протаивания. При этом рост скорости фронта эрозии приводит к уменьшению толщины талой прослойки.

При росте льдистости мерзлых грунтов скорость движения фронта протаивания замедляется, толщина талой прослойки уменьшается.

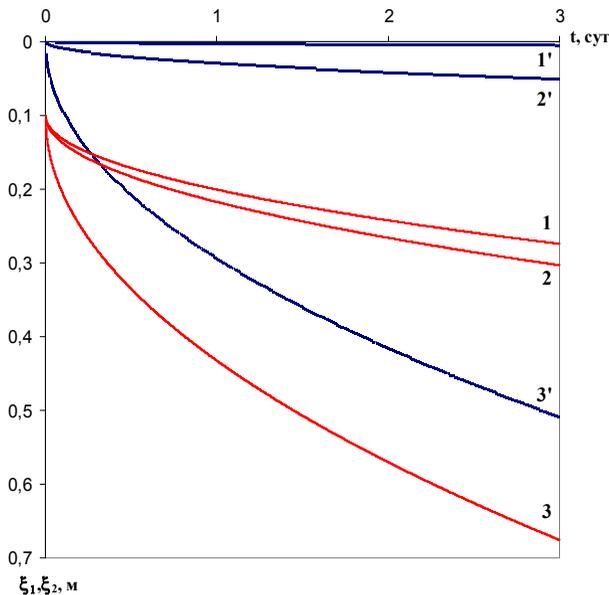


Рис. 1. Динамика фронтов эрозии (1', 2', 3') и протаивания (1, 2, 3) при различных значениях коэффициента теплопроводности

Характеристики потока на повороте русла

Поворот русла вызывает перераспределение скоростей по ширине и вертикалям живого сечения. Анализ показывает [14], что в результате появления поперечного уклона поверхности воды в начале закругления максимум скорости перемещается к внутреннему, выпуклому берегу. В общем случае распределение скоростей по ширине (в цилиндрических координатах) при входе в закругление, очерченное по дуге круга, выражается формулой

$$v_{\Theta} \quad (3)$$

где r – большой радиус, v_0 – средняя по вертикали скорость перед закруглением, v_{Θ} – соответствующая ей скорость на закруглении, Θ – угол, отсчитываемый от начала закругления.

Постоянную величину c можно определить из условия неразрывности, т. е. из равенства расходов Q жидкости перед закруглением и на нем:

$$Q = \int_{r_{\text{вн}}}^{r_{\text{нар}}} v_0 h dr = \int_{r_{\text{вн}}}^{r_{\text{нар}}} \frac{h}{r} \sqrt{\int r^2 \frac{d(v_0^2)}{dr} dr} + c, \quad (4)$$

где $r_{\text{вн}}$ и $r_{\text{нар}}$ – радиусы соответственно выпуклого и вогнутого берегов, h – глубина по вертикали.

В самом закруглении благодаря вызванному поперечной циркуляцией обмену количеством движения между плановыми струями потока происходит перераспределение скоростей и максимум скорости постепенно перемещается к наружному, вогнутому берегу. При выходе из закругления, где центробежная сила и поперечный уклон уже не действуют, вертикаль с максимумом скорости оказывается на значительном протяжении у самого продолжения вогнутого берега.

Подставляя эти скорости в уравнение для размыва с учетом льдистости для криолитозоны (2), можно получить величины размыва для вогнутого $S_{\text{нар}}$ и выпуклого $S_{\text{вн}}$ берега. С учетом поперечной циркуляции и донного переноса наносов от внешнего к внутреннему берегу можно в общем для участка считать $S_{\text{нар}}$ по формуле (3), а в случае внутреннего берега к размыву $S_{\text{вн}}$ прибавлять намыв с противоположного берега $S_{\text{нар}}$ с учетом сдвижки по течению, равной средней скорости потока на закруглении.

Лабораторный эксперимент

Преимущества лабораторного эксперимента перед натурным заключается в том, что мы можем изменять различные входные параметры модели, корректировать необходимые свойства и размеры материала, сделать замеры по окончании эксперимента, удалив воду.

В гидравлической лаборатории РУДН была проведена серия экспериментов с замороженным грунтом различной льдистости и с различным углом уклона для определения влияния потока на темпы эрозии.

В прямоугольном лотке циркуляционного действия были проведены экспериментальное исследование связи протаивания подводного склона и темпов береговой эрозии.

Эксперименты проводились для смоченного замороженного грунта (аналог подводного склона в условиях криолитозоны) и для естественного замороженного (аналог надводного склона в тех же условиях). Были проведены замеры оттаивания и эрозии в течении времени, построены графики протаивания грунта различной заморозки и графики размыва для каждого эксперимента в зависимости от времени. Полученные графики однозначно интерполируются логарифмической зависимостью. Логарифмическая аппроксимация этих зависимостей представлена на рис. 2.

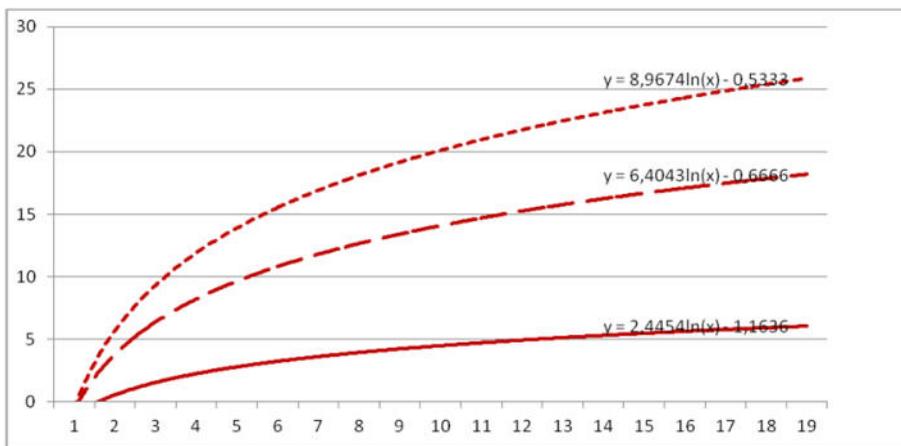


Рис. 2. Движение фронта протаивания (логарифмическая аппроксимация) – пунктирная линия – для смоченного грунта, точечная – для естественного влажного; сплошная линия – движение фронта эрозии

Из графиков видно, что начало эрозии (размыва) происходит спустя некоторое время после начала протаивания, а скорость эрозии значительно отстает от скорости протаивания минимум в два раза. Протаивание замороженного естественного грунта и замороженного смоченного (например, такой грунт образуется ниже уреза воды в самом потоке, замерзая вместе с ним) отличаются примерно в полтора раза.

Как было отмечено в [15], закон движения поверхности эрозии определяется из соотношения $\xi_1(t) = a\sqrt{t}$, где a – коэффициент температуропроводности, а закон движения поверхности плавления мерзлого грунта из уравнения $\xi_2(t) = \sqrt{\beta t}$. Построим те же графики от \sqrt{t} (час), получаем рис. 3.

Как видно из графиков, кривые теперь интерполируются линейной зависимостью. Коэффициент этой линейной зависимости для графика эрозии будет как раз коэффициент температуропроводности, (в нашем случае – примерно 0,6, что соответствует пескам с суммарной влажностью 0,1). Свободный член 0,66 нам дает корень квадратный из времени запаздывания, т. е. времени, после которого начинается эрозия. В нашем случае это $0,66^2=0,44$ часа, что соответствует 26 минутам. Действительно, примерно первые полчаса наблюдений размыва не происходило.

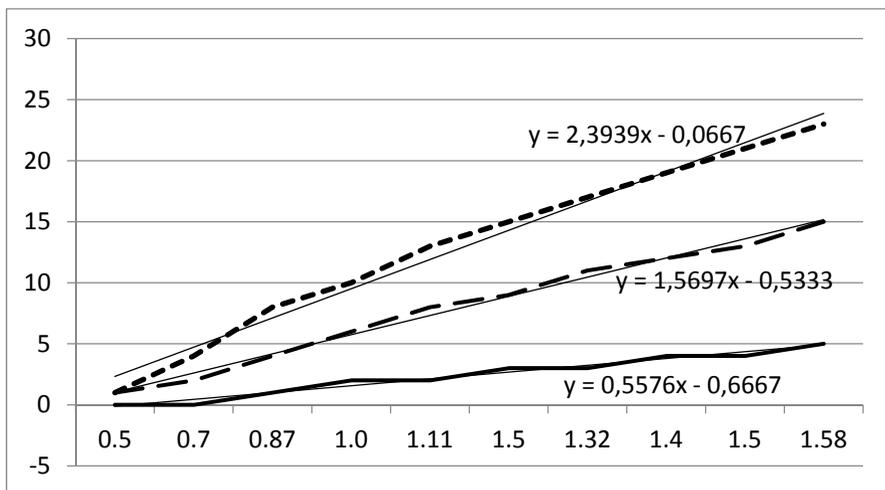


Рис. 3. Зависимость эрозии (сплошная линия) и протаивания (пунктирная линия – естественный грунт, точечная – смоченный) от \sqrt{t} (час)

Коэффициент на верхних кривых – это коэффициент $\sqrt{\beta}$, который нам удалось получить экспериментально.

Также был проведен эксперимент в круговом лотке, который имитировал изгиб русла на повороте. Хотя скорость протаивания смоченного и замороженного грунтов отличается, размыву подвергается только участок, находящийся в воде (рис. 4). Верхняя, надводная часть склона, подвергалась проседанию. При наличии потока движущейся воды береговой склон будет подвергаться механическому воздействию. После проведения эксперимента, когда вода была слита, можно наблюдать размытую подводную часть склона на внешнем «берегу» кругового канала. Величина и характер размывания в зависимости от льдистости полностью описывается формулой (1). В том месте, где поток соприкасался с грунтом, произошел значительный размыв. Скорость размыва значительно усилилась после увеличения скорости потока в лотке.

На воду в закругленных потоках действует центробежная сила (на поворотах русла). Центробежная сила действует от центра по радиусу поворота. Таким образом, основной напор приходится на внешний радиус, или на вогнутый склон.



Рис. 4. Ниша вымывания замороженного склона

В том месте, где поток соприкасался с грунтом, произошел значительный размыв. На участке, который не был покрыт снегом, оттаявшая выше уровня воды порода подвергалась воздействию температуры окружающей среды и разрушению за счет протаивания и образования склоновых потоков. Поэтому представляет интерес исследова-

ние термоэрозионных процессов с учетом взаимосвязи гидромеханических и теплофизических аспектов.

Заключение

Наблюдения последних лет указывают на очевидную тенденцию оттаивания криолитозоны на территории России, причем не только в зоне прерывистой мерзлоты. Потепление затронуло и те регионы, которые принадлежат к непрерывной мерзлоте. Мерзлота оттаивает в определенных ландшафтных условиях в южной части своих прежних границ на европейском севере и на северо-западе Сибири. В процессе экспериментальных наблюдений выявлен механизм термоэрозионного размыва замороженного грунта, что соответствует деформациям берегов рек, протекающих в условиях распространения ММП.

В результате исследования получены следующие выводы:

- Протаивание и эрозия мерзлых берегов водных объектов пропорциональны квадратному корню от времени. Линейный коэффициент зависит от характера породы, льдистости, температуры окружающей среды и температуры потока.

- Переработка мерзлых берегов происходит в основном путем вытаивания и вымывания грунтов нижней части берега в виде ниши и нависания над ней верхней части берега в виде уступа.

- Скорость эрозии значительно отстает от скорости протаивания минимум в два раза. Протаивание замороженного естественного грунта и замороженного смоченного (например, такой грунт образуется ниже уреза воды в самом потоке, замерзая вместе с ним) отличаются примерно в полтора раза.

- Основным фактором, влияющим на эрозию и протаивание, является водный поток, его скорость и температура. Температура грунта, воздуха и солнечная радиация оказывают гораздо меньшее влияние.

- Для участков поворота русла получена система уравнений для расчета скорости размыва вогнутого берега и размыва плюс намыва противоположного, выпуклого.

Работа выполнена в рамках темы № 0147-2019-0001 (№ государственной регистрации АААА-А18-118022090056-0) Государственного задания ИВП РАН и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-05-00178)

Список литературы

1. Large thermo-erosional tunnel for a river in northeast Greenland Catherine / L. Docherty, David M. Hannah, Tenna Riis, Simon Rosenhøj Leth, Alexander M. Milner // *Polar Science*. 2017. Vol. 14. P. 83–87. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2017.08.001>.
2. Effects of Ice Content on the Thermal Erosion of Permafrost / L. Dupeyrat, F. Costard, R. Randriamazaoro, E. Gailhardis, E. Gautier, A. Fedorov // *Implications for Coastal and Fluvial Erosion, Permafrost and Periglacial Processes*. 2011. Vol. 22, Is. 2. April/June. P. 179–187. DOI: 10.1002/ppp.722.
3. *Lawler D. M.* River Bank Erosion and the Influence of Frost: A Statistical Examination // *Transactions of the Institute of British Geographers*. 1986. Vol. 11, N 2. P. 227–242. DOI: 10.2307/622008.
4. *Lawler D. M.* Needle ice processes and sediment mobilization on river banks: the River Ilston, West Glamorgan, UK // *Journal of Hydrology*. 1993. Vol. 150, Is. 1. P. 81–114. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90157-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90157-5).
5. *Oberman N. G.* 2008. Contemporary permafrost degradation of the European north of Russia. In: *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost*. Edited by Kane DL and Hinkel KM. Fairbanks. Institute of Northern Engineering.
6. Thermal State of Permafrost in Russia / V. E. Romanovsky [at al.] // *Permafrost and Periglacial Process.*, 21: 136–155 (2010), DOI: 10.1002/ppp.683.
7. *Scott K. M.* Effect of Permafrost on Stream Channel Behavior in Arctic Alaska, Geological Survey Professional Paper 1068. 1978. Library of Congress Catalog – card No 78-600058.
8. Permafrost hydrology in changing climatic conditions: seasonal variability of stable isotope composition in rivers in discontinuous permafrost / D. Streletskiy, N. Tananaev, T. Opel, N. Shiklomanov, K. Nyland, I. Streletskaya, I. Tokarev, A. Shiklomanov // *Environmental Research Letters*. 2015. Vol. 10, N 9. doi:10.1088/1748-9326/10/9/095003.
9. Xiqiang Wang, Rensheng Chen, and Yong Yang, Effects of Permafrost Degradation on the Hydrological Regime in the Source Regions of the Yangtze and Yellow Rivers. China, Water. 2017. 9. 897. doi:10.3390/w9110897.
10. Лабораторное исследование снеготаяния как составляющей сезонного процесса деформаций русла / И. И. Грицук, В. К. Дебольский, О. Я. Масликова, Н. К. Пономарев, Е. К. Синиченко // *Вестн. РУДН. Сер. Инженер. исслед.* 2013. № 3. С. 83–91.
11. Моделирование деформаций русел, сложенных мерзлыми породами, при повышении температуры окружающей среды / Е. И. Дебольская, В. К. Дебольский, И. И. Грицук, О. Я. Масликова, Д. Н. Ионов // *Лед и снег*. 2013. № 1(121). С. 104–110.
12. *Маккавеев Н. И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М. : Геогр. фак. МГУ. 2003. 355 с.
13. *Масликова О. Я., Козлов Д. В.* Влияние зимних и весенних условий на размыв рек в криолитозоне // *Природообустройство*. 2014. № 1. С. 54–59.
14. *Розовский И. Л.* Движение воды на повороте открытого русла. Киев : Изд. АН УССР, 1957. 188 с.
15. *Хусаинова З. Р.* Теоретическое исследование процессов термоэрозии и термокарста многолетнемерзлых пород : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Уфа, 2007.

УДК 574.52

Моделирование многолетних изменений экологического состояния стратифицированного водохранилища

Ю. С. Даценко (yuri0549@mail.ru)

В. В. Пуклаков (puklakov@mail.ru)

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва

Аннотация. По результатам математического моделирования анализируются многолетние изменения экологических переменных – биомассы фитопланктона, концентраций фосфатов и аммонийного иона в Можайском водохранилище. Выявлены тенденции увеличения продуктивности экосистемы водохранилища за 55-летний период. Показано, что увеличение продуктивности приводит к росту роли внутренней нагрузки водохранилища по фосфору.

Ключевые слова: моделирование, Можайское водохранилище, фитопланктон, фосфаты, аммонийный ион, внутренняя нагрузка.

Введение

Современный уровень изучения экосистем водоемов характеризуется сравнительно высокой степенью математизации. Достиженные представления о механизмах функционирования экосистем и процессов формирования качества воды в водоемах дают возможность разрабатывать широкий спектр моделей. К настоящему времени уже создано большое число моделей практически во всех направлениях водно-экологических исследований. При описании процессов в водоемах сложные структурные взаимосвязи в экосистеме воспроизводятся с учетом пространственно-временной изменчивости ее компонентов в зависимости от комплекса внешних воздействий. Подобные модели относятся к классу имитационных и разрабатываются на основе законов сохранения и превращения веществ, включают наиболее существенные характеристики окружающей водоем среды. Общепринятой методологии и общих методов моделирования трансформации различных элементов водных экосистем пока не существует. Однако все модели направлены на достижение одной цели – адекватного описания пространственно-временных изменений характеристик экосистем и механизмов их функционирования. Наиболее важной практической задачей моделирования была и остается задача оценки изменений качества воды под влиянием природных и антропогенных воздействий и разработка основ управления продукционными процессами и качеством воды в водоемах и водотоках.

Особенно актуальны эти задачи для водохранилищ многолетнего регулирования стока, характеризующихся большими диапазонами колебаний уровня, зависящих от речного притока и режима регулирования стока гидроузлом. Для относительно глубоких водохранилищ многолетнего регулирования стока в вегетационный период характерна стратификация водной толщи, оказывающая существенное влияние на характер внутриводоемного круговорота органических и биогенных веществ. Особенности этого круговорота в отдельные годы в значительной степени зависят от синоптических процессов в вегетационный период и определяют процессы первичной продуктивности и формирования качества воды. При отсутствии длинных и однородных рядов гидрохимических и гидробиологических наблюдений эффективным инструментом для анализа многолетних изменений и тенденций показателей экологического состояния водохранилища может служить математическое моделирование.

В настоящей работе многолетние изменения экологического состояния водохранилища анализируются по результатам математического моделирования гидрологического режима подмосковного Можайского водохранилища за 55-летний период его эксплуатации. В качестве характеристик экологического состояния водохранилища выбраны показатели биомассы фитопланктона, концентрации биогенных веществ и составляющие фосфорного баланса водохранилища.

Материал и методы

Для моделирования гидрологического режима Можайского водохранилища была использована математическая квазидвумерная боксовая модель водохранилища ГМВ-МГУ, гидрологическая основа которой представлена моделью тепломассообмена ТМО [3], а экологический блок – адаптированным применительно к условиям средней полосы России алгоритмом модели CE-QUAL-R1 [5], описывающим взаимосвязи химических и биологических характеристик водной массы в экосистеме водохранилища. Наиболее детальное описание алгоритма ГМВ-МГУ и ее верификации можно найти в монографии [1].

Анализ применения модели ГМВ-МГУ для расчетов гидрологического режима различных водохранилищ Московского региона за отдельные годы показал вполне удовлетворительные результаты при условии тщательной подготовки (проверки на репрезентативность и достоверность) необходимых для расчетов исходных данных.

Модель позволяет выполнять расчеты по оценке режима основных показателей экологического состояния водоема, развития фитопланктона, их вертикального распределения в водной толще различных частей водохранилища и их значений в воде, поступающей в нижний бьеф гидроузла.

Для моделирования многолетних изменений была разработана методика подготовки файла текущих исходных данных с суточным разрешением. Методика основана на анализе данных гидрологических ежегодников за 1956–1985 гг., данных метеостанции г. Можайск и Можайского гидроузла за 1961–2015 гг., данных комплексных балансовых исследований Лаборатории по изучению водохранилищ в 1983–1984 гг. и 2012 г. Она позволяет при минимуме исходной информации режимных наблюдений на метеостанции и гидроузле получать значения расходов притока воды в водохранилище по основным рекам и среднесуточные значения гидрохимических характеристик состава воды притоков. На основе этой методики был сформирован файл текущих исходных данных за период 1961–2015 гг., который включает в себя всю необходимую для расчета информацию. Верификационный расчет за 55-летний период показал, что модель вполне адекватно отражает гидрологический режим Можайского водохранилища, включая его ледовый, термический и гидрохимический режим, в течение всех расчетных лет.

Результаты и обсуждение

Рассчитанные по модели многолетние изменения концентраций фосфатов, аммонийного азота и биомасс фитопланктона в нижнем бьефе Можайского водохранилища представлены на рис. 1.

Четко выраженный рост концентраций фосфатов сопровождается примерно таким же ростом суммарной биомассы фитопланктона. Рост концентраций аммонийного азота не так ярко выражен, что подтверждает существующие представления о том, что антропогенные потоки фосфора в окружающей среде растут заметно быстрее, чем азота [4].

Рост концентраций биогенных веществ в водохранилище в целом связан с увеличением антропогенной нагрузки, однако характер многолетних изменений фосфатов показывает, что в последние годы этот рост постепенно сменяется спадом. Простое разбиение анализируемого интервала изменений на два примерно равных периода (до 1990 г. и после) демонстрирует появление такого перелома (рис. 2)

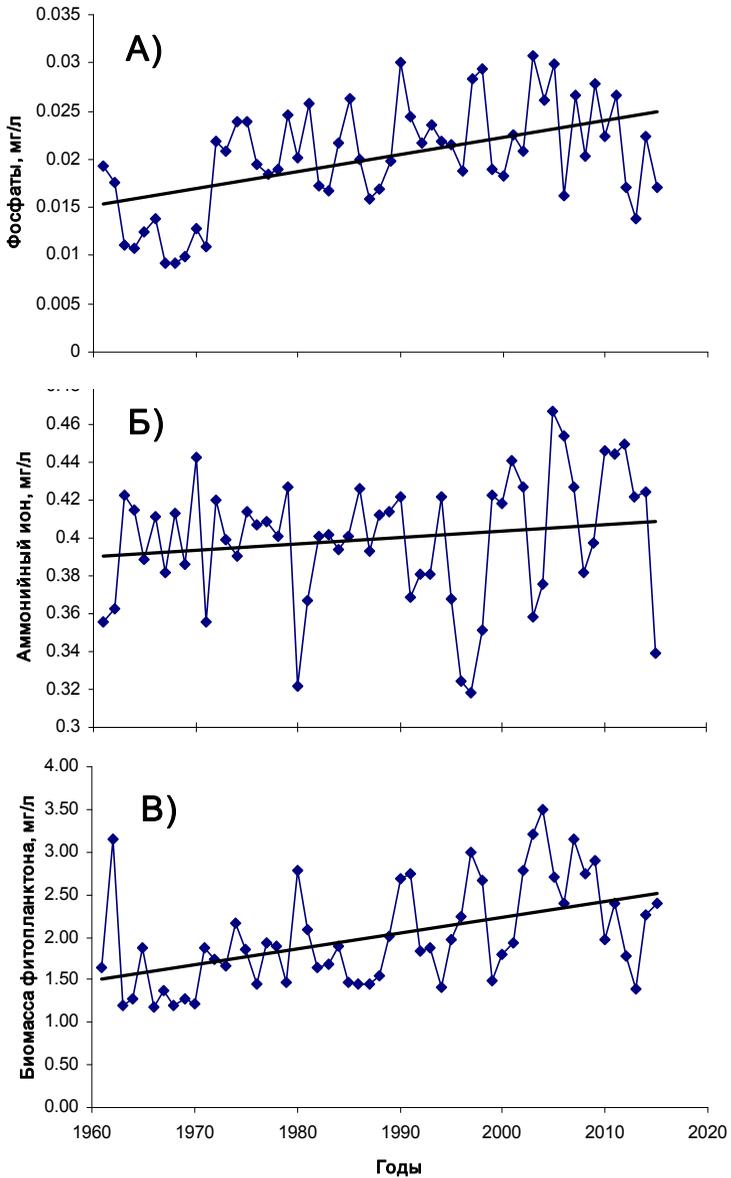


Рис. 1. Многолетние изменения концентраций фосфатов (А), аммонийного иона (Б) и суммарной биомассы фитопланктона (В) в приплотинном плесе Можайского водохранилища по результатам модельного расчета

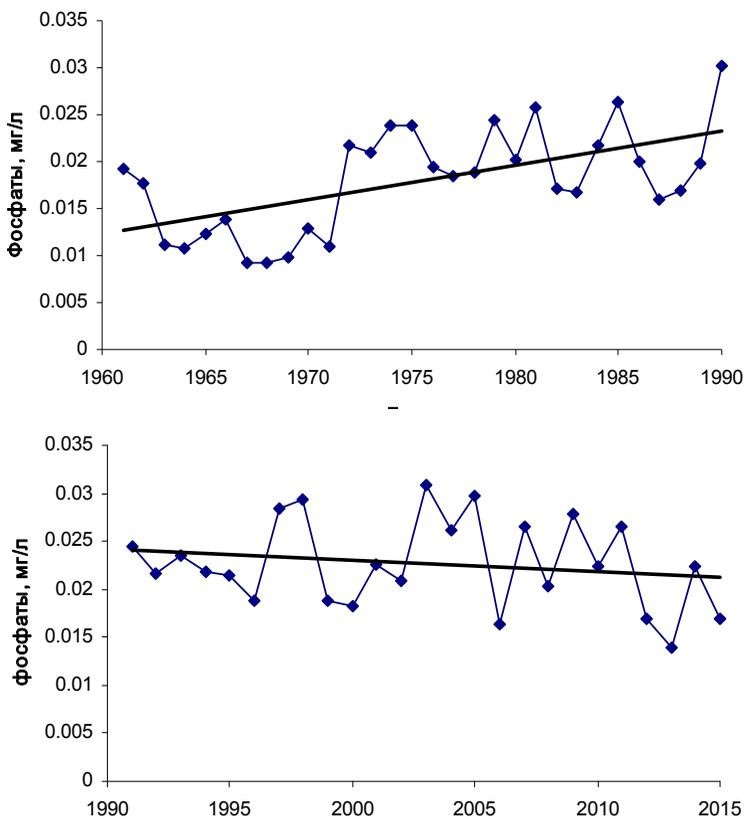


Рис. 2. Тенденции изменения концентраций фосфатов в Можайском водохранилище за различные периоды

Однако при явно выраженном спаде концентраций фосфатов высокий уровень продуктивности водохранилища в последние годы продолжает сохраняться. Причина в том, что многолетний рост продуктивности экосистемы водохранилища привел к изменению структуры баланса фосфатов. Анализ многолетних изменений составляющих баланса показывает, что за время существования водохранилища наблюдался постоянный рост внутриводоемных потоков фосфатов из донных отложений. Рост внутренней нагрузки однозначно связан с ростом продуктивности и тенденциями изменения кислородного режима водохранилища, появлением и усилением зон аноksии в придонных слоях [2]. По-

видимому, это возрастание внутренней нагрузки способствует поддержанию высокого трофического уровня водохранилища.

Выводы

Моделирование гидроэкологического режима Можайского водохранилища позволило выявить многолетние тенденции изменения основных показателей его экологического состояния. Установлено, что наметившийся спад концентраций фосфатов компенсируется возрастанием внутренней фосфорной нагрузки водохранилища.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ. Проект 18-05-01066.

Список литературы

1. Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) / под ред. К. К. Эдельштейна. М. : Перо, 2015. 286 с.
2. Даценко Ю. С., Пуклаков В. В., Ерина О. Н. Модельная оценка влияния внутриводоемных процессов на экологическое состояние стратифицированных водохранилищ // Вода: Химия и экология. 2014. № 9. С. 9–14.
3. Пуклаков В. В. Гидрологическая модель водохранилища : рук. для пользователей. М. : ГЕОС, 1999. 99 с.
4. Эволюция круговорота фосфора и эвтрофирование природных вод. Л. : Наука, 1988. 203 с.
5. CE-QUAL-R1: A numerical one-dimensional model of reservoir water quality; User's manual. Instruction Report E-82-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station Environmental Laboratory. Vicksburg, Miss., 1986. 508 p.

УДК 556.537

Математическое моделирование деформации криволинейных русел, подверженных термоэрозии

Е. И. Дебольская (e_debolskaya@yahoo.com)

Институт водных проблем РАН, г. Москва

Аннотация. Работа посвящена исследованию зависимости деформационных процессов в руслах рек, протекающих в условиях криолитозоны, от динамического и термического воздействия водного потока. Временные масштабы влияния этих факторов на береговые деформации значительно различаются. Тепловая составляющая оказывает основное воздействие на состояние грунта берегов водохранилищ, грунтовых плотин и их оснований, тогда как в нижних бьефах более существенную роль должна играть динамика гидравлических характеристик потока, но при этом нельзя также не учитывать и возможные изменения характеристик грунта, вызванные климатическими, более крупномасштабными временными изменениями. Учет очень большого количества факторов, определяющих исследуемые процессы, возможен только с помощью математического моделирования, однако в настоящее время не существует математических моделей, которые позволяют точно оценить процессы разрушения берегов.

Представлены математическая модель, состоящая из трех блоков: термического, гидродинамического, и деформационного, и результаты математического и лабораторного моделирования для расчетов русловых деформаций на криволинейных участках рек, русла которых подвержены термоэрозии. Проведен сравнительный анализ одно-временного воздействия водного потока и термоэрозии на различные участки криволинейного русла в зависимости от физико-механических и термических характеристик берегообразующего грунта. Использование представленной модели позволит прогнозировать деформации сильно меандрирующих русел рек в сложных климатических условиях.

Ключевые слова: математическая модель, таяние, деформации, водный поток, криволинейное русло.

Введение

Изменения в арктическом регионе, вызванные современными климатическими колебаниями, происходят настолько быстро, что исследователи с трудом успевают не только осмысливать и прогнозировать их динамику, но даже отследить ее. Белый цвет морского льда, покрывающего Арктику, резко сокращается в летние месяцы. По данным NASA осенью 2016 г. площадь ледового покрова в Арктике сократилась до 4,14 млн квадратных километров, это второе наименьшее значение за историю наблюдений. Значение этого ледового минимума намного меньше многолетней нормы, причём ситуация стремительно ухудшается именно в последние годы. Спутниковые снимки показывают, что начиная с 1970-х гг., площадь арктического льда сокращалась в среднем на 3 % каждые 10 лет. Но в 1990-е гг. скорость таяния резко возросла, до 10 % за десятилетие. За последние 10 лет были отмечены 10 наименьших значений. На протяжении истории Земли климат менялся, но никогда раньше – такими темпами. Экология Арктики важна не только для самого региона, но и для всего остального мира. Хотя Арктический регион обладает большим потенциалом природных ресурсов как на суше, так и в морях, Арктика сталкивается с рядом проблем, связанных, среди прочего, с ее редким населением, ограниченными логистическими сетями и хрупкими условиями окружающей среды. Большая часть российской арктической зоны состоит из устьевых областей северных рек, сток которых в Мировой океан вносит существенный вклад в планетарный водообмен. Так как на устьевых участках гидродинамические, термодинамические и все обменные процессы, протекающие в морях и реках, взаимозависимы, увеличение продолжительности периода открытой воды в прибрежных акваториях морей не могут не сказываться на общем теплообмене, приводя к таянию мерзлых грунтов в поймах и руслах рек, освобождению раз-

личных примесей и изменению химического состава речных, а следовательно, и морских вод, поскольку речной сток является одним из основных источников поступления растворенных и взвешенных веществ в моря Северного Ледовитого океана.

Речные системы в условиях вечной мерзлоты особенно чувствительны к изменениям климата. Скорость береговой эрозии существенно зависит от наличия многолетнемерзлых пород и скорости их таяния и представляет собой баланс между скоростью, с которой берегоформирующий материал может растаять и стать мобильным, и скоростью, с которой мобильный материал может переноситься рекой. Вдоль крутых берегов в крупных речных системах со значительным расходом воды в течение всего сезона открытой воды мелкозернистые отложения (ил и песок) могут переноситься со скоростью оттаивания. В этих системах максимальная скорость береговых деформаций термически ограничена и может быть чувствительна к изменениям климата, которые увеличивают скорость таяния вечной мерзлоты. Кроме того, береговая эрозия рек криолитозоны сильно зависит от процессов таяния подземных льдов и проявляется в виде термоэрозии и термоденудации. Термоэрозия представляет собой процесс сочетания термического и механического воздействия движущейся воды, что приводит к одновременному оттаиванию замороженного грунта и его переносу водным потоком. Термоэрозия может вызвать обрушение берегов. Термоденудация представляет собой совокупность криогенного разрушения горных пород на поверхности земли и переноса продуктов разрушения в пониженные участки. Ускорение термоденудации вызывает усиленное разрушение берегов, подтопление и аномально высокие паводки, что создает реальную опасность для жизни и деятельности людей.

Обзор литературы

Систематические исследования вечной мерзлоты начались еще в первой половине XIX в. Изучение особенностей водных потоков в условиях криолитозоны началось лишь в 70-х гг. XX столетия благодаря открытию здесь в 60-х гг. месторождений нефти и газа. Необходимость учитывать эти особенности при прокладке трубопроводов на морских побережьях и в поймах рек Арктики предопределила развитие исследований воздействия морского волнения и речных потоков на трансформации берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами. Сыграли свою роль в развитии этих исследований и проекты переброски или использования стока северных рек в многонаселенных областях, разрабатываемые не только в Советском Союзе, но и в США

и Канаде. Тем не менее анализ изученной отечественной и зарубежной литературы показывает, что работы, посвященные береговым деформациям арктических морей, наиболее интенсивно начали развиваться лишь в последнее десятилетие, а исследований трансформаций речных русел до сих пор крайне мало. Одним из первых литературных обзоров этих исследований была работа [13], опубликованная в 1979 г., в которой автор подчеркивает важную роль советских исследователей криолитозоны и, в частности, процессов термоабразии береговых речных склонов. Многие термины, используемые в этой области знания, с тех пор представляют собой кальку русских названий. Например, термин «ниши вытаивания», введенный Р. В. Абрамовым еще в 1957 г., широко используется зарубежными авторами и известен теперь как *thermo-erosional niching*. О непреходящей актуальности исследований криолитозоны свидетельствует проведение международных конгрессов (Permafrost Conference). К сожалению, после появления на первом конгрессе работы [14] в 1963 г. аналогичных исследований было мало. Стоит отметить среди них работу [12]. Результаты исследований по деградации морских арктических берегов, успешно проводимых в последнее время с применением высокотехнологичных методов, могут быть в какой-то степени использованы и для оценок речных деформаций. Примером может служить работа [5]. Большой вклад в исследования руслообразующих процессов в криолитозоне вносят работы [4; 6; 7].

Климатические колебания по данным многочисленных наблюдений на современном этапе выражаются в заметном повышении температур воздуха в арктических районах. Влиянию потепления посвящено в последние десятилетия огромное количество исследований, отраженных в научных статьях, трудах конференций, аналитических обзорах. Интерес к этим исследованиям обусловлен возрастающей практической значимостью арктической зоны, богатой месторождениями полезных ископаемых и прежде всего углеводородов, и не в последнюю очередь экологическими проблемами. Одна из проблем, связанных с деградацией вечной мерзлоты, это ландшафтные изменения, в том числе береговые деформации. Особенно подвержены этим изменениям участки дельт. Однако интерес исследователей главным образом ограничивается морским побережьем и дельтами, трудно найти работы по изучению речных береговых деформаций. Их результаты отражены прежде всего в работах российских и французских ученых [8; 10; 11], которые подтвердили, что с середины прошлого века изменился ряд ключевых параметров. Температура воды в реке Лена,

например, в паводковый период повысилась на 2°C по сравнению с показателями за 1950 г., что привело к изменению процессов, влияющих на развитие термальной и механической эрозии берегов. Увеличение темпов термоэрозии с начала 1980-х гг. полностью соотносится с ростом температуры водного потока вследствие потепления. На некоторых участках скорость отступления берегов достигает 20–40 м в год, а вымываемые породы уносятся по течению и создают трудности судоходству.

Развитие информационных и вычислительных технологий способствует построению математических моделей, с помощью которых возможно не только прогнозирование русловых процессов в условиях криолитозоны, но и углубленное исследование многочисленных взаимосвязей, которые необходимо учитывать при их исследовании. В предыдущих работах [1–3; 9] на основе лабораторных и численных экспериментов была решена задача о деформациях прямолинейных участков русла, что послужило первым приближением в дальнейших исследованиях, при этом отдельно рассматривались случаи с замороженным участком берегового склона и с ледяными пластинами, помещенными в склон. Первому случаю соответствовала гомогенная математическая модель, второму – гетерогенная. В настоящей работе моделировались деформационные процессы на криволинейных участках русла, при этом в новой версии математической модели могут быть учтены оба случая.

Инструменты и методы

При проведении лабораторных экспериментов был использован круговой лоток, изготовленный из оргстекла (плексигласа) толщиной 8 мм, диаметром 1,5 м и высотой 0,4 м (рис. 1). Рабочий объем 620 л. Уклон сформированного в начале экспериментов берегового откоса α изменялся в диапазоне $19\text{--}29^{\circ}$, температура воды в лотке поддерживалась постоянной 10°C .

Все блоки математической модели подробно описаны в работе [9]. В **гидродинамическом** блоке на первом этапе исследований был рассмотрен стационарный случай водного потока с заданием постоянных расхода и начальной глубины. Форма русла изменялась в соответствии с синусоидальной зависимостью ширины русла от длины. Каждому виду соответствовал коэффициент формы k_f : 0 соответствует прямому руслу, 1 – половине синусоиды при ее возрастании (вогнутый берег), -1 – половине синусоиды при ее убывании (выпуклый берег), 2 – целой синусоиде.



Рис. 1. Круговой лоток

В **деформационном** модуле рассчитываются изменения отметок дна из уравнения русловых деформаций (закона сохранения массы переносимых наносов). На твердых границах и на правой границе (приемный резервуар) задавались нулевые потоки расходов, на левой (входной) границе варьировались в зависимости от режима поступления воды. В расчетах, соответствующих данным лабораторного эксперимента, на входной границе задавался нулевой расход наносов, так как в лабораторной установке всегда поступала чистая вода. Для замыкания использовалась наиболее простая зависимость Энгелунда, не предусматривающая деление наносов на взвешенные и донные. В данной версии модели в уравнения русловых деформаций был введен параметр льдистости грунта, который позволил учитывать одновременно замороженный грунт и ледовые пластины в одной модели.

В **тепловом** модуле для расчета температур грунта используется однородное уравнение теплопроводности, для расчета перемещения границы раздела «вода-грунт» – уравнение Стефана. Температура воды в условиях лабораторного эксперимента остается неизменной в течение всего времени его проведения. В математической модели в начальный момент времени во всем грунте задается отрицательная температура, в водном потоке положительная.

В соответствии с лабораторным экспериментом в математической модели задавалось трапецеидальное поперечное сечение русла с углом заложения берегового склона α .

Результаты исследования

В левой части рис. 2 представлена фотография результата лабораторного эксперимента по размыву замороженного участка грунта, расположенного на вогнутом берегу, в правой части – поверхность русла, рассчитанная для тех же условий с использованием математической модели.

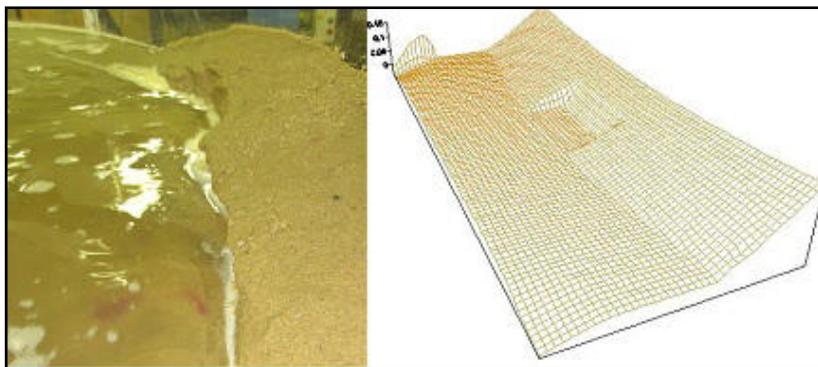


Рис. 2. Качественное сравнение результатов лабораторного и численного экспериментов

На рисунке 3 приведены рассчитанные по модели рельефы русла после воздействия водного потока и таяния двух замороженных кусков берегового склона, расположенных на вогнутом и выпуклом участках, при различных начальных температурах замороженного грунта. Один из рельефов соответствует случаю, когда в береговой склон были помещены куски льда. Стрелкой показано направление водного потока.

Рисунок 4 демонстрирует различия в размыве русла на прямом участке (*a*) и на участке с коэффициентом формы $kf=2$. Рисунок 4, *б* соответствует участок до размыва, рис. 4, *в* – после воздействия потока и термоэрозии.

На рисунке 5 представлены результаты измерений (*a*) и расчетов (*б*) глубин протаивания выпуклого и вогнутого берегов при скорости потока 0,1 м/с.

Как лабораторные, так и численные эксперименты показали, что глубина протаивания выпуклого берега увеличивается несколько быстрее, чем вогнутого.

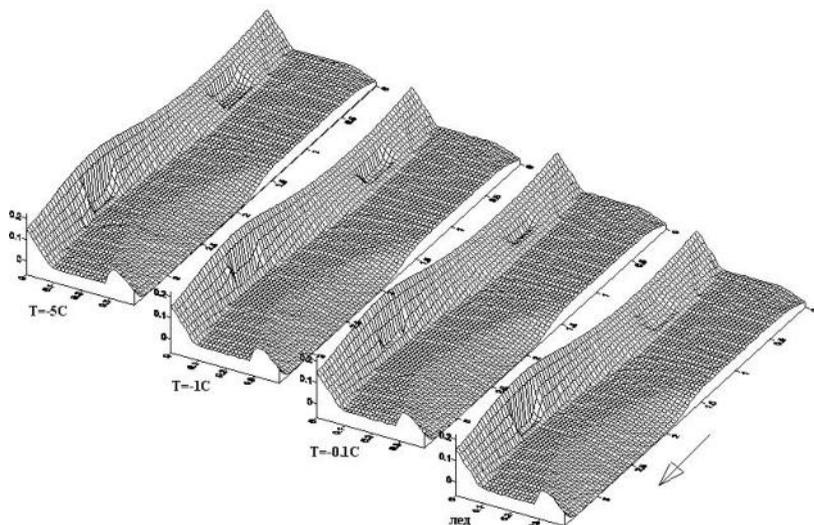


Рис. 3. Размыв берегового склона на выпуклом и вогнутом участках русла при различных температурах образцов замороженного грунта.
Данные численных экспериментов

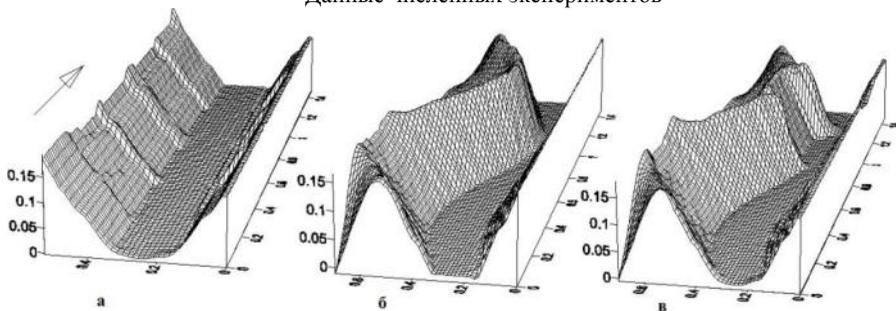


Рис. 4. Размыв русла с различными коэффициентами формы.
Данные численных экспериментов

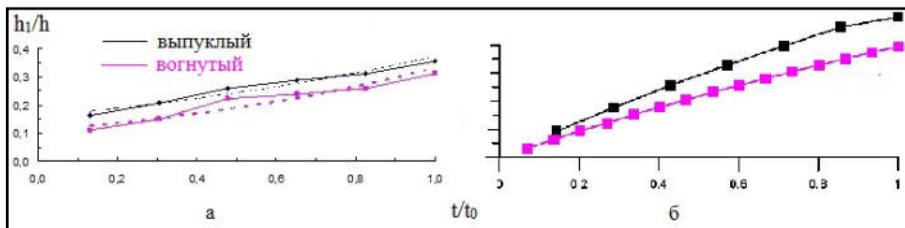


Рис. 5. Относительные значения глубин протаивания в зависимости от относительного времени по данным лабораторных и численных экспериментов

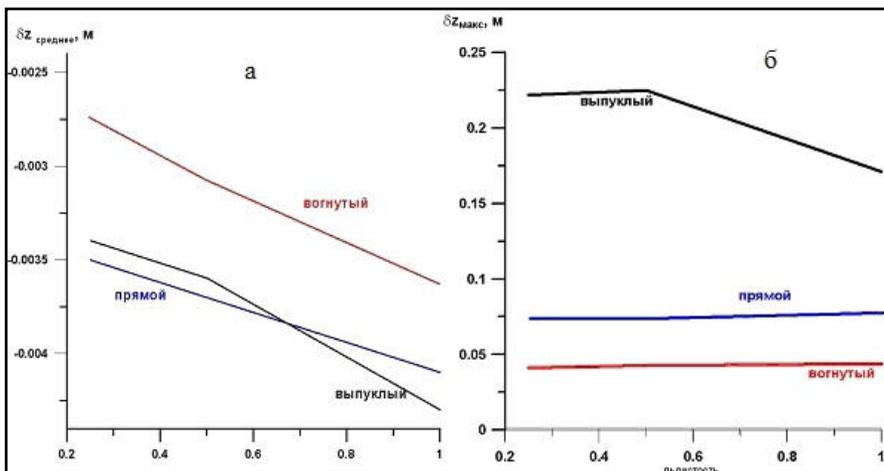


Рис. 6. Зависимость средних (а) и максимальных (б) по расчетному участку русла значений деформаций для случаев прямого, выпуклого и вогнутого берега от коэффициента льдыстости

На рисунке 6 представлены результаты численных расчетов деформаций выпуклого, вогнутого и прямого берега при наличии трех равных участков замерзшего грунта, расположенных на равных расстояниях по длине, от коэффициента льдыстости грунта (единица соответствует ледяной пластине). Начальная температура грунта или льда задавалась равной -5°C .

Выводы и рекомендации

Разработанная модель деформационных процессов на криволинейных участках речных русел, подверженных одновременному динамическому и тепловому воздействию водного потока, адекватно отражает исследуемый процесс, что следует из сравнения данных численных и лабораторных экспериментов, и позволяет получить прогноз развития различных ситуаций в зависимости от внешних и морфометрических параметров.

Величины средних значений размывов (рис. 6, а) не сильно отличаются для выпуклого и прямого берега, при этом при всех формах русла размывы усиливаются с увеличением льдыстости. Максимальные положительные значения деформаций (рис. 6, б), характеризующие аккумуляцию наносов, практически не зависят от льдыстости для прямого и вогнутого берегов и уменьшаются при увеличении льды-

стости для выпуклого берега. При этом их значения значительно превышают аккумуляции в случае прямого и вогнутого.

Здесь представлена лишь малая часть результатов и выводов, полученных в ходе первых лабораторных и численных экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-00178).

Список литературы

1. Дебольская Е. И. Математическая модель русловых деформаций рек криолитозоны // Вод. ресурсы. 2014. Т. 41, № 5. С. 496–506.
2. Дебольская Е. И. Формирование ниш вытаявания и их воздействие на русловые деформации (математическая модель) // Ледовые и термические процессы на водных объектах России : сб. тр. IV Всерос. конф. Рыбинск : Изд-во ИВП РАН, 2013. С. 160–169.
3. Моделирование деформаций русел, сложенных мерзлыми породами, при повышении температуры окружающей среды / Е. И. Дебольская, В. К. Дебольский, И. И. Грицук, О. Я. Масликова, Д. Н. Ионов // Лёд и Снег. 2013. № 1(121). С. 104–111.
4. Зайцев А. А., Тананаев Н. И. Многолетние переформирования сложноразветвленного русла р. Лены в районе «Якуского разбоя» и влияние на них промерзания грунтов // Геоморфология. 2008. № 1. С. 25–35.
5. Кизяков А. И., Зимин М. В., Лейбман М. О., Правикова Н. В. Мониторинг скорости термоденудации и термоабразии на западном побережье острова Колгуев с использованием материалов космической съемки высокого разрешения // Криосфера Земли. 2013. Т. 17, № 4. С. 36–47.
6. Михайлов В. М. Пойменные талики Северо-Востока России : дис. ... д-ра геогр. наук. 2005.
7. Тананаев Н. И. Особенности термоэрозионного разрушения берегов среднего течения р. Лены (Центральная Якутия) // Исследования в области наук о Земле : материалы X Регион. науч. молодёж. конф. Петропавловск-Камчатский : Изд-во ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 41–50.
8. Impact of the global warming on the fluvial thermal erosion over the Lena River in Central Siberia / F. Coastard, E. Gautier, D. Brunstein, J. Hammadi, A. Fedorov, D. Yang // Geophysical Research letters. 2007. Vol. 34. L14501. doi:10.1029/2007GL030212.
9. Effect of Bank Deformations on Pollutant Transport in Rivers in Cryolithozone: Laboratory and Mathematical Modeling / E. I. Debol'skaya, I. I. Gritsuk, V. K. Debol'skii, D. N. Ionov, O. Ya. Maslikova // Water Resources. 2018. Vol. 45, N 4. P. 542–552.
10. Effects of Ice Content on the Thermal Erosion of Permafrost: Implications for Coastal and Fluvial Erosion Permafrost and Periglac / L. Dupeyrat, F. Costard, R. Randriamazaoro, E. Gailhardis, E. Gautier, A. Fedorov // Process. 2011. 22. P. 179–187. Published online 9 May 2011 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/ppp.722).
11. Fluvial dynamics in a deep permafrost zone – the case of the middle Lena river (Central Siberia) / E. Gautier, D. Brunstein, F. Costard, R. Lodina // Permafrost. Phillips. Springman & Arenson (eds). 2003 Swets & Zeitlinger. Lisse.
12. Extreme rates of riverbank erosion of the high bluff formed by the ice-rich syngenetic permafrost (yedoma), Itkillik River, Northern Alaska / M. Kanevskiy, Y. Shur, T. Jorgenson, E. Stephani, J. Strauss // Process. American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting. San Francisco. USA. 2013.
13. Scott Kevin M. Arctic Stream Processes an Annotated Bibliography // U. S. Government Printing Office Washington D. C. 1979. 82 p.
14. Walker H. J., Arnborg L. Permafrost and ice-wedge effect on riverbank erosion // Permafrost Internat. Conf. Lafayette. Ind.. 1963. Proc.: Natl. Acad. P. 164–171.

УДК 556.556.3

Мониторинг ветрового волнения на казахстанском побережье Каспийского моря

А. Ф. Елтай (yeltay_aizat@mail.ru)

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

Аннотация. Рассматривается характер максимальных ветров в средней части Каспийского моря. Исследуются особенности внутригодовой и пространственной изменчивости средних характеристик ветра и волнения. Представлены примеры сильного волнения по шкале волнения по морским станциям и постам Форт-Шевченко и Актау. Преобладающими направлениями значительного волнения являются, северо-западные и западные румбы. Факторами образования значительного и сильного волнения, когда высота волны больше 1 м, может служить скорость ветра больше 8 м/с при преобладающем направлении на запад, северо-запад.

Ключевые слова: ветер, волнение, Каспийское море, повторяемость.

Хозяйственная деятельность человека в открытых водах Каспийского моря и вдоль его побережий в значительной степени зависит от погоды и состояния поверхности моря, особенно от условий волнения, которые часто являются решающим фактором, приводящим к ограничению или полному прекращению работ на море. В связи с этим информация о режиме волнения приобретает большое практическое значение, так как она позволяет выбрать наиболее благоприятные пути прохождения морских судов и рационально спланировать сроки и место проведения каких-либо морских операций и тем самым обеспечить не только безопасность работ в море, но и повысить их экономическую эффективность [1].

На сети морских станций в казахстанской части Каспийского моря наблюдения за волнением в настоящее время производятся на станциях и постах Форт-Шевченко, Кулалы остров, Актау, Фетисово, Песчаный, Саура в сроки 00, 06, 12, 18 ч по средне гринвичскому времени. Пост Саура начал вести наблюдения за волнением с 2010 г. Для исследования ветрового и волнового режима моря использовались материалы наблюдений за характеристиками ветра и волнения, проводимые на МГ Актау за период 1983–2018 гг. и МГ Форт-Шевченко за период 1993–2018 гг.

Волновой режим водоема определяется главным образом распределением скорости и направления преобладающих ветров, позволяющих отслеживать межгодовую изменчивость волнения и многолетнее распределение высоты волн. Перед исследованием режима волнения

казахстанского сектора Каспийского моря необходимо исследовать режим ветра.

Анализ данных показал, что в районе МГ Форт-Шевченко наибольшую повторяемость в многолетнем разрезе имеют ветры северного(21 %), северо-восточного(16 %), юго-восточного(14 %) направления, а в районе МГ Актау преобладают восточные(18 %) и юго-восточные(16 %) и западные(15 %) ветры. Наиболее редки ветры южного и юго-западного направления. Штиль в среднем составляет в среднем 6 % в районе МГ Форт-Шевченко и 3 % в районе МГ Актау. Для наглядности на рисунках 3-4 представлены розы ветров средней годовой повторяемости ветра по направлениям.

Режим скоростей ветра характеризуется постепенным убыванием от весны к лету. В июле – августе среднемесячная скорость ветра достигает годового минимума, а затем довольно быстро увеличивается к осени. Максимум скорости ветра по всем станциям отмечается в холодный период года – с декабря по март [3].

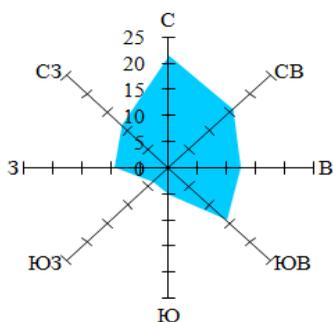


Рис. 2. Повторяемость ветра по МГ Форт-Шевченко за 1993–2018 гг., %

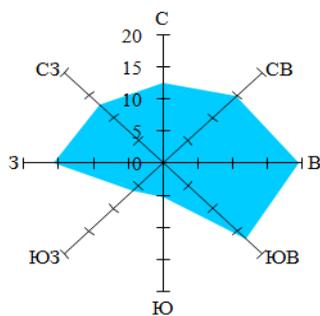


Рис. 3. Повторяемость ветра по МГ Актау за 1983–2018 гг., %

В таблице 1 приведены данные о максимальной месячной скорости ветра. Как правило, выделяется один максимум скорости ветра в холодный период года. Максимальные скорости ветра в этот период колеблются от 14 до 28 м/с. Наибольшие максимальные скорости ветра 28 м/с фиксируются в районе станции Форт-Шевченко, где проявляется «мысовый эффект». Ветер может достигать больших скоростей практически при всех румбах. Наибольшую повторяемость скоростей ветра, превышающих 15 м/с, имеют западное и юго-восточное направление.

Таблица 1

Максимальные скорости ветра восточной части Среднего Каспия, м/с

Месяц											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Форт-Шевченко											
24	24	28	28	21	28	21	20	19	20	24	20
Актау											
18	22	16	19	18	16	16	15	14	18	21	18

Анализ ветрового режима показал, что штиль в районе МГ Форт-Шевченко и МГ Актау наблюдается довольно редко, следовательно волны бывают в море постоянно. В прибрежной зоне он зависит, кроме того, от глубины моря, направления береговой черты относительно преобладающих ветров и рельефа дна. По этой причине элементы волн, определенные в каком-либо пункте прибрежной зоны, могут служить характеристикой волнения только для ограниченной акватории моря, непосредственно примыкающей к пункту наблюдения.

Высота волны определяется глазом, согласно оценке пяти наиболее заметных больших волн, прошедших перед глазом наблюдателя в течение 5 минут. Чтобы преобразовать высоту волны в степень волны, используется шкала волнения, которая представлена в табл. 2 [4].

Таблица 2

Шкала степени волнения

Высота волны, м	Степень волнения	Баллы
0	Волнение отсутствует	0
до 0,25	Слабое	I
0,25–0,75	Умеренное	II
0,75–1,25	Значительное	III
1,25–2,00	Значительное	IV
2,00–3,50	Сильное	V
3,50–6,00	Сильное	VI
6,00–8,50	Очень сильное	VII
8,50–11,0	Очень сильное	VIII

Анализ имеющихся данных позволил выделить значительное и сильное волнение, преобладающее направление и ветровые условия, которые приводят к возникновению данного значительного волнения. На основе этого составлены каталоги значительного волнения с 1983 по 2018 г. В таблице 3 и 4 представлены примеры характеристик сильного волнение по МГ Актау и МГ Форт-Шевченко, наблюдаемые

с 1983 по 2018 г. При значительном волнении волны принимают хорошо выраженную форму, а при сильном появляются гребни большой высоты. Как следует из таблицы 4, высота волны у МГ Актау может достигать 4,5 м. Однако необходимо отметить, что такое сильное волнение было зафиксировано лишь однажды 6 декабря 1985 г. При скорости ветра 8 м/с с направлением на запад северо-запад.

Таблица 3

Пример характеристик сильного волнения (>2 м/с), составленный по данным наблюдений на МГ Форт-Шевченко, остров за период с 1993 по 2018 г.

№	Дата (число, месяц, год)	Высота волны, м	Направление волнения, румб	Ветер		Продолжительность, ч
				скорость, м/с	направление, румб	
1	26.03.1995	2	З	18	ЮЗ	6
2	08.04.1996	2	В	18	В	6
3	22.02.1999	2	З	24	ЮЗ	6
4	17.11.1999	2	СЗ	18	СЗ	6
5	25.01.2000	2,5	Ю	24	СЗ	6
6	16.02.2002	2	СЗ	14	СЗ	6
7	10.04.2003	2	СЗ	10	СЗ	6
8	17.02.2004	2	СЗ	8	СЗ	6
9	16.03.2013	2	СВ	20	С	6
10	17.03.2013	2	СВ	13–18	С	12

Таблица 4

Пример характеристик сильного волнения (>3 м/с), составленный по данным наблюдений на МГ Актау за период с 1983 по 2018 г.

№	Дата (число, месяц, год)	Высота волны, м	Направление волнения, румб	Ветер		Продолжительность, ч
				скорость, м/с	направление, румб	
1	03.02.1981	3	СЗ	16–20	СЗ, ССЗ	12
2	04.11.1983	3,5	СЗ	15–16	ЗСЗ, СЗС	12
3	10.10.1984	3,5	СЗ	16	СЗ	6
4	06.12.1985	4,5	СЗ	8	ЗСЗ	6
5	05.01.1991	3,5	З	8	З	6
6	03.02.2002	3	СЗ	10	СЗ	6
7	10.04.2003	3	СЗ	7	СЗ	6
8	10.12.2003	3	СЗ	6	СЗ	6
9	23.10.2004	3	СЗ	6	З	6
10	24.11.2004	3	СЗ, З	5	ЗСЗ	12
11	20.10.2005	3	СЗ	4	ЮВ	6
12	19.05.2006	3	СЗ	10	ЗСЗ	6
13	22.02.2007	3	ЮЗ	15	З	6
14	10.10.2008	3	СЗ	10	ЗСЗ	6

Значительное и сильное волнение, как правило вызывает ветер, западного и северо-западного направления. Что видно на рис. 4 и 5, где представлено преобладающее направление волнения по исследуемым станциям. Например, для МГ Форт-Шевченко наибольшую повторяемость имеет волнение северо-западного направления (39 %), а в районе МГ Актау 60 %.

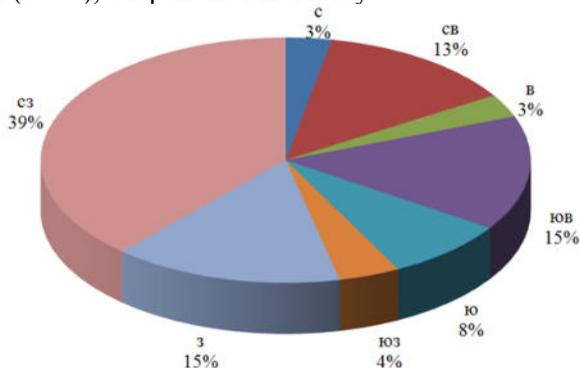


Рис. 4. Преобладающее направление волнения высотой волны 1 м и более по МГт Форт-Шевченко

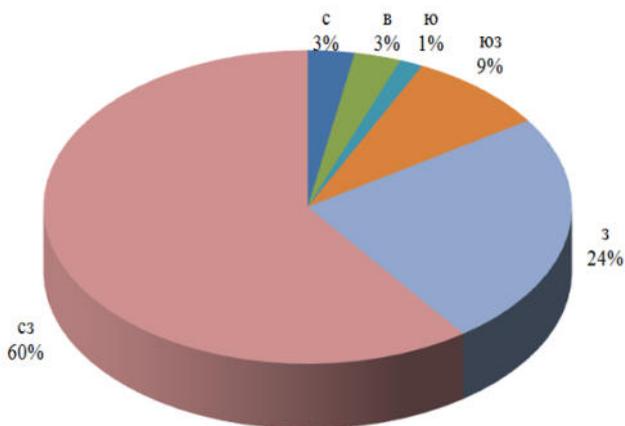


Рис. 5. Преобладающее направление волнения с высотой волны 1 м и более по МГ Актау

Значительное волнение в районе МГ Форт-Шевченко наблюдается в течение всего года. Как видно на рис. 6, волны с высотой 1,5 м зафиксированы в каждом месяце. Сильное же волнение характерно в основном для зимнего (декабрь-февраль), весеннего (март-апрель) и осеннего (ноябрь) периода.

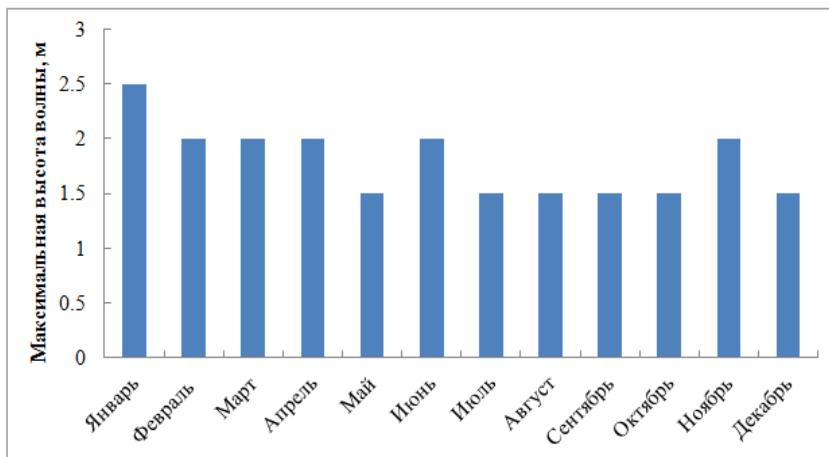


Рис. 6. Изменчивость максимального волнения по месяцам по МГ Форт Шевченко за период с 1993 по 2018 г.

В районе МГ Актау волнение развито сильнее, в каждом месяце фиксируются волны с высотой более 2 м. Значительное волнение наблюдается в течение всего года, но наиболее интенсивно волновые процессы развиты в холодный период года (рис. 7).

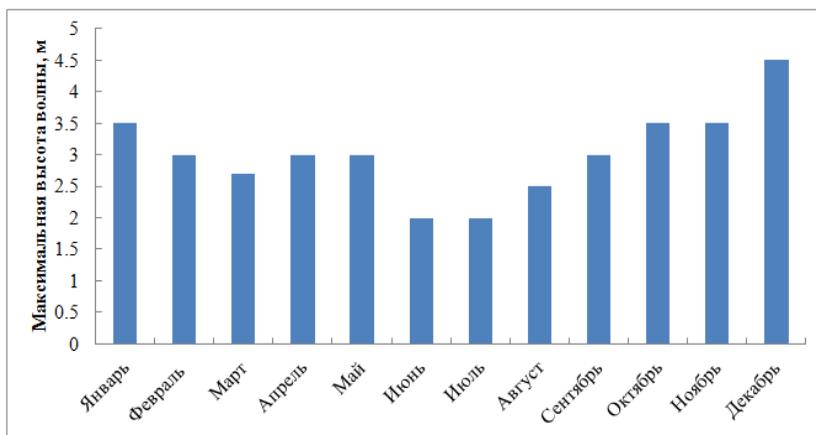


Рис. 7. Изменчивость максимального волнения по месяцам по МГ Актау за период с 1983 по 2018 г.

Результаты исследования показали что, наибольшее волнение в 4,5 м на восточном побережье Каспийском море было зафиксировано в районе Актау. С прогрессивным развитием судоходства и различных работ на море, особую значимость и актуальность приобретают исследования волнового режима водоема, который определяется главным образом распределением скорости и направления преобладающих ветров. И развитие исследования в данном направлении имеет большое практическое значение. Волновые движения в море разнообразны, многие практические проблемы мореплавания, гидротехнического строительства в море, промысла, кораблестроения связаны с его учетом и исследованием. Основной целью наблюдений за волнением на морских береговых станциях и постах является информация службы прогнозов погоды и государственных организаций о состоянии моря. Одновременно результаты срочных наблюдений за волнением, производимые длительное время, используются для изучения режима волнения и процессов волнообразования.

Список литературы

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 6: Каспийское море. Вып. 1 / под ред. Ф. С. Терзиева, А. Н. Косарева, А. А. Керимова. СПб. : Гидрометеоиздат, 1992. С. 358–359.
2. *Ивкина Н. И.* Ветровые условия в северной и средней частях Каспийского моря // Гидрометеорология и экология. 2011. № 4. С. 27–38.
3. *Коровин В. П., Тимец В. М.* Методы и средства гидрометеорологических измерений (Океанографические работы) // Гидрометеоиздат. 2000. С. 312.

УДК 556.314 (551.34)

Геохимия подземных рассолов северо-восточной части Ангаро-Ленского артезианского бассейна

В. М. Казакова (vikakazak96@gmail.com)¹

Л. П. Алексеева (lalex@crust.irk.ru)^{1,2}

¹ *Иркутский государственный университет, г. Иркутск*

² *Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск*

Аннотация. Представлены результаты определения основных компонентов химического состава подземных рассолов северо-восточной части Ангаро-Ленского артезианского бассейна традиционными методами.

Ключевые слова: Подземные воды, минерализация, химический состав рассолов, катионы, анионы, метод комплексонометрического титрования, трилонометрический метод.

История изученности гидроминерального сырья Сибирской платформы, частью которого является Ангаро-Ленский артезианский бассейн, насчитывает около трехсот лет. На сегодняшний день освоение регионов Восточной Сибири находится под особым вниманием, поскольку возникла необходимость в использовании гидроминерального сырья в связи с истощением освоенной сырьевой базы. Гидроминеральное сырье (промышленные воды) – это природные воды, являющиеся важнейшим источником получения различных компонентов или соединений – йода, брома, бора, лития и др.

В Ангаро-Ленском артезианском бассейне распространены высокоминерализованные воды, которые представляют не только большой практический интерес, но и являются чрезвычайно интересным объектом научного исследования.

Происхождение хлоридных рассолов – одна из ведущих проблем гидрогеохимии, с которой связано и решение многих прикладных аспектов. Известно, что при растворении пород галогенных формаций могут образоваться рассолы с минерализацией не более 320 г/дм^3 . Между тем минерализация отдельных геохимических типов рассолов достигает 700 г/дм^3 . Отправным моментом для решения генетических вопросов является исследование химического состава подземных вод высокой минерализации. Настоящая работа посвящена аналитическому определению химического состава рассолов [1].

Цель работы – выявить гидрогеохимические особенности рассолоносного горизонта северо-восточной части Ангаро-Ленского артезианского бассейна.

В работе применялись теоретические, экспериментальные, лабораторные методы. В ходе лабораторных исследований по стандартным методикам определялись основные показатели состава и свойств рассолов. Материалами для аналитического определения химического состава служили:

- пробы поликомпонентных высококонцентрированных рассолов (в количестве 10 шт.), полученные при откачках из скважин на одном из нефтяных месторождений Ангаро-Ленского бассейна;
- реактивы для определения компонентов химического состава (титранты, индикаторы, измерительные приборы);
- расходные материалы (дистиллированная вода, фильтры и др.).

Материалы предоставлены сотрудниками лаборатории гидрогеологии Института земной коры СО РАН.

Методики анализа включают в себя подробное описание последовательности и условий проведения всех стадий анализа. Точное следование методикам анализа позволяет получить результат с минимальной погрешностью [2].

Ангаро-Ленский артезианский бассейн расположен на юге Сибирской платформы, который в геологии принято называть Иркутский амфитеатр.

Иркутский амфитеатр – это южный клинообразный выступ Сибирской платформы, включающий краевую антеклизу (приподнятый новейшими движениями цоколь платформы) и внутреннее поле амфитеатра (собственно платформенную часть, где фундамент закрыт осадочным чехлом [1].

В современной структуре Иркутского амфитеатра выделяются два структурных этажа (рис. 1): фундамент, состоящий из интенсивно дислоцированных пород архея и протерозоя, и осадочный чехол, включающий слабо дислоцированные отложения, начиная с позднего докембрия. В свою очередь осадочный чехол состоит из нескольких структурных ярусов. По времени они делятся: 1) поздний докембрий – силур; 2) девон; 3) карбон – триас; 4) юра; 5) мел – палеоген; 6) неоген – четвертичный период. В строении фундамента и осадочного чехла наблюдается определённая закономерность, которая заключается в смещении области максимальных погружений к краевым частям Иркутского амфитеатра. Указанная особенность объясняется сильной контрастностью и большой длительностью движений в западных районах по сравнению с восточными и хорошо заметной тенденцией восточной части амфитеатра к воздыманию.

Методика анализа включает подробное описание последовательности и условий проведения всех стадий анализа. Перед началом химических анализов пробу фильтруют через бумажный фильтр «синяя лента». После фильтрования определяют рН воды в пробе потенциометрическим методом на приборе (иономер универсальный ЭВ – 74). Следующий этап – измерение плотности воды с помощью ареометра.

Поликомпонентные высококонцентрированные рассолы анализируют гравиметрическим методом из-за высокой минерализации воды применён малый объем пробы. Гравиметрический (весовой) анализ, или гравиметрия – это один из методов количественного анализа, основанный на определении массы искомого компонента анализируемого образца путем измерения – точного взвешивания массы устойчивого конечного вещества известного состава, в которое полностью переведен данный определяемый компонент.

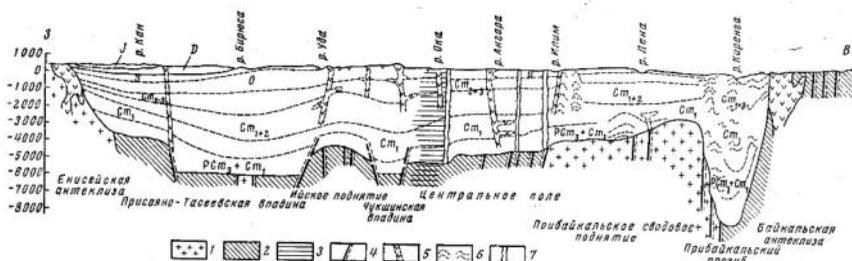


Рис. 1. Схематический структурный разрез Иркутского амфитеатра по широте 56° (составил В. А. Твердохлебов, 1962 г.) [1]:

1 – жёсткие архейские массивы; 2 – протерозойское складчатое поле; 3 – Приангарская зона смятия; 4 – разлом в кристаллическом фундаменте; 5 – интрузии; 6 – складчатые форма дислокаций осадочного чехла; 7 – трубка взрыва;

- $Cm_1 - E_1$ – Кембрий I
- $Cm_{2-3} - E_{2-3}$ – Кембрий II–III
- $PCm_2 + Cm_1 - VE_2 + E_1$ – Венд Кембрий II + Кембрий I
- $Cm_{2+3} - E_{2+3}$ – Кембрий II+III
- $Cm_{1+2} - E_{1+2}$ – Кембрий I+II

Содержание в рассолах катионов и анионов измерялось в ходе титриметрического анализа. Титриметрический анализ (титрование) – метод количественного/массового анализа, который часто используется в аналитической химии. Он основан на измерении объёма раствора реактива точно известной концентрации, расходуемого на реакцию с определяемым веществом.

В зависимости от исследуемого компонента применялся тот или иной вид классического титрования. Для определения $\sum (Ca^{2+} + Mg^{2+})$ использовался метод комплексонометрического титрования; для определения содержания кальция Ca^{2+} в водах применяли трилонометрический метод. Для измерения концентрации калия K^+ и натрия Na^+ существует несколько методов, например, метод пламенной фотометрии и расчетный метод (суть метода в том, что по разности сумм катионов и анионов определяют содержание калия и натрия в рассолах). В работе использован второй метод. Концентрация хлоридов Cl^- измерялась с помощью меркуриметрического метода. Йодометрия – метод для определения содержания брома Br^- ; классическим весовым методом определяют концентрацию сульфатов SO_4^{2-} ; потенциометрический метод предназначен для определения содержания гидрокарбонатов HCO_3^- .

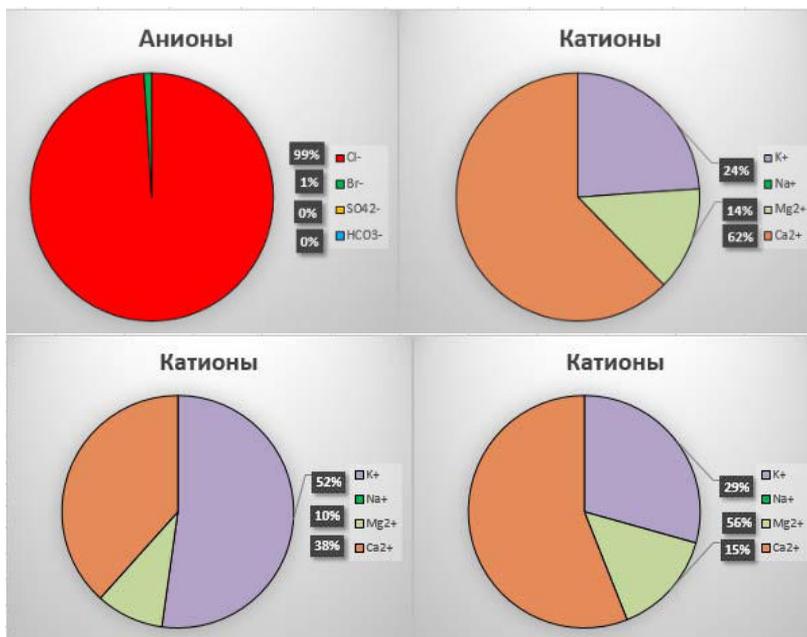


Рис. 2. Ионный состав 1,3,8 проб, (%-экв. содержание катионов и анионов)

Обобщенная характеристика химического состава изученных рассолов представлена в табл. 1.

По результатам химических анализов и расчетов %-эквивалентного содержания катионов и анионов в воде построены круговые диаграммы, которые наглядно отображают химический состав изученных подземных вод (рис. 2). Все рассолы по анионному составу – хлоридные, а по катионному делятся на 3 вида: кальциевые, натриево-кальциевые, кальциево-натриевые. По минерализации, которая достигает 376 мг/дм³, подземные воды являются крепкими и весьма крепкими рассолами.

В результате выполненных аналитических определений получены следующие выводы:

1. Определение компонентов химического состава рассолов требуют применение различных методов. Методом комплексонометрического титрования определялась $\sum (Ca^{2+} + Mg^{2+})$; потенциометрический метод предназначен для определения гидрокарбонатов HCO₃ и др. Все используемые методы – это различные виды классического титрования.

Таблица 1

Ионно-солевой состав рассолов

№ п/п	рН	Плотность, гр/см ³	Форма выражения анализа	Ионный состав									Минерализация воды г/кг г/дм ³
				K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	SUM катионов	Cl ⁻	Br ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	
1	2,05	1,264	г/кг	29,4	8,8	66,9		187,4	4,4	0,1	0,0	6751,3	296,9
			г/дм ³	37,1	11,2	84,5		236,8	5,6	0,1	0,0		375,3
			мг/дм ³	37142,8	11158,1	84518,2		236812,0	5552,5	77,0	0,0		
			мг-экв/дм ³	1615,6	918,2	4217,5	6751,3	6680,2	69,5	1,6	0,0		
			%-экв	23,9	13,6	62,5		98,9	1,0	0,0	0,0		
2	5,86	1,124	г/кг	8,9	2,9	39,5		90,7	1,7	0,5	0,2	2914,4	144,3
			г/дм ³	10,0	3,2	44,4		102,0	1,9	0,5	0,2		162,2
			мг/дм ³	9981,0	3204,3	44420,0		101958,5	1900,1	540,0	198,3		
			мг-экв/дм ³	434,2	263,7	2216,6	2914,4	2876,1	23,8	11,2	3,3		
			%-экв	14,9	9,0	76,1		98,7	0,8	0,4	0,1		
3	6,00	1,172	г/кг	41,8	4,0	26,8		122,3	1,6	0,5	0,1	4080,0	197,0
			г/дм ³	49,0	4,7	31,4		143,4	1,9	0,5	0,1		230,9
			мг/дм ³	48966,4	4686,7	31351,0		143356,3	1870,2	538,0	91,5		
			мг-экв/дм ³	2129,9	385,7	1564,4	4080,0	4043,9	23,4	11,2	1,5		
			%-экв	52,2	9,5	38,3		99,1	0,6	0,3	0,0		
4	4,40	1,267	г/кг	31,7	6,6	65,3		181,8	4,1	0,1	0,0	6565,4	289,6
			г/дм ³	40,1	8,4	82,8		230,3	5,2	0,2	0,0		367,0
			мг/дм ³	40125,5	8367,8	82795,7		230308,7	5226,5	152,0	9,2		
			мг-экв/дм ³	1745,4	688,6	4131,5	6565,4	6496,7	65,4	3,2	0,2		
			%-экв	26,6	10,5	62,9		99,0	1,0	0,0	0,0		
5	5,80	1,206	г/кг	60,9	3,0	29,3		153,6	1,7	0,3	0,0	5259,0	248,8
			г/дм ³	73,5	3,7	35,3		185,2	2,0	0,4	0,1		300,1
			мг/дм ³	73452,0	3669,7	35310,7		185233,0	2039,7	353,1	54,9		
			мг-экв/дм ³	3195,0	302,0	1762,0	5259,0	5225,2	25,5	7,4	0,9		
			%-экв	60,8	5,7	33,5		99,4	0,5	0,1	0,0		

№ п/п	рН	Плотность, гр/см ³	Форма выражения анализа	Ионный состав										Минерализация воды г/кг г/дм ³
				K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	SUM катионов	Cl ⁻	Br ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SUM анионов	
6	4,95	1,261	г/кг	26,8	9,2	63,4		178,0	4,8	0,1	0,1		282,4	
			г/дм ³	33,8	11,5	80,0		224,5	6,0	0,2	0,1		356,1	
			мг/дм ³	33801,9	11545,7	80007,9		224501,3	6009,4	166,7	73,2			
			мг-экв/дм ³	1470,3	950,1	3992,4		6332,9	75,2	3,5	1,2	6412,8		
			%-экв	22,9	14,8	62,3		98,8	1,2	0,1	0,0			
7	4,15	1,275	г/кг	22,0	10,6	70,4		187,4	4,5	0,1	0,0		295,1	
			г/дм ³	28,1	13,6	89,7		239,0	5,8	0,1	0,0		376,2	
			мг/дм ³	28051,9	13574,9	89745,3		238976,6	5761,1	99,6	8,5			
			мг-экв/дм ³	1220,2	1117,0	4478,3		6741,2	72,1	2,1	0,1	6815,5		
			%-экв	17,9	16,4	65,7		98,9	1,1	0,0	0,0			
8	4,40	1,19	г/кг	25,3	6,7	42,1		131,6	2,6	0,3	0,0		208,6	
			г/дм ³	30,1	7,9	50,1		156,6	3,1	0,4	0,0		248,2	
			мг/дм ³	30110,2	7949,9	50113,1		156648,2	3053,5	351,8	9,8			
			мг-экв/дм ³	1309,7	654,2	2500,7	4464,5	4418,9	38,2	7,3	0,2	4464,5		
			%-экв	29,3	14,7	56,0		99,0	0,9	0,2	0,0			
9	4,10	1,26	г/кг	28,0	9,2	61,1		176,0	4,2	0,1	0,0		278,6	
			г/дм ³	35,2	11,6	77,0		221,8	5,3	0,2	0,0		351,1	
			мг/дм ³	35220,4	11593,2	76967,9		221802,9	5312,0	158,8	7,3			
			мг-экв/дм ³	1532,0	954,0	3840,7	6326,7	6256,8	66,5	3,3	0,1	6326,7		
			%-экв	24,2	15,1	60,7		98,9	1,1	0,1	0,0			
10	4,70	1,195	г/кг	27,9	9,2	58,0		170,8	4,1	0,1	0,0		270,2	
			г/дм ³	33,4	11,0	69,3		204,1	4,9	0,1	0,0		322,8	
			мг/дм ³	33398,7	11035,4	69325,4		204072,9	4890,4	93,4	24,4			
			мг-экв/дм ³	1452,8	908,1	3459,3	5820,2	5756,6	61,2	1,9	0,4	5820,2		
			%-экв	25,0	15,6	59,4		98,9	1,1	0,0	0,0			

Примечание: * Эквивалентные веса Катионы: K⁺ – 39,0983; Na⁺ – 22,9898; Mg²⁺ – 12,1525; Ca²⁺ – 20,04; Анионы: Cl⁻ – 35,45; Br⁻ – 79,904; SO₄²⁻ – 48,033; HCO₃⁻ – 61,008.

2. Исследованные подземные воды, отобранные с глубины от 2005 до 2300 м являются крепкими и весьма крепкими рассолами, едиными по геохимическому типу – хлоридными. По катионному составу рассолы кальциевые, кальциево-натриевые и натриево-кальциевые, с минерализацией от 162 до 376 г/дм³ с повышенным содержанием брома Br⁻, концентрация которого варьируется в пределах от 1,87 до 6,01 г/дм³.

Список литературы

1. Пиннекер Е. В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна. М. : Наука, 1966. 329 с.
2. Резникова А. А., Муликовская Е. П., Соколов Н. Ю. Методы анализа природных вод. М. : Недрa 1970. 488 с.

УДК 502.175

Мониторинг содержания хлороформа в воде пресноводных водоемов

Е. С. Колпакова (kolpelen@yandex.ru)

А. В. Вельямидова (allavel@yandex.ru)

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
им. акад. Н. П. Лаврова РАН, г. Архангельск*

Аннотация. Рассмотрен вопрос о влиянии антропогенного фактора на присутствие хлороформа в пресноводных озерах. Приведены данные о количестве хлороформа и его распределении в водной толще озер на территории Архангельской области, в разной степени подверженных антропогенному воздействию.

Ключевые слова: хлороформ, озерная вода, газовая хроматография, антропогенный фактор.

Введение

Среди загрязнителей объектов окружающей среды особое место занимают токсичные хлорорганические соединения. Ранее, при изучении пресноводных озерных экосистем в донных осадках и почвах водосборных площадей были выявлены хлорорганические соединения разной степени липофильности, присутствие которых обусловлено факторами антропогенного и природного происхождения [1; 8]. Среди этих соединений выделяется группа летучих хлорированных алканов, к которым относится хлороформ.

Обладая малой растворимостью в воде, низкой липофильностью ($\lg K_{ow}$ 1,97) и слабой способностью сорбироваться на органическом веществе твердых природных матриц ($\lg K_{oc}$ 1,44–2,79), летучий хлороформ плохо удерживается и накапливается в почве, донных осадках и водной толще, что приводит к значительной эмиссии его в атмосферу. При этом некоторая часть присутствующего в атмосфере хлороформа, тем не менее, может вымываться дождевыми осадками, поступающая на поверхность почвы, а также в водную среду [10].

Считается, что в основном хлороформ поступает в окружающую среду от источников природного происхождения, среди которых наиболее значимым являются почвенные процессы [10]. Образование хлороформа в почвах происходит преимущественно в верхних слоях, богатых органическим веществом, в результате ферментативного продуцирования (катализируемого хлорпероксидазой) почвенными организмами, при биогенном хлорировании почвенных кислот (в основном гуминовых веществ), а также при биодеградации и декарбоксилировании трихлоруксусной кислоты, образующейся в поверхностном слое почвы биогенным хлорированием органического вещества. Кроме того, хлороформ образуется в результате продуцирования различными насекомыми, растительностью (наземной и пресноводной); также свой вклад в эмиссию хлороформа вносят источники абиотического происхождения [9].

В России утверждены нормы качества воды по содержанию хлороформа. Санитарными правилами и нормами РФ установлены ПДК хлороформа в питьевой воде централизованных систем водоснабжения на уровне 200 мкг/л [7]. Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315-03 определяют ПДК хлороформа в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования в количестве 60 мкг/л [6]. Однако даже в небольших количествах (ниже ПДК) хлороформ может негативно влиять на здоровье человека, оказывая токсическое воздействие на обмен веществ и внутренние органы. Так, в результате углубленного обследования детей, проживающих в условиях хронического поступления хлороформа с питьевой водой при отсутствии превышений его ПДК, выявлен неприемлемый уровень риска для печени, почек, системы крови и эндокринной системы [4].

По настоящее время актуальной проблемой является обеспечение населения чистой водой, особенно в сельской местности, где вода необходима не только для собственных нужд, но и для сельскохозяйственной деятельности.

В данной работе представлены результаты мониторинговых исследований по изучению уровней содержания и особенностей распре-

деления хлороформа в воде малых озер таежной зоны на юго-западе Архангельской области в условиях разной степени антропогенного воздействия.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования выбраны озера: Нижнее (Коношский район) и Саргозеро (Каргопольский район). Исследованные озера являются частью водосборных бассейнов Белого и Балтийского морей. По морфологическим характеристикам озера Нижнее и Саргозеро относятся к малым (площади зеркал 1,0–1,5 км²), мелководным (средние глубины около 3 м при максимумах 5 м и 8 м, соответственно), малопроточным. Питание озер осуществляется за счет атмосферных осадков, поверхностных притоков и грунтовых вод.

Озеро Нижнее расположено в черте районного центра (поселка городского типа) в непосредственной близости от промплощадки бывшего лесозавода, где в прошлом интенсивно применялся хлорфенольный загрязнитель. Ранее, при изучении озерных осадков и почв на промплощадке предприятия выявлено присутствие токсичных хлорорганических загрязнителей в концентрациях, превышающих существующие нормативы [1–3]. Непосредственно к береговой зоне озера примыкают частные и многоквартирные дома с приусадебными участками. Население этой части поселка активно использует озерную воду для хозяйственно-бытовых нужд и орошения частных садово-огородных участков. Для всей акватории озера характерно зарастание разного вида водной и прибрежно-водной растительностью.

Саргозеро расположено на территории Кенозерского национального парка с развитым туризмом эколого-этнографической направленности. Ближайший населенный пункт находится на расстоянии 2 км в северо-восточном направлении от озера. В прибрежных зонах Саргозера распространена растительность, в основном тростник и хвощ.

Пробы озерной воды отбирались в ходе экспедиционных работ в июле и марте 2012–2017 гг. на различных горизонтах в пределах водной толщи батометром Нискина.

Анализ проб воды на содержание хлороформа проводили согласно МИ № 88-16365-002-2014. Идентификацию хлороформа осуществляли по времени удерживания, количественное определение – методом абсолютной калибровки с использованием государственного стандартного образца состава хлороформа.

Результаты и обсуждение

По результатам проведенных исследований хлороформ был обнаружен во всех отобранных пробах озерной воды.

Так, в озере Нижнее концентрации хлороформа в воде в летний период определены в диапазоне от 0,58 до 13,76 мкг/л (рис. 1). В таких же количествах (от 0,11 до 12,21 мкг/л) хлороформ найден в воде менее антропогенно нагруженного Саргозера (рис. 2).

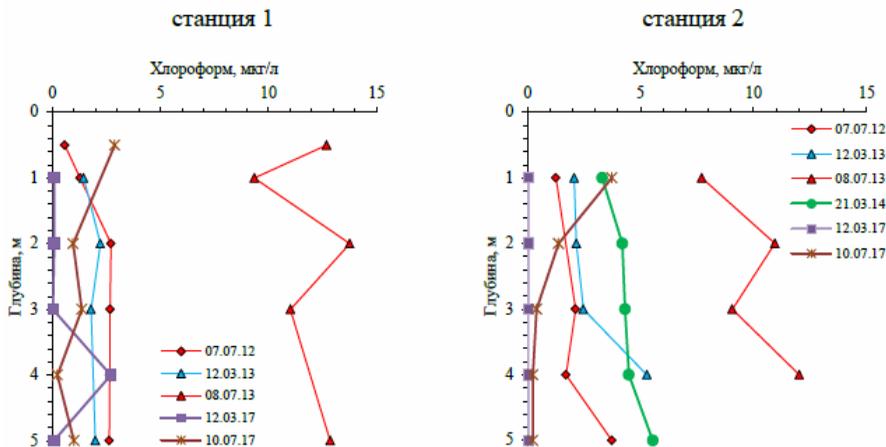


Рис. 1. Распределение хлороформа в водной толще озера Нижнее

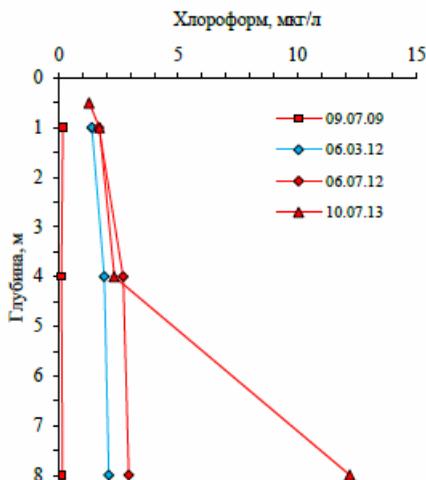


Рис. 2. Распределение хлороформа в водной толще Саргозера

При этом для обоих озер установлены закономерности к увеличению концентраций хлороформа в воде по глубине, что может быть обусловлено его поступлением с грунтовыми водами из почв водосборных площадей. Кроме того, более высокое содержание хлороформа на нижележащих горизонтах может быть связано с образованием его водными продуцентами, а также с медленным продвижением этого соединения в водной толще к поверхности и активным испарением из верхних горизонтов.

По концентрациям хлороформа выделялись пробы воды, отобранные в исследованных озерах в июле 2013 г., первая декада которого характеризовалась преобладанием жаркой и сухой погоды, с температурами выше климатической нормы и редкими кратковременными дождями и грозами [5]. Скорее всего, погодные условия в данный период активизировали биогеохимические процессы образования хлороформа, что привело к столь высоким его количествам (до 13,76 мкг/л). Обилие воздушно-водной растительности в озерах создают благоприятную среду для обитания бентосных и планктонных организмов, которые в свою очередь являются продуцентами хлороформа [9].

В период зимней стагнации содержание хлороформа в воде озера Нижнее составило от 0,05 до 5,29 мкг/л (рис. 1), а в воде Саргозера – от 1,39 до 2,10 мкг/л (рис. 2). В этот период наблюдали равномерное распределение концентраций хлороформа по высоте водного столба (при температуре от 0 до 3 °С). Более низкие концентрации хлороформа по сравнению с найденными в летний период свидетельствуют о менее активно протекающих процессах его образования в условиях озерных экосистем.

В целом выявленные концентрации хлороформа соответствовали результатам исследований озер Онтарио и Верхнее (система Великих озер, Северная Америка) – до 4,2 мкг/л [10].

Выводы

При исследовании озер Нижнее и Саргозеро, в разной степени подверженных антропогенному воздействию, выявлено присутствие хлороформа в воде в количестве от 0,11 до 13,76 мкг/л, что не превышало уровня существующего норматива в воде хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. При этом значимого влияния антропогенного фактора на содержание и распределение хлороформа в озерной воде не установлено. Образование хлороформа

связано в основном с протеканием естественных энзиматических и биогеохимических процессов в условиях озерных экосистем.

Список литературы

1. *Вельямидова А. В.* Влияние долговременного применения пентахлорфенолята натрия в лесопромышленном комплексе на загрязнение гексахлорбензолом объектов окружающей среды Европейского севера Российской Федерации : автореф. дис. ... канд. хим. наук. М., 2012. 22 с.
2. *Колпакова Е. С.* Хлорфенольные соединения в пресноводных экосистемах Архангельской области / Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018 : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (24–27 сент. 2018 г.). Севастополь, 2018. С. 585–587.
3. *Колпакова Е. С., Швецова Н. В.* Хлорфенольные соединения в промышленных почвах Архангельской области / Биоразнообразии экосистем Крайнего Севера: инвентаризация, мониторинг : тез. докл. III Всерос. науч. конф. (20–24 нояб. 2017 г.). Сыктывкар, 2017. С. 280–283.
4. *Михайлова Д. Л., Кольдибекова Ю. В.* Оценка воздействия хлороформа при поступлении в организм с питьевой водой на состояние здоровья детей // Вестн. Перм. ун-та. Биология. 2012. № 2. С. 85–89.
5. Обзор гидрометеорологических условий на территории Архангельской области [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sevmeteo.ru/> (дата обращения 18.03.2019).
6. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: Гигиенические нормативы. ГН 2.1.5.1315-03. М.: Рос. регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Министерства здравоохранения Российской Федерации, 2003. 84 с.
7. СанПин 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901798042> (дата обращения 18.03.2019).
8. Хлорфенольные соединения в донных осадках озер Кенозерского национального парка / А. Ф. Троянская, Е. С. Колпакова, И. А. Никитина, Т. А. Королева // Экоаналитика – 2011 : Тез. VIII Всерос. конф. по анализу объектов окружающей среды (26 июня – 2 июля 2011 г.). Архангельск, 2011. С. 270.
9. *Gribble G.* Natural Organohalogens. Science Dossier. Euro Chlor, 2004. 60 p.
10. *Watts P., Long G., Meek M. E.* Chloroform. Concise International Chemical Assessment Document 58. World Health Organization, 2004. 10 p.

УДК 543.054:543.544.5.068.7:54.064

Сравнительный анализ содержания ПАУ в донных отложениях водных объектов и оценка возможных источников их поступления

В. Е. Котова (Valentina.E.Kotova@gmail.com)¹Ю. А. Андреев (y.andreev@gidrohim.com)^{1,2}¹ Гидрохимический институт, г. Ростов-на-Дону² Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

Аннотация. Исследованы 64 пробы донных отложений трех районов озера Байкал и 12 проб трех рукавов устьевого части реки Дон, отобранных в 2016 г., определены уровни содержания полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Интервалы суммарных массовых долей составили 17–910 и 13–340 нг/г сухого остатка (с.о.), содержание канцерогенных ПАУ – 1,5–388 и 0,5–180 нг/г с.о., доли канцерогенных ПАУ от общего количества – 27 и 44 % для образцов из озера Байкал и реки Дон соответственно. В данной работе показано, что содержание канцерогенных соединений не всегда напрямую зависит от суммарного содержания ПАУ. По отношению маркерных ПАУ установлена наиболее вероятная природа поступления исследуемых соединений в донных отложениях. Анализ полученных результатов показал, что значительный вклад обусловлен пирогенным источником ПАУ во все изученные объекты.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ), донные отложения, озеро Байкал, река Дон, загрязнение.

Введение

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) как компоненты нефтепродуктов являются объектом пристального внимания уже многие годы. Агентство по охране окружающей среды США (EPA) и ЕС включили 16 соединений в перечень особо опасных загрязняющих веществ, что объясняется их мутагенным и канцерогенным действием: нафталин (Naph), аценафтилен (Acn), аценафтен (Ace), флуорен (Fl), фенантрен (Phe), антрацен (An), флуорантен (Flu), пирен (Py), бензо[а]антрацен (B[a]A), хризен (Chry), бензо[б]флуорантен (B[b]F), бензо[к]флуорантен (B[k]F), бензо[а]пирен (B[a]P), дибензо[а, h]антрацен (DB[a, h]A), бензо[g, h, i]перилен (B[g, h, i]P), индено[1, 2, 3-cd]пирен(In[cd]P) [7].

Источники поступления ПАУ многочисленны и по характеру воздействия разделяются на природные (лесные пожары, извержения вулканов) и антропогенные (сжигание бытовых отходов, отопление жилых помещений с использованием различных видов топлива, вы-

хлопные газы транспортных средств, табачный дым). Иногда источники происхождения характеризуют как пирогенные (образование ПАУ при относительно высоких температурах до 650–690 °С и недостатке кислорода в пламени при сжигании углеводов) и петрогенные (связаны с использованием нефти и продуктов ее переработки). Попадая в водоемы, ПАУ, благодаря своим липофильным свойствам, сорбируются взвешенными частицами, оседают и со временем накапливаются в донных отложениях. Это способствует включению ПАУ в пищевые цепи гидробионтов, а также может привести к вторичному загрязнению воды водоемов [6].

Поскольку некоторые ПАУ обладают канцерогенными и мутагенными свойствами, их содержание в воде нормируют: 10 мкг/дм³ для Naph и 5 нг/дм³ для B[a]P в питьевой воде; 10 мкг/дм³ для Naph и 10 нг/дм³ для B[a]P в воде хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования и 4 мкг/дм³ для Naph в воде рыбохозяйственного значения [8; 12]. Максимальные содержания ПАУ в донных отложениях российскими нормативными документами не лимитируются, установлены нормативы только для почв по B[a]P (0,02 мг/кг) и сумме нефтепродуктов (180–1000 мг/кг) [1].

Целью данной работы является сравнение уровней загрязнения ПАУ донных отложений водных объектов разного типа, а также установление источника поступления компонентов нефтепродуктов в исследуемые объекты при использовании оценок на основе отношения маркерных соединений.

Объекты исследования

Изучение содержания углеводов в донных отложениях озера Байкал проводили в трех подверженных наиболее сильному антропогенному воздействию районах: северная часть озера – зона влияния Байкало-Амурской магистрали (БАМ); устье реки Селенга – Селенгинское мелководье; район бывшего Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК). Отбор проб в рамках государственного экологического мониторинга по аналогии с более ранними исследованиями [10] проводился ФГБУ «Иркутское УГМС» при участии ФГБУ «Гидрохимический институт» в сентябре – октябре 2016 г. (3 района – 64 пробы). Донные отложения северной части озера и района бывшего БЦБК представлены алевритовыми илами с различной долей пелитовой и песчаной фракций (глубины отбора до 300 м); донные отложения Селенгинского мелководья выражены мелкозернистыми песками

с примесью среднезернистых песков и алевритовых илов (глубина отбора до 100 м).

Для изучения содержания ПАУ в донных отложениях устьевое участка реки Дон анализировали пробы, отобранные из трех рукавов: Мертвый Донец, Песчаный и Переволока. Отбор проводился сотрудниками Донской устьевой станции (ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС») в апреле, мае, июле и октябре 2016 г. (3 района – 12 проб). Донные отложения рукавов Мертвый Донец и Переволока представлены алевритовыми илами (глубины отбора 2–6 м); донные отложения рукава Песчаный – мелкозернистыми песками с примесью среднезернистых в апреле и мае; мелкозернистыми песками с примесью алевритовых илов в июле и октябре (глубина отбора 2–5 м). Схемы отбора проб представлены на рис. 1 и 2.

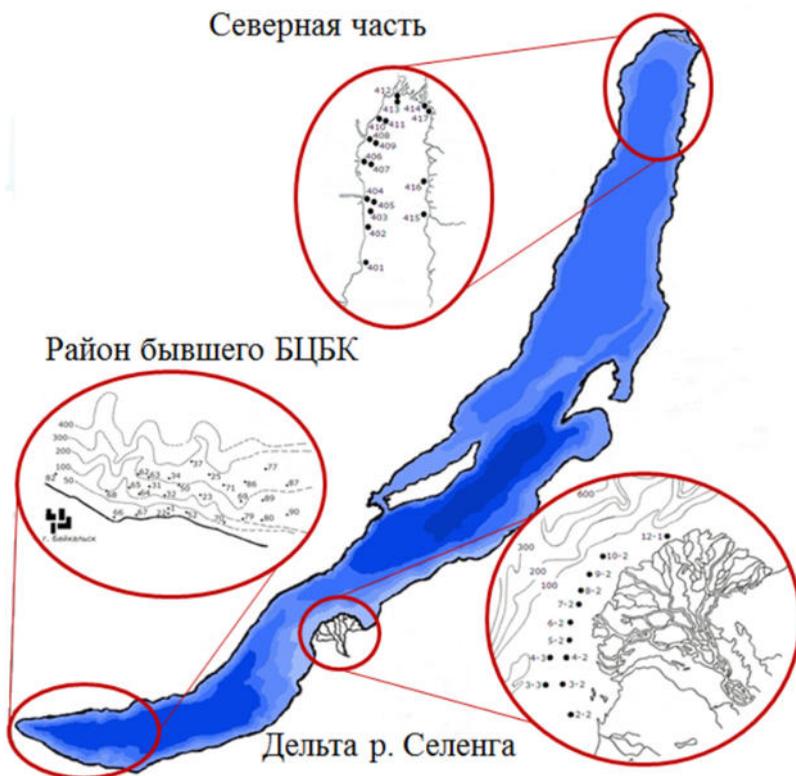


Рис. 1. Схема расположения точек отбора проб. Озеро Байкал

Методы исследования

В работе применяли образцы веществ индивидуальных ПАУ производства Suprelco с содержанием основного вещества не менее 98 % и алифатические углеводороды. Использовали растворители отечественного производства (гексан, ацетон, метиленхлорид), квалификации не ниже «химически чистый», после очистки двукратной перегонкой. Ацетонитрил производства Криохром, сорт 0, и Lab-Scan для высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) применяли без дополнительной очистки. Навески реактивов и проб донных отложений отбирали с помощью весов специального (Sartorius B 210S) и высокого (Sartorius ВЛТ-150-П) классов точности с дискретностью отсчета 0,0001 г и 0,001 г соответственно.

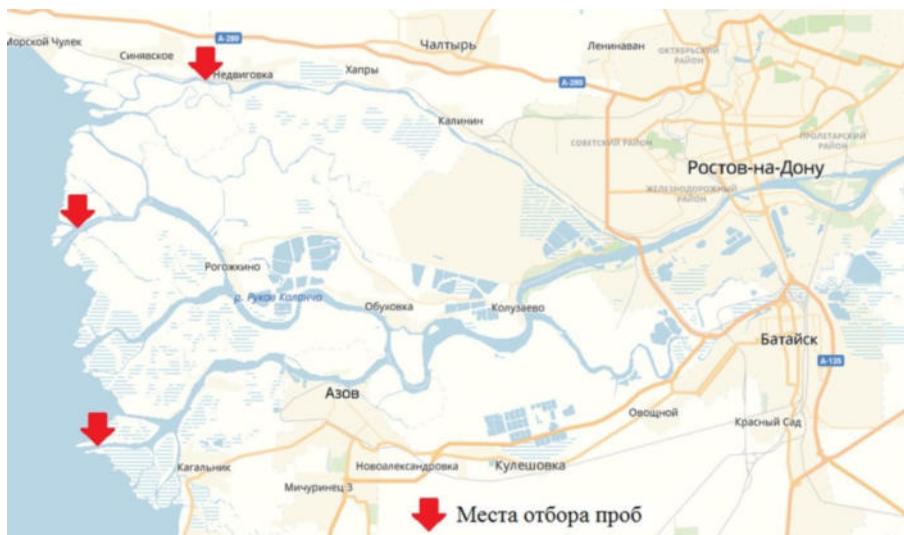


Рис. 2. Схема расположения точек отбора проб. Река Дон (устье)

Определение ПАУ проводили методом ВЭЖХ на жидкостном хроматографе Agilent Technologies 1260 Infinity со спектрофлуориметрическим детектором с аналитической колонкой ZORBAX Eclipse PAH: внутренний диаметр – 3,0 мм, длина – 250 мм, размер зерна фазы – 5 мкм. Обработку хроматограмм выполняли при помощи программного обеспечения Chemstation.

Подготовка проб осуществлялась с помощью экстракционного извлечения веществ смесью органических растворителей из донных отложений; очистки экстрактов перераспределением через воду; выделения фракции ПАУ с помощью колоночной хроматографии на силикагеле [2; 4; 9].

Возможность определения индивидуальных ПАУ позволяет отдельно оценить содержание канцерогенных веществ и общей токсичности в бензо[а]пиреновом эквиваленте. Поскольку некоторые вещества из группы ПАУ имеют канцерогенные свойства, то рассчитывали значения общей токсичности в бензо[а]пиреновом эквиваленте (далее – $OT_{B[a]P}$). Бензо[а]пирен – единственное вещество из группы ПАУ, для которого достаточно токсикологических данных для определения фактора канцерогенности. Для оценки содержания именно канцерогенных представителей в составе всей группы использовали суммарные концентрации канцерогенных ПАУ (далее – $kPAU$)

$$kPAU = \sum(V[a]A + V[b]F + V[k]F + V[a]P + DB[ah]A + In[cd]P). \quad (1)$$

Для остальных потенциально токсичных ПАУ рассчитаны относительные величины, выраженные как фактор токсической эквивалентности бензо[а]пирену (далее – ФТЭ). Согласно Агентству по охране окружающей среды США, для $V[a]A$, $V[a]P$, $V[b]F$, $V[k]F$, $DB[a,h]A$ и $In[cd]P$ значения ФТЭ составляют 0,1, 1, 0,1, 0,01, 1 и 0,1 соответственно [13]. Значения общей токсичности в бензо[а]пиреновом эквиваленте рассчитывали по формуле

$$OT_{B[a]P} = \sum ФТЭ \cdot kPAU. \quad (2)$$

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования показали, что приоритетные ПАУ присутствуют во всех образцах изученных объектов. На рисунках 3 и 4 приведены хроматограммы экстрактов донных отложений, отобранных из озера Байкал и устья реки Дон.

Результаты изучения суммарных содержаний ПАУ, бензо[а]пирена, канцерогенных ПАУ и их доли от суммарного содержания ($kPAU\%$), а также значения общей токсичности для донных отложений исследованных объектов представлены в табл.1 и 2 для озера Байкал и устья реки Дон соответственно.

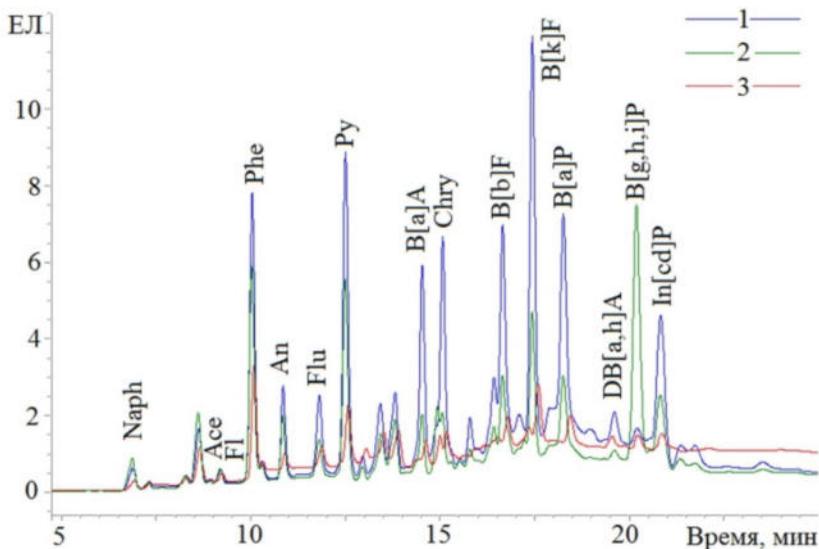


Рис. 3. Объединенные хроматограммы экстрактов донных отложений, отобранных из района бывшего БЦБК (1), северной части озера (2) и дельты реки Селенга (3) в 2016 г.

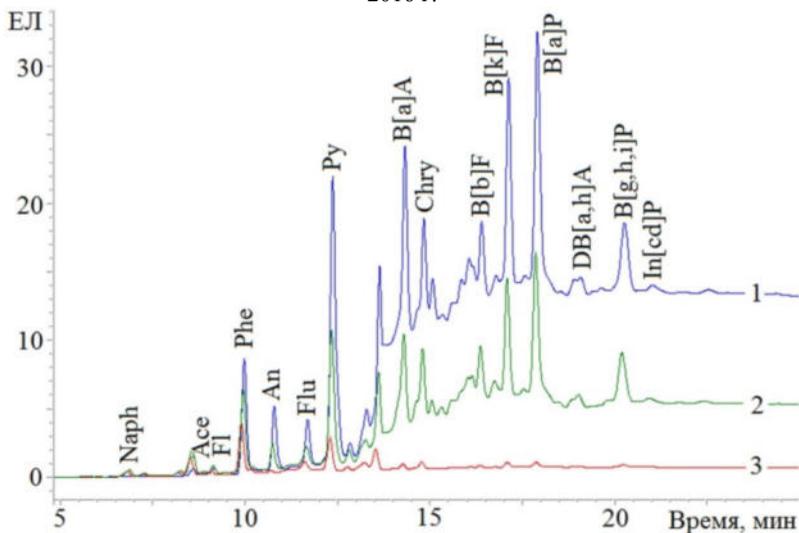


Рис. 4. Объединенные хроматограммы экстрактов донных отложений, отобранных из рукавов Мертвый Донец (1), Переволока (2) и Песчаный (3) в апреле 2016 г.

Таблица 1

Результаты определения ПАУ в донных отложениях оз. Байкал, нг/г сухого остатка (с.о.) (в числителе – интервалы значений, в знаменателе – среднее арифметическое значение)

Район	Сумма ПАУ	В[а]Р	кПАУ	кПАУ %, %	ОТ _{В[а]Р}
Район БЦБК (35 проб)	<u>17–910</u> 366	<u>0,2–33</u> 13	<u>1,5–388</u> 137	<u>9–51</u> 36	<u>0,3–65</u> 24
Северная часть (17 проб)	<u>20–379</u> 126	<u>0,3–9,2</u> 3	<u>2,1–90</u> 28	<u>9–40</u> 22	<u>0,3–16</u> 5
Устье реки Селенга (12 проб)	<u>25–232</u> 98	<u>0,2–6,2</u> 2	<u>2,1–83</u> 28	<u>10–32</u> 23	<u>0,2–13</u> 5
Среднее значение	197	6	64	27	11

По результатам определений (табл. 1) более загрязненным по суммарным массовым долям ПАУ является озеро Байкал (наиболее загрязненный район озера – район бывшего БЦБК). Высокие суммарные содержания ПАУ в озере Байкал могут быть связаны с присутствием бóльшего количества низкомолекулярных соединений, которые в условиях низких температур и отсутствия солнечного света способны сохраняться и накапливаться за счет более медленного окисления при таких условиях. При сравнении массовых долей ПАУ, полученных для устьевых частей рек Селенга и Дон, выявлено, что, несмотря на близкие значения суммарных содержаний ПАУ, в донных отложениях дельты реки Дон определены бóльшие содержания бензо[а]пирена и канцерогенных ПАУ.

Таким образом, общая токсичность и сумма канцерогенных ПАУ не всегда зависят от общей загрязненности района напрямую. Анализ результатов изучения только суммарного содержания ПАУ, свидетельствующий о наличии загрязнения, не позволяет оценить того влияния, которое могут оказывать данные вещества на изучаемый природный объект. При детальном рассмотрении значений изученных величин из таблиц 1 и 2, а также их сопоставления, можно сделать вывод о большей «токсической» нагрузке на экосистему реки Дон при меньшем уровне загрязнения по сравнению с озером Байкал – доля именно канцерогенных (более тяжелых ПАУ) находится в обратной зависимости от суммарного содержания. Только для однотипных проб, отобранных в одном и том же месте проведения наблюдений в разные месяцы, имеется взаимосвязь доли канцерогенных веществ от суммарных содержаний ПАУ, что обусловлено сопоставимостью процессов их аккумуляции в донных отложениях.

Таблица 2

Результаты определения ПАУ в донных отложениях устья реки Дон, нг/г с. о.
(в числителе – интервалы значений, в знаменателе – среднее арифметическое значение)

Район	Сумма ПАУ	В[а]Р	κПАУ	κПАУ %, %	ОТ _{В[а]Р}
Мертвый Донец (4 пробы)	$\frac{176-299}{217}$	$\frac{14-27}{18}$	$\frac{89-159}{113}$	$\frac{50-54}{52}$	$\frac{20-38}{27}$
Переволока (4 пробы)	$\frac{61-340}{176}$	$\frac{3,7-31}{15}$	$\frac{26-180}{91}$	$\frac{43-56}{50}$	$\frac{5,6-44}{21}$
Песчаный (4 пробы)	$\frac{13-129}{55}$	$\frac{0,3-11}{4}$	$\frac{0,5-66}{23}$	$\frac{4-51}{30}$	$\frac{0,1-16}{6}$
Среднее значение	149	12	76	44	18

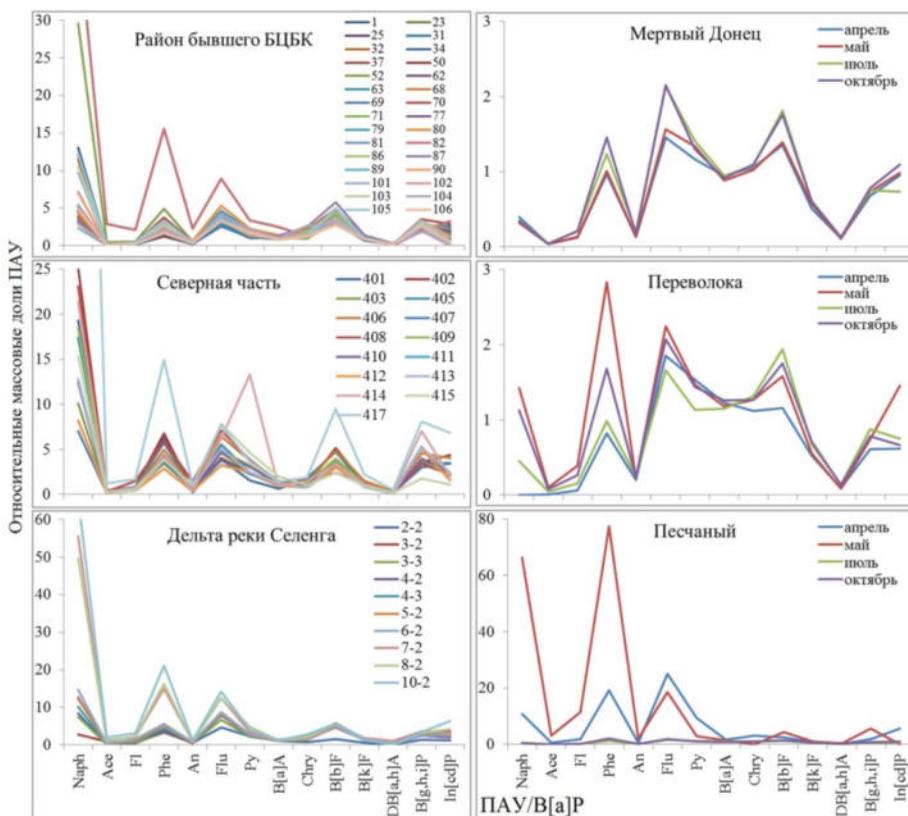


Рис. 5. Профили ПАУ проб донных отложений изученных объектов

Основой идентификации источников поступления углеводородов по отношению маркерных соединений является рассмотрение профилей ПАУ (отношений массовых долей каждого из ПАУ к массовой доле бензо[а]пирена), которые имеют одинаковые максимумы и аналогичны для однотипных источников, но изменяются при переходе к другому типу источников. Изучение профилей ПАУ исследованных проб показало, что практически во всех распределениях максимумы наблюдаются для фенантрена, флуорантена и бензо[б]флуорантена (рис. 5), что говорит о преобладании однотипных источников поступления ПАУ, а именно источников, связанных с процессами горения [11], что также доказано данным исследованием. Для проб озера Байкал характерны большие, чем для проб реки Дон, максимумы для низкомолекулярных соединений (особенно для нафталина). Различия в профилях ПАУ для рукава Песчаного можно связать с изменением типа отобранных донных отложений (увеличением сорбции тяжелых ПАУ с увеличением доли илистой фракции).

Для определения возможных источников поступления ПАУ во все исследуемые пробы выбран способ оценивания отношений маркерных веществ, критерии которых представлены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики источников поступления ПАУ [14; 15]

Отношение ПАУ	Петрогенный источник	Смешанный источник	Пирогенный источник	
			Горение нефтепродуктов	Горение древесины, угля, травы
$An/(An+Phe)$	$< 0,1$	-	$> 0,1$	
$Flu/(Flu+Py)$	$< 0,4$	-	$0,4 \div 0,5$	$> 0,5$
$B[a]A/(B[a]A+Chry)$	$< 0,2$	$0,2-0,35$	$> 0,35$	
$In[cd]P/(In[cd]P+B[g,h,i]P)$	$< 0,2$	-	$0,2 \div 0,5$	$> 0,5$
$(Flu+Py)/(Chry+Phe)$	$< 0,5$	-	$> 0,5$	

По найденным массовым долям рассчитывали значения соответствующих критериев и представляли в виде графиков взаимной зависимости, которые для исследуемых объектов представлены на рис.6.

Результаты идентификации источников поступления ПАУ (рис. 6) в донные отложения северной части озера Байкал показали, что по критерию $Flu/(Flu+Py)$ основная доля точек расположена в зоне пирогенного источника. По критерию $An/(An+Phe)$ пробы, имеют преимущественно пирогенное происхождение. По критерию на основе

бензо[а]антрацена поступление ПАУ в пробы идентифицировано как пирогенное. Оценка по критерию $\text{In}[\text{cd}]\text{P}/(\text{In}[\text{cd}]\text{P}+\text{B}[\text{g,h,i}]\text{P})$ выявила преимущественно смешанный и пирогенный источники поступления ПАУ. Использование критерия $(\text{Flu}+\text{Py})/(\text{Chry}+\text{Phe})$ показало, что основной источник поступления ПАУ – пирогенный.

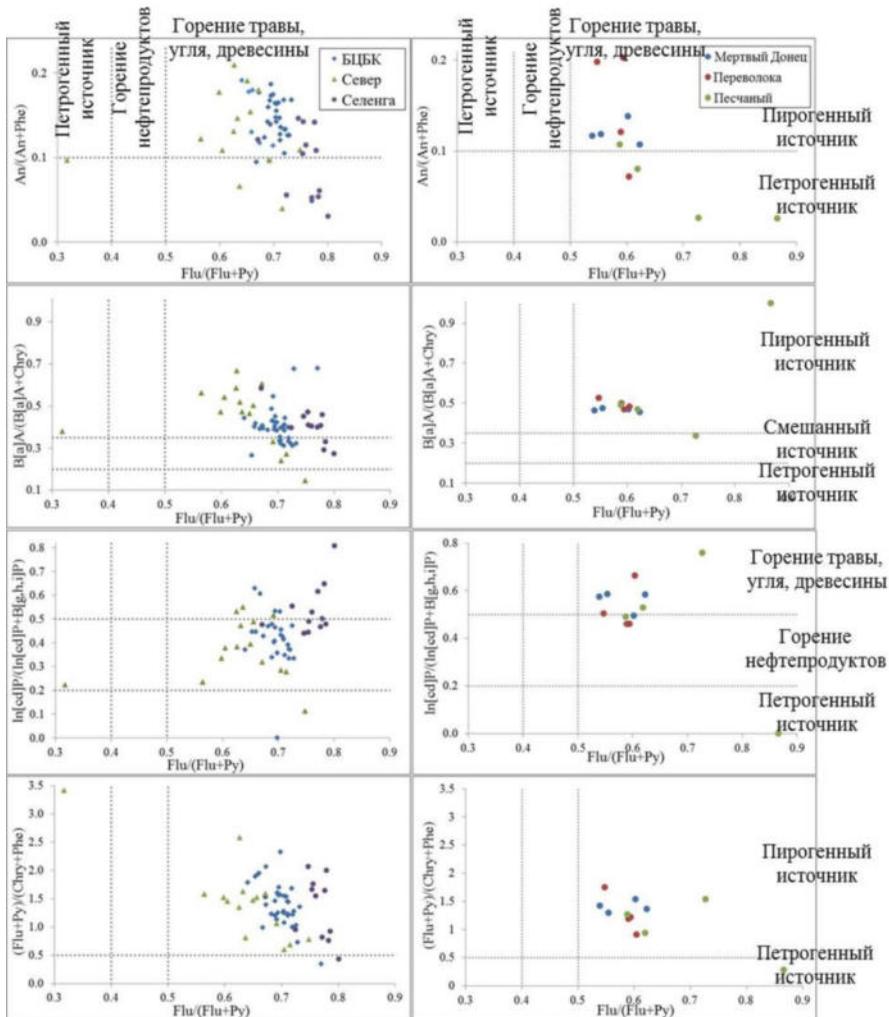


Рис. 6. Графики взаимных зависимостей критериев отношений маркерных ПАУ для донных отложений озера Байкал и реки Дон

Для проб Селенгинского мелководья критерий $\text{Flu}/(\text{Flu}+\text{Py})$ выявил пирогенное происхождение ПАУ для всех проб. Близкие распределения проб по источникам получены для критериев на основе содержания антрацена, бензо[а]антрацена и индено[1,2,3-*cd*]пирена и $(\text{Flu}+\text{Py})/(\text{Chry}+\text{Phe})$: происхождение преимущественно пирогенное [3].

Установление источников происхождения ПАУ в донных отложениях района бывшего БЦБК показало, что по критерию на основе содержания флуорантена большинство проб имеет преимущественно пирогенную природу. По критерию $\text{An}/(\text{An}+\text{Phe})$ и $(\text{Flu}+\text{Py})/(\text{Chry}+\text{Phe})$ преобладают ПАУ пирогенного происхождения. Оценка по критериям на основе бензо[а]антрацена и индено[1,2,3-*cd*]пирена выявила преимущественно смешанный (связанный с горением нефтепродуктов) и пирогенный источники поступления ПАУ.

Полученные данные согласуются со сложившейся ситуацией в регионе: ежегодные лесные пожары способны приносить значительное количество ПАУ в окружающую среду.

Идентификация источников поступления ПАУ в донные отложения устьевой части реки Дон выявила основное пирогенное происхождение по всем критериям. Такое распределение говорит о содержании преобладающего количества ПАУ, образованных в результате процессов горения, что можно связать с большой транспортной нагрузкой данного района (сжигание различных видов топлива, в том числе жидких углеводородов, а также миграция ПАУ с выхлопными газами транспорта) [5].

Таким образом, в результате данного исследования получены данные о содержании ПАУ в донных отложениях разных типов водных объектов – озера Байкал и устьевой части реки Дон. На примере этих объектов доказано, что содержание канцерогенных соединений не зависит от суммарного содержания ПАУ, поэтому высокое суммарное содержание ПАУ в озере Байкал не свидетельствует о большей загрязненности токсичными веществами по сравнению с рекой Дон. Идентификация источников поступления ПАУ на основе отношений маркерных соединений показала согласованность результатов по всем критериям, которые указывают на преобладающую пирогенную природу углеводородов в донных отложениях устья реки Дон и пирогенное и смешанное происхождение – для донных отложений озера Байкал.

Список литературы

1. Капелькина Л. П. Гармонизация экологических стандартов II (ГЭС II). Промежуточный технический отчет. Нормативы качества окружающей среды. СПб., 2008. 18 с. URL:

<http://www.libed.ru/knigi-nauka/870198-6-es-rossiya-programma-sotrudnichestva-garmonizaciya-ekologicheskikh-standartov-ges-ii-zaklyuchitelnyy-tehnicheskyy-ot.php> (дата обращения 29.03.2019).

2. Котова В. Е., Андреев Ю. А., Черновянц М. С. Хроматографическое изучение компонентного состава нефтепродуктов в донных отложениях // Сорбционные и хроматографические процессы. 2016. Т. 16, № 6. С. 885–892.

3. Котова В. Е., Андреев Ю. А., Черновянц М. С. Идентификация источников поступления полициклических ароматических углеводородов в донные отложения озера Байкал // Вода: химия и экология. 2017. № 4. С. 71–76.

4. Пат. 2646402 Российская Федерация. Способ подготовки проб для определения алифатических и полициклических ароматических углеводородов в донных отложениях / В. Е. Котова, Ю. А. Андреев; заявитель ФГБУ «Гидрохимический институт»; приоритет 28.02.2017. 17 с.

5. Котова В. Е., Андреев Ю. А. Исследование источников поступления компонентов нефтепродуктов в объекты окружающей среды г. Ростова-на-Дону // Системы обеспечения технософерной безопасности: материалы V Всерос. науч. конф. и шк. для молодых ученых (с междунар. участием). (5–6 окт. 2018 г.). Таганрог: ЮФУ, 2018. С. 131–133.

6. Никаноров А. М., Страдомская А. Г. Проблемы нефтяного загрязнения пресноводных экосистем. Ростов н/Д: НОК, 2008. 222 с.

7. Ноллет Л. М. Л. Анализ воды: справочник: пер. с англ. 2-го изд.; под ред. И. А. Васильевой, Е. Л. Пролетарской. СПб.: Профессия, 2012. 920 с.

8. Предельно-допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: ГН 2.1.5.1315-03. Введ. 2003-15-06; ГН 2.1.5.2280-07 Дополнения и изменения № 1 к ГН 2.1.5.1315-03. Введ. 2007-15-12.

9. РД 52.24.537-2019. Массовая доля полициклических ароматических углеводородов в донных отложениях. Методика измерений методом высокоэффективной жидкостной хроматографии со спектрофлуориметрическим детектированием. Ростов н/Д, 2019. 47 с.

10. Динамика накопления полициклических ароматических углеводородов в донных биоценозах озера Байкал по результатам биогеохимического мониторинга / С. А. Резников, О. В. Якунина, А. А. Матвеев, Н. Н. Лукьянова, И. В. Богуш, Р. А. Аджиев // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 80–90.

11. Ровинский Ф. Я., Теплицкая Т. А., Алексеева Т. А. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л.: Гидрометиздат, 1988. 224 с.

12. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества»: СанПин 2.1.4.1074-01. Введ. 2002-01-01.

13. Determination of 16 priority polycyclic aromatic hydrocarbons in bottom sediments of the Danube estuarine coast by GC/MS / K. K. Tsybalyuk, Y. M. Den'ga, N. A. Berlinsky, V. P. Antonovich // Geo-Eco-Marina. 2011. N 17. P. 67–72.

14. Vane C. H., Harrison I., Kim A. W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments from the Mersey Estuary, U.K. // Science of the Total Environment. 2007. N 374. P. 112–126.

15. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition / M. B. Yunker [et al.] // Organic Geochemistry. 2002. Vol. 33. P. 489–515.

УДК 528.946/504.453

Моделирование системы мониторинга гидрологических явлений территории гидропоста – г. Павловск (Воронежская область)

В. В. Кульнева (vedma_Via@mail.ru)

А. В. Звягинцева (zvygincevaav@mail.ru)

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж

Аннотация. Приводится пример построения моделей системы мониторинга опасных гидрологических явлений. Описана теоретическая часть построения модели, приведены расчеты обводненности территории, служащие основой для ее построения. Доказано, что подобный подход на основе наблюдения позволяет не только давать оценку и прогноз развития процессов затопления территорий, но может быть использован для прогноза развития других опасных экологических процессов.

Ключевые слова: мониторинг, подтопление, обводненность, клетчатка Хазина, критерии Смирнова – Граббса и Диккенса, прогнозные модели.

Река Дон – самая большая река Воронежской области. Дон имеет площадь водосбора равную 422 000 км². Преобладает снеговое питание (до 70 %). Полная длина реки Дон составляет 1870 км [1; 2]. Протяженность Дона по территории области составляет 526 км [1]. Границу с Ростовской областью Дон пересекает на 966 км от устья, у с. Белая Горка 2-я Богучарского муниципального района. На метеостанциях проводятся ежедневные наблюдения за основными климатическими показателями. В последние 20-30 лет произошло сокращение количества пунктов метеорологических наблюдений. Сейчас на территории Воронежской области функционирует 9 метеостанций федерального уровня, в городах: Воронеж, Анна, Борисоглебск, Лиски, Нижнедевицк, Павловск, Калач, Каменная степь, Богучар и метеорологический пост в г. Новохоперск. На метеостанции в г. Павловск за последние годы были зафиксированы следующие показания:

1. Толщина льда на реках – 26–40 см (100–200 % от нормы).
2. Глубина промерзания почвы – 63–105 см (на крайнем юге области – 51 см) 100–130 % от нормы.
3. Запас воды в снежном покрове – 55–90 мм.
4. Средняя высота снежного покрова – 25–38 см, в южной – 15–16 см, что составляет 100–200 % от нормы, в отдельных пунктах ниже нормы [2; 3].

Наибольшие уровни весеннего половодья были характерны для 60–70 гг. XX в. При этом для реки Дон максимальный уровень половодья колебался от 930 до 1144 см в зависимости от местоположения водомерного поста и климатических особенностей года.

Изменение уровней сезонных половодий на гидрологических постах Среднего Дона зависит от климатических, геоморфологических и гидрологических условий конкретного поста [4; 5]. На территории области на фоне относительно маловодных лет наблюдаются отдельные годы с максимальными значениями показателей. Интервал между пиками половодья на реке Дон (с. Гремячье) высотой более 700 см составляет 3–4 года. Каждые 7–8 лет уровень половодья достигает более 800 см. (рис. 1). На территории области для бассейна Дона одним из главных природных факторов возникновения высоких уровней половодья является сочетание половодий отдельных притоков (Северный Донец, верховье Дона).

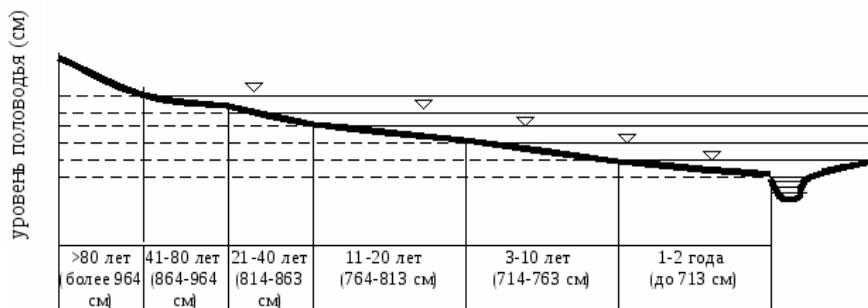


Рис. 1. Повторяемость максимальной высоты половодья на р. Дон (г. Павловск)

Важной характеристикой сезонных половодий является максимальный и минимальный расход воды. На р. Дон за 100-летний период наблюдений максимальный расход воды изменяется от 11 200 м³/см³ в 1888 г. до 8060 м³/см³ в 1951 г., минимальный от 370 м³/см³ в 1975 г. до 112 м³/см³ в 1972 г. Средний объем половодья на территории области равен 4,93 км³ (слой стока 89 мм), что составляет 62 % объема годового стока. Наибольший объем половодья 10,7 км³ (слой стока 154 мм) отмечен в 1970 г., наименьший – 10,4 км³ (слой стока 15 мм) в 1972 г.

Наблюдения за уровнем воды чаще всего подчинены общей задаче учета стока воды, но могут иметь и самостоятельное значение. В первом случае наблюдения за уровнем воды должны быть организо-

ваны таким образом, чтобы в результате можно было достаточно точно определить величину среднего суточного уровня.

Частота регистрации высоты уровня в течение суток зависит от характера уровненного режима реки. Основными сроками наблюдений являются 8 и 20 часов. В периоды половодья и дождевых паводков, кроме указанных сроков, необходимо назначать дополнительные сроки наблюдений через равные промежутки времени: 2, 4, 6 часов, в зависимости от характера и быстроты подъема и спада волны половодья или паводка.

В период летней межени с незначительными колебаниями уровня достаточно вести наблюдения в 8 и 20 часов. Но если в этот период проходят одиночные дождевые паводки, производятся дополнительные наблюдения через равные промежутки времени. В зимний период основные сроки наблюдений сохраняются, но во время замерзания и вскрытия реки, когда наблюдаются шугоходы, ледоходы и сопровождающие их явления зажоров и заторов, в дополнение к основным срокам ведутся учащенные наблюдения через равные интервалы.

Измерения толщины льда, снега на льду и подледной шуги производят 10, 20-го числа и в последний день месяца. Особое внимание обращают на явления, которые могут значительно изменить естественный ход уровня. К числу их в первую очередь относят зажоры и заторы; необходимо установить место и время их возникновения и причины образования. Наблюдения за ледовой обстановкой осенью и весной проводят на участке поста в течение суток. В осенний период отмечают появление сала, шуги, заберегов, осеннего ледохода, зажоров. В период ледостава дополнительно к измерениям толщины льда отмечают появление полыней, трещин, наледей, в весенний период – появление закраин, подвижки льда, ледоход, образование заторов [5].

Таблица 1

Гидропосты по Воронежской области

1	Дон (с. Гремячье)
2	Дон (пгт Нововоронежский)
3	Дон (г. Лиски)
4	Дон (г. Павловск)
5	Девича (с. Нижнедевицк)
6	Девича (с. Девича)
7	Воронеж (пгт Рамонь)
8	Воронеж (с. Чертовицкое)
9	Усмань (Бобровый заповедник)
10	Усмань (пос. Боровое)
11	Хава (д. Ильиновка)

Окончание табл. 1

12	Битюг (г. Бобров)
13	Чигла (пос. Первомайский)
14	Балка Озерки (д. Верхняя Орловка)
15	Осередь (г. Бутурлиновка)
16	Черная Калитва (пгт Ольховатка)
17	Росошь (пгт Подгоренский)
18	Подгорная (г. Калач)
19	Криуша (с. Старая Криуша)
20	Хопер (г. Поворино)
21	Хопер (г. Новохоперск)
22	Ворона (г. Борисоглебск)

В табл. 2 приведен ряд значений годового расхода Q , м³/с р. Дон у г. Павловска (площадь водосбора $A = 422\ 000$ км² за 1997–2014 гг.).

В целях графического отображения изменения весеннего среднегодового расхода реки с течением времени была построена графическая модель хронологического ряда годовых расходов (рис. 2).

Таблица 2

Ряд среднегодовых расходов р. Дон у г. Павловска (Воронежская область)

№ п/п	Год	Дата	Q , м ³ /с*
1	1997	20 марта	698
2	1998	12 марта	714
3	1999	21 апреля	411
4	2000	17 апреля	555
5	2001	25 марта	613
6	2002	20 марта	308
7	2003	22 апреля	801
8	2004	30 марта	331
9	2005	22 апреля	418
10	2006	23 апреля	546
11	2007	15 марта	211

Окончание табл. 2

№ п/п	Год	Дата	Q , м ³ /с*
12	2008	10 марта	329
13	2009	9 апреля	240
14	2010	10 апреля	591
15	2011	12 апреля	755
16	2012	25 апреля	388
17	2013	20 апреля	501
18	2014	21 апреля	451

* взято из справочных данных



Рис. 2. графическая модель хронологического ряда годовых расходов

Анализ графической модели показывает, что ряд годовых расходов можно условно разделить на две части различающихся характером колебаний расходов: 1997–2005 гг. и 2006–2014 гг. В первой половине графика преобладают «пики», а во второй половине «впадины». Расход реки при равных морфометрических показателях зависит от количества растаявшего снега, глубины залегания питающих реку подземных вод, среднегодовой температуры воздуха. Ранжирование ряда и определение эмпирической обеспеченности приведем в табл. 3. В целях построения модели годовых расходов р. Дон у г. Павловска за 1997–2014 гг. необходимо расположить данные в убывающем порядке и определить для каждого члена убывающего ряда эмпирическую обеспеченность, выражаемую в процентах по формуле (1):

$$m = \frac{m}{n+1} * 100 \% \tag{1}$$

где m – порядковый номер значения характеристики стока в убывающем ряду, n – общее число членов ряда ($n = 18$).

Таблица 3

Расчет ординат эмпирической кривой обеспеченности

№ п/п	Год	Q, м³/с*	В убывающем порядке		P _m
			Q, м³/с	Год	
1	1997	698	801	2003	5,3
2	1998	714	755	2011	10,5
3	1999	411	714	1998	15,8
4	2000	555	698	1997	21,1
5	2001	613	613	2001	26,3
6	2002	308	591	2010	31,6
7	2003	801	555	2000	36,8

Окончание табл. 3

№ п/п	Год	Q, м ³ /с*	В убывающем порядке		P _m
			Q, м ³ /с	Год	
8	2004	331	546	2006	42,1
9	2005	418	501	2013	47,4
10	2006	546	451	2014	52,6
11	2007	211	418	2005	57,9
12	2008	329	411	1999	63,2
13	2009	240	388	2012	68,4
14	2010	591	331	2004	73,7
15	2011	755	329	2008	78,9
16	2012	388	308	2002	84,2
17	2013	501	240	2009	89,5
18	2014	451	211	2007	94,7

Зная значения расхода $Q_{и}$ эмпирическую обеспеченность P в клетчатке Хазена строим эмпирическую кривую обеспеченности годовых расходов воды р. Дон у г. Павловска (рис. 3).

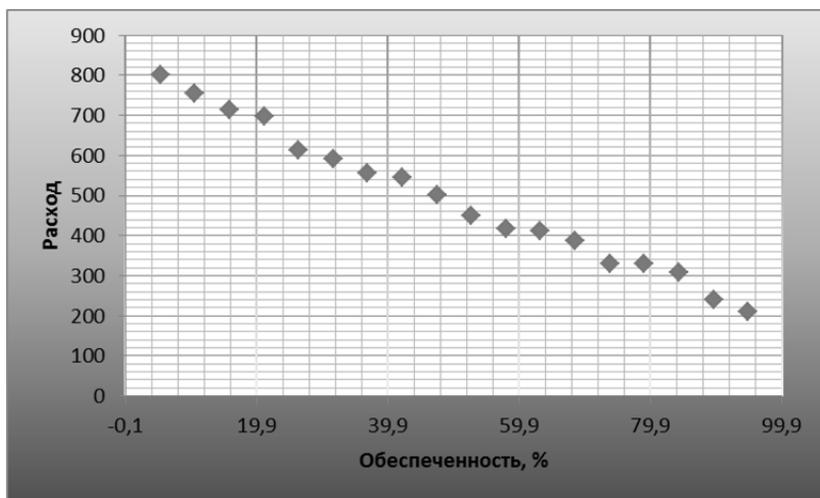


Рис. 3. Эмпирическая кривая обеспеченности годовых расходов воды р. Дон

Проведем анализ однородности ряда с использованием критериев Диксона и Смирнова-Граббса. Анализ эмпирической кривой обеспеченности наталкивает на вывод, что целесообразно проверить первый и последний члены ранжированного ряда на однородность с помощью критериев Смирнова-Граббса и Диксона.

Таблица 4

Ряд годовых расходов р. Дон у г. Павловска упорядоченный по возрастанию

№ п/п	Год	Q, м ³ /с*	В возрастающем порядке	
			Q, м ³ /с	Год
1	2	3	4	5
1	1997	698	211	2007
2	1998	714	240	2009
3	1999	411	308	2002
4	2000	555	329	2008
5	2001	613	331	2004
6	2002	308	388	2012
7	2003	801	411	1999
8	2004	331	418	2005
9	2005	418	451	2014
10	2006	546	501	2013
11	2007	211	546	2006
12	2008	329	555	2000
13	2009	240	591	2010
14	2010	591	613	2001
15	2011	755	698	1997
16	2012	388	714	1998
17	2013	501	755	2011
18	2014	451	801	2003

Для этого годовые расходы р. Дон располагаем в возрастающем порядке (табл. 4).

Находим среднее значение ряда – $Q_{\text{ср}}$ по формуле (2):

$$Q_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{n} ; \quad (2)$$

Среднее квадратичное отклонение: $\partial Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{\text{ср}})^2}{n} / n - 1}$
 $\partial Q = 178,4$ (3)

Статистики критерия Диксона для максимального D_{max} и минимального D_{min} определяется по формулам (4) и (5).

$$D_{\text{max}} = Q_n - Q_{n-1} / Q_n - Q_1 \quad (4)$$

$$D_{\text{max}} = Q_{18} - Q_{17} / Q_{18} - Q_1 = 801 - 755/801 - 211$$

$$D_{\text{max}} = 46/590 = 0,08$$

$$D_{\text{min}} = Q_1 - Q_2 / Q_1 - Q_n \quad (5)$$

$$D_{\text{min}} = Q_1 - Q_2 / Q_1 - Q_{25} = 211 - 240/211 - 801$$

$$D_{\text{min}} = - 29/-590 = 0,05.$$

Для дальнейшей работы с таблицами критериев необходимы несмещенные оценки коэффициента внутри рядной корреляции $r_{\text{нecm}}$ и коэффициента асимметрии $C_{S_{\text{нecm}}}$. Критические значения критерия Диксона для уровня значимости $\alpha = 0,05$, $r_{\text{нecm}} = 0,00$, $C_{S_{\text{нecm}}} = 0,5$, определенные по таблицам приложения 1 для максимального члена выборки равны 0,48, а для минимального 0,31. Поскольку для максимального и минимального членов выборки ряда среднегодовых расходов не выполняются условия $D_{\text{max}} < D_{\alpha}$ и $D_{\text{min}} < D_{\alpha}$, то нулевая гипотеза о принадлежности экстремальных значений выборке противоречит данным наблюдений в соответствии с критерием Диксона на уровне значимости $\alpha = 0,05$. Это значит, что ряд содержит неоднородные максимальные и минимальные значения и для определения параметров эмпирического и теоретического распределений должны быть использованы не все члены ряда. Приведем общую орогидрографическую закономерность – с понижением рельефа обеспеченность местности водой увеличивается. Это обусловлено тем, что на водоразделах мощность зоны аэрации является максимальной, а в долинах – минимальной. Для определения водной обеспеченности морфоструктурных единиц, на которых расположился г. Павловск, используем классическую систему градаций шагом 25 %:

1 % обеспеченность – характерна для водоразделов;

25 % обеспеченность – характеризует вторую надпойменную террасу;

50 % обеспеченность – характерна для первой надпойменной террасы;

75 % обеспеченность – характерна для поймы реки Дон.

Таблица 5

Уровень воды реки Дон в г. Павловск

id	Название пункта наблюдения	Расстояние от истока	Расстояние от устья	Отметка нуля поста, высота
78012	г. Павловск	710 км	1160 км	70,25 м

Сначала поступают данные об уровнях воды на гидрологических постах (табл. 5, рис. 4). Расчеты зоны затопления основаны на статистической обработке данных многолетних наблюдений за период 1997–2015 гг. и модели, учитывающей распространение поверхностных и внутриводных водных потоков, рельефа местности, структуры почвы, растительности. Гидрометеорологические посты наблюдений за последний месяц (замеров уровней воды) представлены на рис. 4.

Построение для участка местности нескольких моделей зон затопления по замерам глубин в разные моменты времени позволяет оценить динамику процесса затопления. Граница зоны, полученная при построении модели, позволяет определить частично или полностью затопленные населённые пункты, дороги, мосты и другие объекты инфраструктуры.

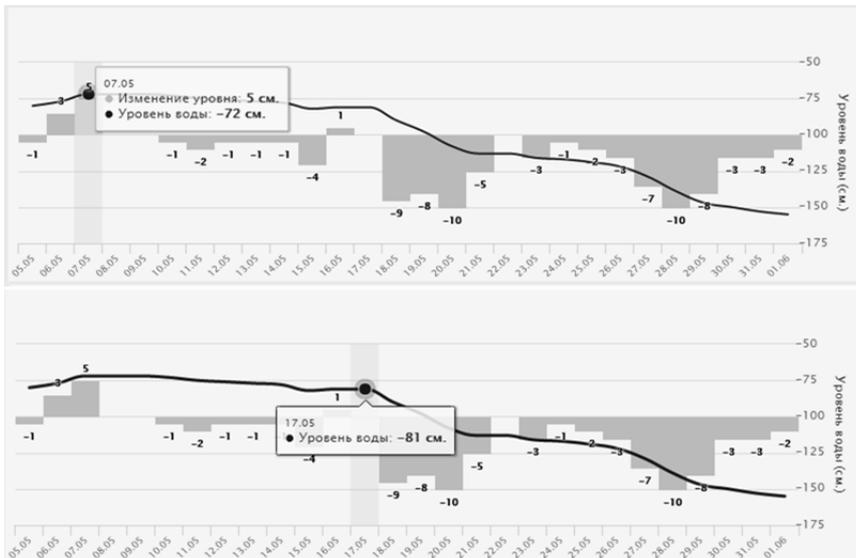


Рис. 4. Общий вид наблюдений на гидрологическом посту г. Павловск – р. Дон за последний месяц

С помощью программного обеспечения FloodMap можно определить риск затопления любой точки земного шара. Задав определённый уровень подъёма воды, можно увидеть к чему это может привести. Если щелкнуть правой кнопкой мыши на каком-либо месте карты, можно увидеть с какого уровня начнется затопление данной территории и в какой степени она окажется под водой на основе введённых мониторинговых данных [6–8].

С применением программного пакета FloodMap были построены зоны затопления г. Павловск (рис. 5–8) различной обеспеченности с использованием данных табл. 6.

Таблица 6

Статистические данные об уровнях воды на гидрологическом посту р. Дон – г. Павловск для построения зон затопления с применением программного пакета FloodMap

Обеспеченность %	Количество метров над уровнем моря
1	96
25	74
50	55
75	33

Таким образом, в случае затопления (подтопления) территории для планирования применения сил и средств по защите населения и территории и детальной оценки обстановки необходимо применение данных дистанционного зондирования Земли и аэрофотосъемка. Сведения о текущем состоянии объектов позволяют более детально и точно спланировать действия направленные на защиту жизни и здоровья населения, а также имущество граждан и различных организация. На основании полученных данных вести построение модели затопления территории по текущим уровням затопления территории с учетом прогноза подъема уровня воды [7; 8].

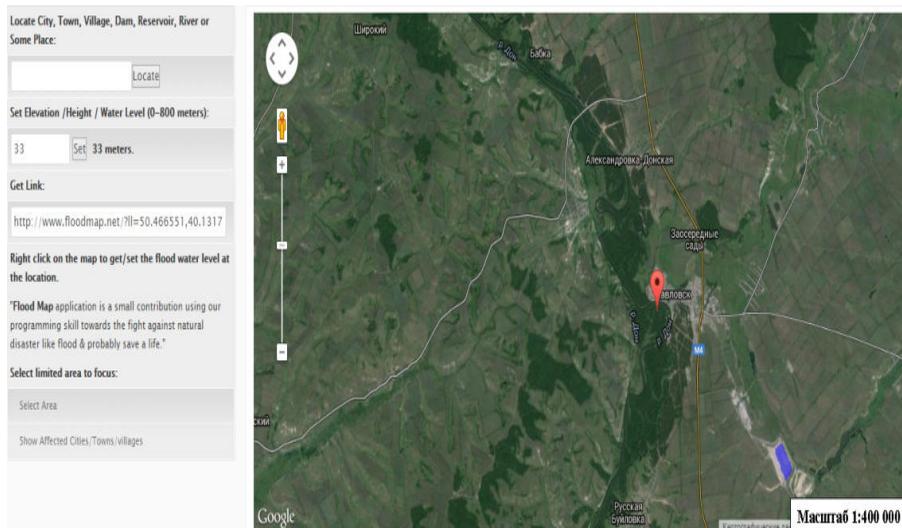


Рис. 5. Подъем уровня воды до отметки 33 м (75 % обеспеченность)

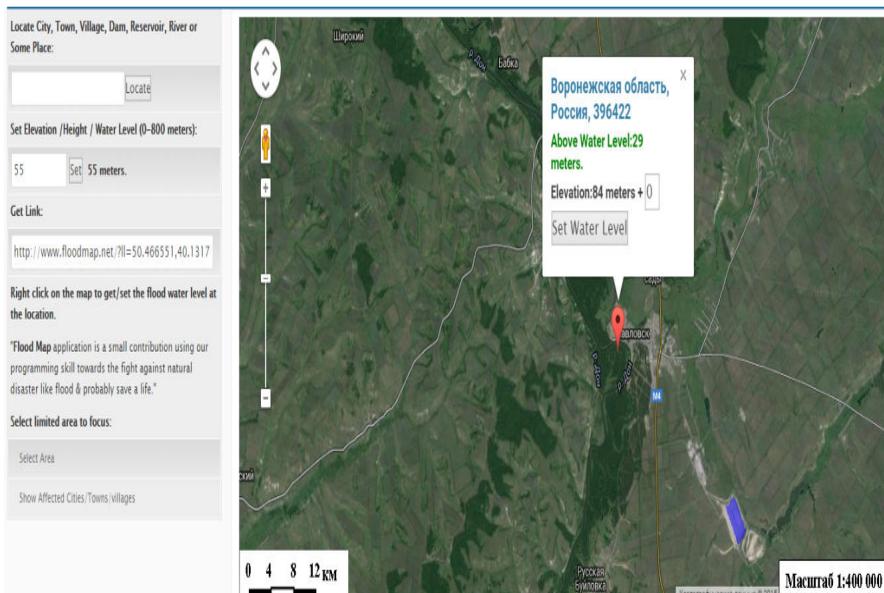


Рис. 6. Подъем уровня воды до отметки 55 м (50 % обеспеченность)

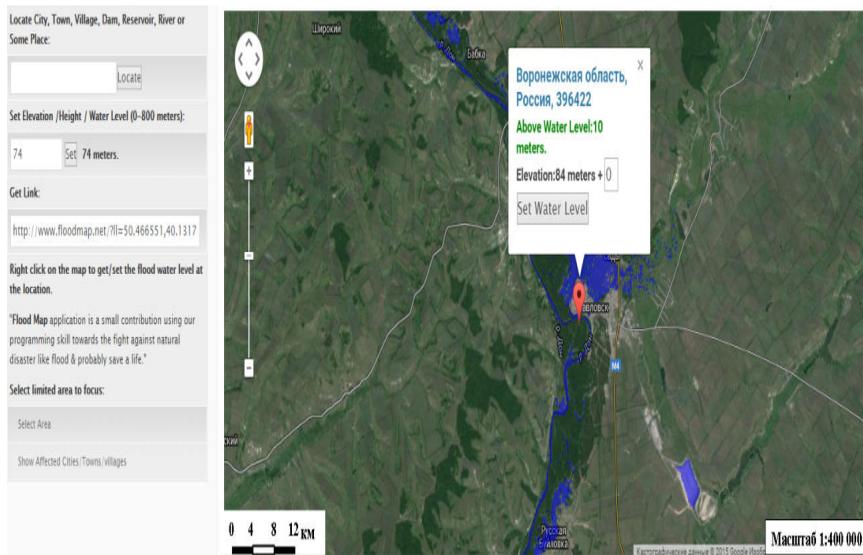


Рис. 7. Подъем уровня воды до отметки 74 м (25 % обеспеченность)

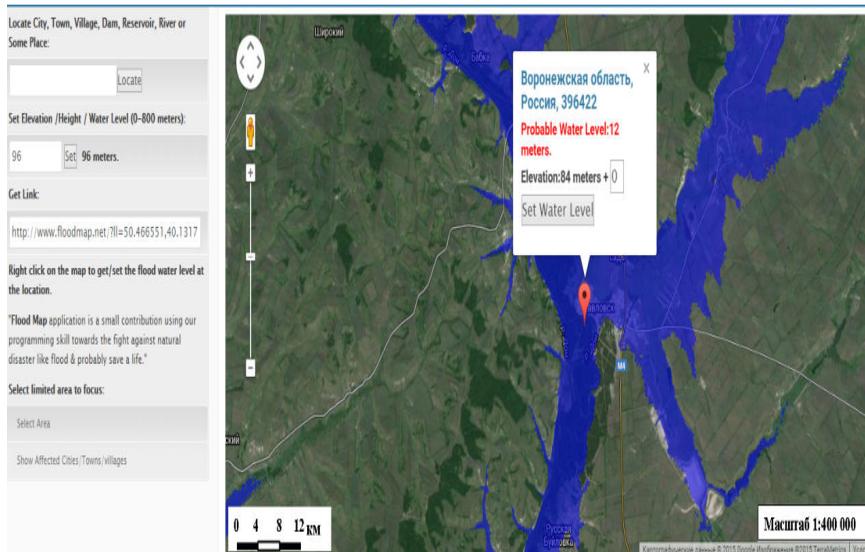


Рис. 8. Подъем уровня воды до отметки 96 м (1 % обеспеченность)

При осуществлении разработки краткосрочных и оперативных прогнозов развития обстановки необходимо использовать текущие данные об уровнях воды на гидропостах. При затоплении г. Павловск в зоне затопления 1 % обеспеченности может оказаться 493 дома.

В качестве инженерных мер защиты могут быть использованы мероприятия по увеличению пропускной способности русла, ограждение территорий дамбами или перераспределение максимального стока водохранилищами, но так как в бассейне реки находится большое количество памятников природы, в том числе гидрологических, то они могут повлиять на экосистему реки и привести к необратимым последствиям. Но наиболее рациональными и оптимальными, на наш взгляд, способами защиты будут являться неинженерные методы, такие как развитие системы страхования и мониторинг развития паводковых процессов.

Таблица 7

Перечень объектов, попадающих в зону возможного затопления г. Павловск

Населенный пункт	Река	Площадь затопления $p = 1\%$, км ²	Количество домов, затопляемых наивысшим уровнем воды с вероятностью превышения $p\%$				
			1	5	10	25	50
Павловск	Дон	1,09	493	260	187	106	58

Следует отметить, что предложенная модель мониторинга также может быть использована для наблюдения, оценки и прогноза таких негативных экологических явлений как «цветение» водных объектов сине-зелеными водорослями [2], стихийных бедствий конвективного происхождения [4; 5], зависящих от неблагоприятных метеорологических условий дестабилизациях обстановки [7; 8].

Список литературы

1. Карты стока рек и временных водотоков / под ред. А. Г. Купцова. Воронеж : Изд-во Воронеж. ун-та, 1975. 142 с.
2. Дмитриева В. А. Изменение водных ресурсов Центрально-Черноземных областей // Воды, ресурсы. 1992. № 4. С. 137–141.
3. Картирование вероятностного стока рек / А. Г. Курдов [и др.]. Воронеж : Изд-во Воронеж. ун-та, 1987. 188 с.
4. Звягинцева А. В., Неижмак А. Н., Расторгуев И. П. Мониторинг стихийных бедствий конвективного происхождения по данным дистанционного зондирования с метеорологических космических аппаратов : монография. Воронеж : Воронеж. гос. техн. ун-т, 2013. 162 с.
5. Звягинцева А. В., Расторгуев И. П., Соколова Ю. П. Прогнозирование опасных метеорологических явлений в определении характера и масштабов стихийных бедствий : монография / под общ. ред. И. П. Расторгуева. Воронеж : ВГТУ, 2009. 247 с.
6. ArcView 3DAnalyst. Руководство пользователя. ESRI Press. 1998. 118 с.
7. Долженкова В. В., Звягинцева А. В., Аржаных Ю. П. Прогнозирование гидрологической обстановки в период половодья на водных объектах Воронежской области с применением географических информационных систем. Гелиогеофизические исследования / Heliogeophysical Research. Результаты исследований геофизических рисков : электрон. науч. журн. 2014. Вып. 9. С. 89–98.
8. Звягинцева А. В., Долженкова В. В. Перспективы применения ГИС-технологий Floodmap при прогнозировании риска затопления на водных объектах Воронежской области // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. Самара : Изд-во Самар. науч. центра РАН. 2015. Т. 17, № 6. С. 70–81.

УДК 502.53-504.06(712.2.025)

Водоохранные зоны морей

Е. В. Потапова (e.v.potapova.isu@mail.ru)

О. А. Бархатова (barhat@geogr.isu.ru)

А. А. Макаров (mak@geogr.isu.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Изучены водоохранные зоны морей, на предмет их структуры и состояния, в границах 12 населённых пунктов в разных странах мира. Отмечена значимость этих участков и проблемы, связанные с застройкой, замусоренностью и отсутствием насаждений. Указано, что несмотря на наличие требований в законодательстве РФ о том, что прибрежная защитная полоса должна быть полностью свободна для прохода, из изученных, только в нашей стране это требование нарушено во всех обследованных поселениях.

Ключевые слова: моря, прибрежная защитная полоса, населённые пункты, нарушение регламента.

В зоне морского побережья проживает около 60 % населения мира, побережье занимает 18 % поверхности Земли, в ней расположены 2/3 городов мира, формируется около 1/4 первичной биологической продукции мира, она дает около 90 % мирового улова рыбы, занимает 8 % площади Мирового океана (<0,5 % его объема), в ней формируется 18–33 % биологической продукции океана, поглощает 75–90 % стока наносов.

Стремительно увеличивается на природу влияние, которое вызывается научно-техническим прогрессом. Проблемы захламления территорий становятся все более острыми по мере исторического развития общества.

Для защиты водных объектов от воздействия антропогенного фактора необходимо производить мониторинг водоохранных зон и прибрежно-защитных полос, позволяющий максимально снизить антропогенное влияние.

Согласно законодательству РФ – ст. 8 Водного кодекса РФ – водные объекты находятся в собственности Российской Федерации (федеральной собственности), за исключением некоторых прудов и обводненных карьеров). Поверхностные водные объекты, находящиеся в государственной или муниципальной собственности, являются водными объектами общего пользования, т. е. общедоступными водными объектами. Каждый гражданин вправе иметь доступ к водным объектам общего пользования и бесплатно использовать их для личных и бытовых нужд.

Каждый водный объект имеет водоохранную зону, которые прилегают к береговой линии (границам водного объекта) морей, рек, ручьев, каналов, озер, водохранилищ и на которых устанавливается специальный режим осуществления хозяйственной и иной деятельности в целях предотвращения загрязнения, засорения, заиления указанных водных объектов и истощения их вод, а также сохранения среды обитания водных биологических ресурсов и других объектов животного и растительного мира. Ширина водоохранной зоны моря составляет 500 м.

Полоса земли вдоль береговой линии (границы водного объекта) водного объекта общего пользования (береговая полоса) предназначена для общего пользования. Ширина береговой полосы водных объектов общего пользования составляет 20 м. Каждый гражданин вправе пользоваться (без использования механических транспортных средств) береговой полосой водных объектов общего пользования для передвижения и пребывания около них, в том числе для осуществления любительского и спортивного рыболовства и причаливания плавучих средств.

Береговая линия (граница водного объекта) для моря определяется по постоянному уровню воды, а в случае периодического изменения уровня воды – по линии максимального отлива.

В границах водоохранных зон устанавливаются прибрежные защитные полосы, на территориях которых вводятся дополнительные ограничения хозяйственной и иной деятельности. Ширина прибрежной защитной полосы устанавливается в зависимости от уклона берега водного объекта и составляет 30 м для обратного или нулевого уклона, 40 м для уклона до 3° и 50 м для уклона 3° и более [1].

Участки земель в пределах прибрежных защитных полос предоставляются для размещения объектов водоснабжения, рекреации, рыбного и охотничьего хозяйства, водозаборных, портовых и гидротехнических сооружений при наличии лицензий на водопользование, в которых устанавливаются требования по соблюдению водоохранного режима. Прибрежные защитные полосы, как правило, должны быть заняты древесно-кустарниковой растительностью или залужены.

Поддержание в надлежащем состоянии водоохранных зон, прибрежных защитных полос и водоохранных знаков возлагается на водопользователей. Собственники земель, землевладельцы и землепользователи, на землях которых находятся водоохранные зоны и прибрежные защитные полосы, обязаны соблюдать установленный режим использования этих зон и полос.

Можно отметить, что установление водоохраной зоны является основой сохранения водных объектов, а проведение мониторинга позволяет вовремя принять необходимые меры и спасти от загрязнений природные ресурсы.

В водном законодательстве, как России, так и мира, по-разному прописаны природоохранные требования и мероприятия. В РФ и странах СНГ еще с советских времен остался принцип дробного деления на определенные границы территорий, прилегающих к побережьям водных объектов (водоохранные зоны, прибрежные защитные полосы и т. п.).

В зарубежных странах же большее внимание уделяется не столько установлению охранных границ, в пределах которых действуют различные запреты хозяйственной и иной деятельности, сколько конкретным природоохранным мероприятиям, касающимся очищения вод, предотвращения их загрязнения и т. д. При этом охранные зоны, ориентированные на защиту особо ценных водных объектов, определяются различными авторскими методиками с экспертной оценкой природно-антропогенной обстановки исследуемой территории.

Методы и материалы

Изучены водоохранные зоны в 12 населённых пунктах – 4 находятся в России, по 3 во Франции и Индии (расположены один за другим) и по одному на Кубе и во Вьетнаме. В границах всех поселений изучена прибрежная защитная полоса шириной в 30 м. Территории иностранных государств изучались для сравнения и выявления общих закономерностей и отличий.

Материалы получены в ходе полевых работ 2005–2017 гг. и анализе данных дистанционного зондирования Земли территорий указанных объектов программы Google Earth и Яндекс-карты.

Для определения компонентно-организационной структуры изучаемой полосы использовалась авторская методика [2] с выделением следующих категорий участков:

1. Замощённые, с искусственным покрытием (более 70 %) – участки заасфальтированные, забетонированные, оформленные камнем, засыпанные обломочным, строительным материалом и т. д.

2. Заболоченные – различной степени заболоченности участки, со специфичной растительностью, прохождение по которым из-за переувлажнения затруднено. Такие территории не отмечены в исследованных пунктах.

3. Недоступные – находящиеся за ограждением.

4. Оголённые – участки, на которых древесно-кустарниковая растительность отсутствует, а травянистая составляет менее 10 %. Они могут быть представлены естественными пляжами или растительность на них может быть уничтожена в результате антропогенной деятельности.

5. Насаждения – участки, на которых более 50 % составляют деревья, кустарники и/или более 90 % травы.

6. Другое – выявлены участки, занятые особенными элементами, это могут быть, например, другие водные объекты.

Отдельно выделялись объекты озеленения, если они представляли собой специальный объект, отмеченный на карте населённого пункта.

Отметим, что на многих участках можно выделить две или более категорий, чаще всего прибрежная полоса состоит из пляжа – галечно-песчаного, примыкающего к урезу воды, а за ним расположена, например мощёная набережная, далее и/или рядовые посадки деревьев и кустарников, поэтому общая протяжённость обследованной территории не составляет сумму длин участков.

Результаты

В таблице 1 приведены полученные количественные параметры изученных территорий.

Таблица 1

Участки водоохраных зон морей в границах населённых пунктов

Населённый пункт	Протяжённость, км	Объектов озеленения, шт.	Длина участков разных категорий, м				
			Недоступные	Замощение	Оголённые	Насаждения ¹	Другое
Адлер	16,1	-	3737	6394 ²	10027	ед. ³	200
Анапа	17,4	-	2330	2230	16170	ед.	-
Гурзуф	6,2	-	4621	1729	2498	-	723
Владивосток	12,4	2 (4) ²	6629	3194	3149	676	-
Нячанг (Вьетнам)	12	5	2496	1939	7342	7777	889
Калангут – Бага (Индия)	9	-	1491 ²	-	7500	-	1491 ²
Варадеро (Куба)	22,9	1	1478 ²	2136	18506	3098	-
Довиль – Вилерсюр-Мер (Франция)	8,2	-	420	1300	7670	-	470 ²
Итого	104,2	8 (10)	23 202	18 922	72 862	11 551	3773

¹ – в длину участков с насаждениями входят и объекты озеленения; ² – пояснение в тексте соответствующего поселения; ³ – насаждения встречаются единично.

В **Адлере** изучена вся территория Адлерского района. Ширина береговой линии, галечных пляжей от 10 до 35 м, преимущественно свобода, за исключением нескольких участков около санаториев по 129, 340 и 442 м, отрезка железной дороги, подходящей фактически к урезу воды длиной 846 м, участков в Олимпийской деревне около 300 м и порт 1588 м. Замошение отмечено на большей части территории, пляжи отделены бордюрами, за которыми проходит набережная, она местами прерывается, редко на ней расположены одиночные насаждения. 200 м в графе таблицы – «другое», приходится на места впадения рек.

Анапа – единственный курорт в России, где прибрежная полоса практически полностью свободна для прохождения, за исключением естественных обрывистых участков. Территория прибрежной полосы условно разделяется на три отрезка – первый, длиной более 10 км, до 100 м шириной, так называемый золотой пляж – покрыт песком. Далее участок около 1 км занят причалами и портовыми сооружениями и третий – около 4 км, каменистый, 10–20 м шириной ограничен обрывом до 20 м высотой. Из недоступных 2330 м, около 1000 м не имеют спуска к берегу.

Гурзуф расположен на склоне и застройка близко подходит к воде. Большая часть берега – недоступна, даже на пляжи, которые являются общественными, вход платный был и во времена Украины, и остаётся сейчас. В границах поселения много санаториев и их пляжей, которые доступны только при наличии санаторно-курортных книжек. Более 1,5 км занимает территория Артека, также закрытая для посещения или частично за плату. Имеется небольшой участок ООПТ – «Дача Чехова», примерно в 150 м. Несколько участков (около 700 м) береговой линии – это скалы и полуостровки вдающиеся в море. В нескольких местах в границах прибрежной полосы имеются единичные и условно рядовые посадки деревьев и кустарников.

Чем застроено и почему огорожено около 7 км береговой линии Амурского залива во **Владивостоке** сложно понять – это какие то будки и амбары, гаражи и просто заборы, кафе и даже участки, имеющие отметки – «пляж», но огороженные и не имеющие входа. Огромные промышленные зоны и портовые сооружения и даже стадион, стоящий в 15 м от воды, относящийся к объектам озеленения общего пользования, но не имеющий вокруг ни одного кустика. Второй стадион и рядом парк, где насаждения отмечены. Прибрежная полоса узкая – до 15 м, каменистая в нескольких местах обрывистая, тоже недо-

ступная. Большая её часть закрыта набережной, кое-где нависающей над водой.

Курорт **Нячанг** славится своим широким песчаным, полностью открытым и озеленённым практически по всей длине пляжем. Замоещение отмечено на участках специальных объектов озеленения.

Изученная прибрежная полоса в штате **Гоа**, между населёнными пунктами Бага и Калангут представляет собой полностью открытый доступный песчаный пляж от 30 и более 100 м шириной, на границе которого располагаются маленькие частные кафе. Недоступный участок представлен природным обрывистым выступом, покрытым естественной растительностью, поэтому он указан и в графе – «Другое», но на нём уже начинается застройка.

Город **Варадеро** также практически на всём протяжении характеризуется открытым песчаным пляжем, замощение – это территории нескольких отелей ближе других расположенные к урезу воды. В нескольких местах (600, 930 и 700 м), насаждения расположены плотной посадкой.

Побережье Франции в проливе Ла-Манш, между населёнными пунктами **Довиль и Виллер-сюр-Мер** имеет особенную структуру. С одной стороны оно полностью открыто. Песчаный пляж 20–250 м шириной ничем не ограничен для прохождения, лишь небольшой участок порта в 420 м и тот не закрыт для посещения. Но за пляжем расположена сплошная линия домов, кемпингов и между ними проходы к морю расположены иногда на значительном удалении более 300 м. Между населёнными пунктами есть участки, ещё покрытые естественной растительностью, но есть участки, где к самому краю обрыва в море подходят сельскохозяйственные угодья.

На рисунке 1 для сравнения представлены прибрежные зоны, различного компонентно-организационной структуры.

Известно, что береговые зоны значительно влияют на качество воды и состояние водной экосистемы. Более подробное изучение состояния прибрежной полосы в местах высокой антропогенной нагрузки позволят сделать вывод, как неблагоустроенные места отдыха и несанкционированные места сброса стока и т. п. нарушают экологическое состояние водных объектов. В связи с этим, изучение, восстановление и защита водоохранной зоны и прибрежной полосы является одной из актуальных задач на данный момент.

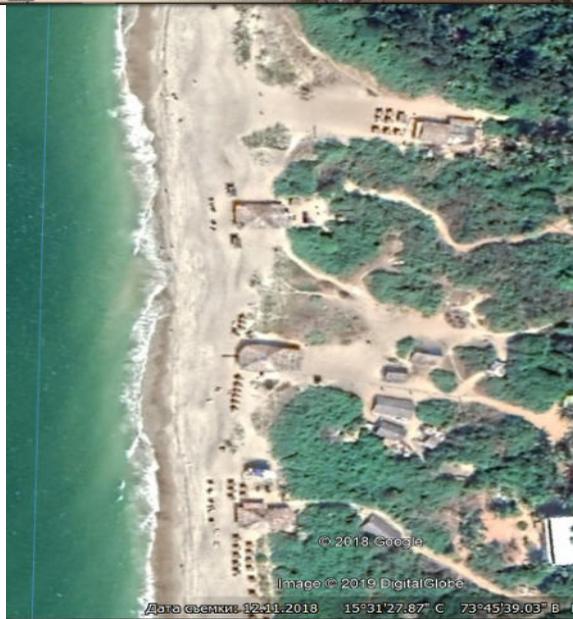
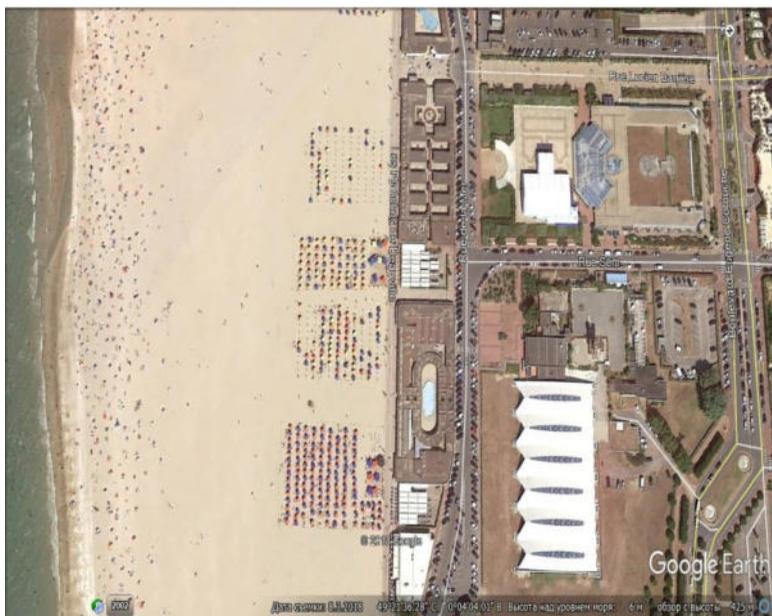


Рис. 1. Спутниковый снимок прибрежной зоны: слева – Франция, справа – Индия (ГОО)

Выводы

1. Совокупно, по всем исследованным населённым пунктам преобладающим компонентом организации являются открытые оголённые участки пляжей. Насаждения редкие, часто единичные, несмотря на то что их наличие могло бы обеспечить часто необходимое затенение, но этого обычно добиваются размещением зонтов. Интересные примеры использования пальм для рассеяния солнечного света есть в Нячанге.

2. Несмотря на наличие требований в законодательстве РФ о том, что прибрежная защитная полоса должна быть полностью свободна для прохождения, из изученных, только в нашей стране это требование нарушено во всех обследованных поселениях.

Список литературы

1. Водный кодекс Российской Федерации : федер. закон от 3 июня 2006 г. № 74-ФЗ // КонсультантПлюс [Электронный ресурс] : справочная правовая система.
2. *Потапова Е. В.* Методология анализа состояния озеленённых территорий населённых пунктов : монография. Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2016. 160 с.
3. *Большаков А. Г.* Принципы организации прибрежных территорий как экологического каркаса города // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Биология. Экология. 2011. Т. 4, № 2. С. 3–11.

УДК 556.555

Новые данные об экологическом состоянии озера Байкал

С. А. Резников (s.reznikov@gidrohim.com)

М. Н. Аниканова

О. В. Якунина

Р. А. Аджиев

ФГБУГХИ Росгидромета, г. Ростов-на-Дону

Аннотация. Приведены результаты современных наблюдений уровня концентраций гидрохимических показателей в воде северной оконечности оз. Байкал. Дана оценка загрязнённости озера по гидрохимическим, геохимическим и гидробиологическим показателям как в районе, подверженном наиболее интенсивному антропогенному воздействию, так и по фоновому району Северного Байкала.

Ключевые слова: трасса БАМ, гидрохимические показатели воды, полициклические ароматические углеводороды, обрастания, макрофиты, численность микрофлоры воды, численность и биомасса фитопланктона, видовой состав фитопланктона.

Регулярные комплексные (гидрохимические, геохимические и гидробиологические) съёмки в северной части озера в районе выхода к побережью трассы БАМ проводятся Росгидрометом с 1981 г.

Отбор проб осуществляют в весенне-летний и осенний периоды в прибрежном, 1 км по ширине, районе озера на 17 станциях, расположенных на участке от мыса Котельниковский до устья р. Томпуда (рис. 1). Для сравнения, как фоновые отбираются пробы на четырех реперных станциях центрального разреза через Северный Байкал. На микробиологический анализ отбирают также пробы из поверхностного горизонта водной толщи в нижнем течении пяти северных рек: Рель, Тья, Кичера, Верхняя Ангара и Томпуда.



Рис. 1. Схема отбора проб воды и донных отложений в районе трассы БАМ

В современную эпоху, в связи с промышленным освоением бассейна озера Байкал, экосистема Байкала испытывает влияние несвойственных ей нагрузок в районе Северного Байкала.

Исключительная значимость проблемы охраны озера Байкал требует наблюдений за химическим составом воды и донных отложений во всех районах с применением наиболее чувствительных и оперативных методов и критериев оценки антропогенного воздействия, позволяющих отметить изменения в экосистеме Байкала как по химическому составу воды и донных отложений, так и по динамике биологических сообществ.

Данные гидрохимических съемок сопоставляются с результатами контроля предшествующих лет и наблюдениями на фоновых вертикалях Северного Байкала.

Гидрохимическая характеристика района, прилегающего к трассе БАМ (табл. 1) свидетельствует об увеличении в среднем за пятилетний период значений цветности в 1,2 раза, взвешенных веществ в 1,8 раза и углерода органического в 1,5 раза по сравнению с фоновым районом озера (табл. 2). В 2018 г. в этом районе отмечен рост концентраций общих и органических форм фосфора и азота в среднем в 1,6 раза.

Таблица 1

Средняя концентрация контролируемых показателей в районе Северного Байкала, прилегающего к трассе БАМ

Показатели	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
$t, ^\circ\text{C}$	16	10,4	12,8	9,7	11,6
pH, ед	7,6	7,7	7,7	7,7	7,7
Цветность, $^\circ$	13,2	11	5,5	6,3	10,2
O_2 , мг/л	10,9	11,2	10,5	11,6	10,5
Сумма ионов, мг/л	93	93	95	94	91
SO_4^{2-} , мг/л	5,3	5,8	6,0	5,7	6,4
PO_4^{3-} , мг/л	0,002	0,003	0,002	0,003	0,005
Cl^- , мг/л	0,8	0,7	0,7	0,6	0,7
Взвеш. в-ва, мг/л	0,3	0,1	0,6	0,4	0,7
НФПР, мг/л	0,010	0	0	0	0,010
$\text{C}_{\text{орг}}$, мг/л	3,4	3,6	1,8	1,4	1,9
N-NO_2^- , мг/л	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
N-NO_3^- , мг/л	0,018	0,016	0,008	0,005	0,010
N- NH_4^+ , мг/л	0,005	0,002	0,005	0,003	0,006
$\text{P}_{\text{общ.}}$, мг/л	0,029	0,007	0,007	0,014	0,014
$\text{P}_{\text{орг.}}$, мг/л	0,032	0,004	0,005	0,011	0,009
$\text{N}_{\text{общ.}}$, мг/л	0,253	0,260	0,430	0,353	0,286
$\text{N}_{\text{орг.}}$, мг/л	0,245	0,257	0,423	0,350	0,277
Si, мг/л	1,2	1,8	0,5	0,7	0,9
насыщение, %	103	98	97	99	94

Таблица 2

Средняя концентрация контролируемых показателей в районе Северного Байкала по продольному разрезу (фон)

Показатели	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
t, °С	9,4	7,4	7,1	5,7	8,1
pH, ед.	7,6	7,8	7,7	7,8	7,7
Цветность, °	12,8	7,4	4,1	5,3	9,6
O ₂ , мг/л	11,0	11,0	10,8	11,9	11,0
Сумма ионов, мг/л	96,8	95,1	97,6	97,3	95,5
SO ₄ ²⁻ , мг/л	5,4	5,6	6,4	5,6	6,1
PO ₄ ³⁻ , мг/л	0,002	0,003	0,003	0,002	0,004
Cl ⁻ , мг/л	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
Взвеш. в-ва, мг/л	0,1	0,1	0,3	0,3	0,4
НФПР, мг/л	0,009	0	0	0	0,005
C _{орг} , мг/л	2,2	1,6	1,5	1,3	1,5
N-NO ₂ ⁻ , мг/л	0,0007	0,001	0	0,001	0,001
N-NO ₃ ⁻ , мг/л	0,024	0,017	0,017	0,010	0,008
N- NH ₄ ⁺ , мг/л	0,003	0,002	0,012	0,007	0,006
P _{общ} , мг/л	0,039	0,007	0,010	0,014	0,006
P _{орг} , мг/л	0,036	0,004	0,006	0,012	0,008
N _{общ} , мг/л	0,289	0,231	0,500	0,363	0,174
N _{орг} , мг/л	0,286	0,229	0,487	0,356	0,169
Si, мг/л	1,0	1,2	0,5	0,6	0,7
насыщение, %	98	93	95	97	93

Высокая сейсмичность Байкальского региона оказывает влияние на содержание в воде озера соединений серы и общей минерализации. Так, например, в 2016 и 2018 г. фиксировалась серия землетрясений в Среднем и в Северном Байкале. Это явилось причиной увеличения концентраций сульфатных ионов и общей минерализации Байкала, особенно в его средней и северной котловинах (рис. 2).

Биогеохимический анализ накопления полициклических ароматических углеводородов в обрастаниях в зоне влияния трассы Байкало-Амурской магистрали

Известно, что донные отложения прибрежной полосы на севере озера сформированы в основном под влиянием стока рек: Верхняя Ангара, Кичера, Тья, Рель.

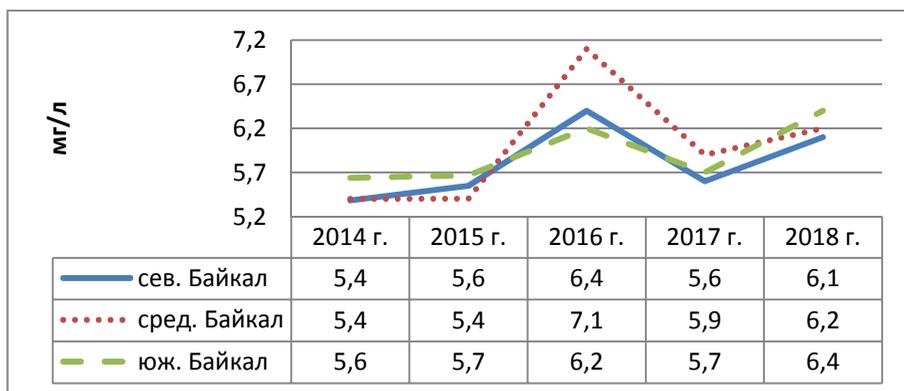


Рис. 2. Динамика сульфатных ионов в воде оз. Байкал

Следует выделить, что в настоящее время именно биогеохимический контроль над уровнем антропогенного воздействия на озеро Байкал через состояние гидробионтов является важнейшей проблемой, стоящей в системе комплексного мониторинга байкальского региона. Гидробиоценоз является конечным звеном воздействия загрязняющих веществ на экосистему озера. Ранее по этой проблеме было выполнено исследование концентрирования полиаренов ПАУ в макрозообентосе с учетом накопления последних в донных отложениях [2; 4].

В 2017 г. биогеохимические исследования для полигона на севере озера были выполнены впервые. Макрофиты (обрастания) ведут прикрепленный образ жизни в прибрежной мелководной зоне побережья на глубинах до 0,5 м. Доминирующим видом макрофитов в биотопе полигона является нитчатая водоросль улотрикс, которая образует поля из тины зеленого цвета на разнозернистом гравийно-галечном субстрате. При сравнении накопления ПАУ в обрастаниях в 2017 г. в мелководной зоне полигонов в районе бывшего комбината и зоне влияния трассы БАМ отчетливо видно, что накопление суммы полиаренов в районе трассы БАМ оказалось в 1,4, а содержание малоядерных аренов в 6 раз выше, чем в районе бывшего комбината. Данное обстоятельство может косвенно свидетельствовать о том, что содержание ПАУ в воде на севере озера в 2017 г. значительно больше, чем в районе бывшего комбината. Следует заметить, что максимальное содержание ПАУ отмечено именно в районе г. Нижнеангарск – 145,0 нг/г с. в., который является одним из основных поставщиков загрязнителей озера (табл. 3). Относительно меньшее воздействие антропогенного фактора зафиксировано у г. Северобайкальск (39,9 нг/г) и в устье

р. Тья (59,3 нг/г). За фоновое содержание можно условно принять результаты химического анализа полиаренов в районе авандельты р. Верхняя Ангара (19,3 нг/г), где в береговой полосе практически отсутствует активная антропогенная деятельность.

В тоже время в районе бывшего БЦБК содержание бенз(а)пирена и канцерогенных аренов было больше соответственно в 2,2 и 2,5 раза, чем на севере озера. Последнее может свидетельствовать о разном качественном и количественном составе поступающих с селитебных территорий стойких органических загрязнителей (табл. 4).

Таблица 3

Среднее содержание полиаренов ПАУ в обрастаниях на севере озера Байкал в районе трассы БАМ, сентябрь 2017 г., в нг/г с. о.

Арены ПАУ	г. Нижнеангарск	г. Северо-байкальск	Авандельта р. Верхняя Ангара	Авандельта р. Тья	Среднее значение
2–3-ядерные	66,6	23,1	15,5	39,5	36,2
4-ядерные	54,2	9,9	2,6	14,2	20,2
5-ядерные	18,1	4,7	1,0	4,1	7,0
6-ядерные	6,1	2,2	0,2	1,5	2,5
Канцерогенные арены	30,6	8,4	1,5	6,6	11,8
Сумма ПАУ	145,0	39,9	19,3	59,3	65,8

Таблица 4

Среднее содержание полиаренов ПАУ в обрастаниях мелководной зоны побережья оз. Байкал в районе бывшего БЦБК в 2014–2017 гг. и трассы БАМ в 2017 г., в нг/г с. в. (числитель – диапазон содержаний, знаменатель – среднее значение)

Полиарены/год	2014 г. БЦБК	2015 г. БЦБК	2017 г. БЦБК	2017 г. БАМ
Сумма ПАУ	<u>23,2–28,5</u> 25,8	<u>10,3–41,0</u> 19,1	<u>15,2–141,7</u> 47,4	<u>19,3–145,0</u> 65,8
Бенз(а)пирен	<u>0,5–1,2</u> 0,8	<u>0,2–2,3</u> 0,8	<u>0,9–12,9</u> 4,6	<u>0,1–5,5</u> 2,1
Канцерогенные арены	<u>6,6–12,2</u> 9,4	<u>3,7–25,4</u> 9,2	<u>9,0–102,2</u> 30,2	<u>1,5–30,6</u> 11,8
2–3-ядерные арены	<u>9,6–10,6</u> 10,1	3,0–5,5 4,4	<u>2,5–9,9</u> 6,0	<u>15,5–66,6</u> 36,2
Количество проб	2	5	8	4

По данным [1] уровень концентрирования канцерогенного бенз(а)пирена различными видами пресноводных растений одного и того водоема в промышленном районе практически одинаков. Отмечается линейная зависимость между содержанием бенз(а)пирена в водорослях и воде водоема [3; 4]. Поэтому макрофиты в данном случае улотрикс, можно в определенной мере считать достаточно удобным

тест-объектом при оценки загрязнения прибрежных водорослей полиаренами. Все макрофиты в литоральной зоне озера являются однолетними растениями, поэтому каждый год они могут по-разному накапливать загрязняющие вещества, тем самым указывая на различный уровень антропогенного воздействия на конкретном участке озера.

Выводы

Впервые проведенные биогеохимические наблюдения на озере Байкал свидетельствуют, что мелководные макрофиты относительно больше аккумулируют ПАУ, 2–3-ядерные арены, канцерогенные арены, бенз(а)пирен, чем глубоководный макрозообентос [3]. Следует отметить, что содержание ПАУ в обрастаниях, отобранных на полигонах в районе бывшего БЦБК в 2014 г. и трассы БАМ в 2017 г. 2–3-ядерные арены доминируют среди других ПАУ, это можно связать с ростом содержания легких аренов, которые указывают на рост содержания ПАУ в воде (в то время, как в глубоководном макрозообентосе последние имеют подчиненное значение).

Полученные результаты натуральных наблюдений содержания полиаренов ПАУ в мелководных обрастаниях озера свидетельствуют о значительной их разнице в концентрациях для двух анализируемых районов озера обладающих различной антропогенной нагрузкой, что может свидетельствовать о разноплановом (компонентном) загрязнении озерной воды, где макрофиты выступают в виде индикаторных показателей имеющего место загрязнения. От гранулометрической характеристики донного гравийно-галечного субстрата обрастаний адсорбционная способность накопления загрязняющих веществ уло-триксом роли не играет.

В биогеохимическом мониторинге ПАУ можно использовать тот факт, что низкомолекулярные ПАУ, более гидрофильные, чем многоядерные. Тогда 2–3-ядерные арены будут являться показателем загрязнения озера, но уже опосредственно через содержание стойких органических загрязнителей в макрофитах. Интенсивная фильтрация воды скоплениями биоты приводит, как к адгезии, так и накоплению полиаренов непосредственно в талломах макрофитов. Концентрация низкомолекулярных аренов в обрастаниях будет косвенно определять «сиюминутный» показатель загрязнения воды ПАУ на мелководье озера, что подтверждается наблюдениями в районе трассы БАМ в 2017 г. К сожалению, в настоящее время анализ воды озера на содержание в ней ПАУ все еще не проводится.

Проблема обнаружения и идентификации ПАУ в природной среде озера (контроль над уровнем концентрации полиаренов в озерной воде, донных отложениях и как следствие, влияние их на гидробиоценозы), в настоящее время должна рассматриваться с точки зрения качественной и количественной оценки влияния *конкретных* источников загрязнения на экосистему озера.. Проведение режимных наблюдений за макрофитами в мелководной части озера в течение более длительного периода позволит выделить определенные особенности в межгодовой динамике данного процесса.

Гидробиологические наблюдения

Отбор и анализ проб бактерио- и фитопланктона проводился по общепринятым методикам [5; 6].

Бактериопланктон. Гетеротрофные бактерии являются наиболее представительной группой для выявления антропогенного загрязнения. В таблице 5 представлены среднегодовые значения количественного развития гетеротрофных бактерий в прибрежном районе трассы БАМ, которые за период 2014–2017 гг. уменьшились в 2,3 раза в сравнении с 2001–2007 гг., но остаются в 5 раз выше, в сравнении с начальным периодом наблюдений 1981–1985 гг. То же наблюдается и на станциях реперного разреза. Здесь гетеротрофные бактерии достигали максимального развития в период 2001–2007 гг. в 2014–2017 гг. наблюдалось снижение их численности в 2,8 раза, однако оно было в 3,5 раза выше в сравнении с 1981–1985 гг.

Таблица 5

Среднегодовые значения развития гетеротрофных бактерий и фитопланктона (в числителе – пределы, в знаменателе – среднее значение)

Годы наблюдений	Прибрежный район			Центральный (реперный) район		
	Гетеротрофные бактерии кл/мл	Фитопланктон		Гетеротрофные бактерии кл/мл	Фитопланктон	
		Численность тыс. кл/л	Биомасса мг/м ³		Численность тыс. кл/л	Биомасса мг/м ³
1981–1985 гг.	<u>92–216</u> 154	-*	-*	<u>93–148</u> 114	-*	-*
2001–2007 гг.	<u>1247–2495</u> 1715	<u>26–20395</u> 705	<u>12–13699</u> 191	<u>242–1668</u> 1150	<u>38–2447</u> 353	<u>7–605</u> 77
2014–2017 гг.	<u>2–4328</u> 735	<u>85–5213</u> 1188	<u>50–1299</u> 363	<u>4–2589</u> 402	<u>120–5058</u> 800	<u>42–1334</u> 319

* – нет данных.

Многолетние наблюдения показали, что наиболее загрязненными являются приустьевые участки озера. Эта тенденция сохраняется на протяжении всего периода наблюдений. Из таблицы 6 видно, что численность гетеротрофных бактерий остается одинаково высокой на станциях, удаленных на 0,5 и 1,0 км от устьев рек, что указывает на продолжающееся поступление большого количества органического вещества со стоками рек в озеро.

Анализ результатов наблюдений 2014–2014 гг. свидетельствует, что наиболее загрязненной в весенний период, как и в предыдущие годы, является западная прибрежная зона, средняя численность гетеротрофов здесь составляет 724 кл/мл. В осенний период наблюдается увеличение численности гетеротрофов в восточной прибрежной зоне. В центральной части озера наблюдается увеличение численности гетеротрофов осенью в 1,6 раза, в сравнении с весной.

Таблица 6

Среднегодовья (2014–2017 гг.) численность гетеротрофных бактерий и фитопланктона в различных районах северного Байкала
(в числителе – пределы, в знаменателе – среднее значение)

Район озера	Весна			Осень		
	Гетеротрофные бактерии кл/мл	Фитопланктон		Гетеротрофные бактерии кл/мл	Фитопланктон	
		Численность тыс. кл/л	Биомасса мг/м ³		Численность тыс. кл/л	Биомасса мг/м ³
0,5 км от устья	<u>22–2200</u> 564	<u>170–5213</u> 1830	<u>57–</u> <u>1299</u> 638	<u>17–</u> <u>3422</u> 745	<u>85–1389</u> 540	<u>194–</u> <u>1380</u> 540
1,0 км от устья	<u>165–1776</u> 715	<u>388–4656</u> 1766	<u>36–</u> <u>1201</u> 474	<u>73–</u> <u>2495</u> 653	<u>61–337</u> 193	<u>77–441</u> 198
Западный берег	<u>2–4328</u> 724	<u>170–4656</u> 1950	<u>36–</u> <u>1299</u> 504	<u>8–4328</u> 831	<u>168–1389</u> 614	<u>77–441</u> 205
Восточный берег	<u>12–4036</u> 299	<u>353–5213</u> 1508	<u>70–</u> <u>1151</u> 500	<u>3–4036</u> 910	<u>85–643</u> 302	<u>51–369</u> 168
Центральная часть озера	<u>4–2589</u> 309	<u>144–3483</u> 929	<u>33–</u> <u>1333</u> 482	<u>43–</u> <u>2589</u> 500	<u>120–2080</u> 671	<u>47–345</u> 155

Контроль численности гетеротрофов в поверхностном (0,2 м) слое водной толщи в устьях пяти северных рек в 2014–2017 гг., показал, что наиболее загрязненными являются воды рек Верхняя Ангара, Кичера, Тья. В таблице 7 приведена численность гетеротрофов в водах этих рек, которая увеличилась в сравнении с началом наблюдений (1983–1985 гг.) в 2,4–3,2 раза. Влияние вод этих рек распространяется

на приустьевые участки озера более чем на 1 км от береговой линии, а в отдельные годы доходит до центральной части озера. Отдельно следует отметить устьевой участок р. Томпа, в водах которой так же наблюдается увеличение в 2 раза численности гетеротрофов. Последнее можно связать с происходящими здесь природными процессами, частично заболоченным устьем, большим количеством водной растительности, отмирание которой приводит к накоплению легкоокисляемого органического вещества.

Таблица 7

Численность гетеротрофов в воде рек Северного Байкала
(числитель – пределы, знаменатель – среднее значение, кл/мл)

Водный объект	1983–1985 гг.	2014–2017 гг.
р. Рель	$\frac{16-217}{112}$	$\frac{61-1496}{326}$
р. Тья	$\frac{39-592}{316}$	$\frac{46-2832}{760}$
р. Кичера	$\frac{135-423}{302}$	$\frac{484-1784}{940}$
р. Верхняя Ангара	$\frac{171-389}{302}$	$\frac{478-2521}{960}$
р. Томпуда	$\frac{212-741}{477}$	$\frac{229-2832}{938}$

Фитопланктон. Численность фитопланктона в озере подвержена многолетним естественным колебаниям и не всегда может служить хорошим показателем для сравнения. Среднегодовые значения развития фитопланктона представлены в табл. 5. Анализ результатов наблюдений 2014–2014 гг. свидетельствует об увеличении численности и биомассы фитопланктона в 1,7 и 1,9 раза в прибрежной зоне и 2,3 и 4 раза в центральной части озера по сравнению с 2001–2007 гг.

Наиболее высокое развитие фитопланктона наблюдается весной, в этот сезон численность в 1,5–5 раза, а биомасса 2,4–3 раза выше, чем осенью (табл. 6).

В весенний период численность фитопланктона, как и гетеротрофов выше в западной прибрежной зоне, а биомасса одинакова как в западной, так и в восточной прибрежных зонах.

В осенний сезон наиболее высокая численность фитопланктона отмечается в центральной части озера, а самая низкая в восточной прибрежной зонах.

В 2001–2007 гг. альгоценоз северной части озера был представлен 19–145 видами водорослей. Основу доминантного комплекса составляли обычные для Байкала виды водорослей, массово развивав-

шиеся на всей обследованной территории: золотистая водоросль *Chrysochromulina parva* массовая доля, которой в различные годы составляла от 41 до 65 %, криптофитовая *Chroomonas acuta* до 64 %. Значительную численность составляла зеленая водоросль *Monoraphidium pseudomirabile* – от 10 до 29 %. В отдельные сезоны в пробах определяли водоросли *Aulacoseira baicalensis* с массовой долей 10 %, *Anabaena flos-aquae* – до 14 % и *Nitzschia acicularis* – до 19 %.

В 2014–2017 гг. альгоценоз северной части озера в весенний сезон был представлен 19–145 видами водорослей. Основу доминантного комплекса составляли обычные для Байкала виды водорослей, массово развивавшиеся на всей обследованной территории: золотистая водоросль *Chrysochromulina parva* массовая доля которой в различные годы составляла от 45 до 61 %, криптофитовые *Rhodomonas pusilla* – от 30 до 49 % и *Chroomonas acuta* до 42 %. Значительную численность составляли зеленые *Koliella longiseta* – до 41 % и *Monoraphidium pseudomirabile* – от 14 до 35 %. В отдельные годы в пробах, отобранных в западной прибрежной зоне наблюдалась зеленая колониальная водоросль *Dictyosphaerium subsolitaria* с массовой долей до 8 %. Диатомовая водоросль *Synedra acus* – до 33 % и золотистая *Dinobryon cylindricum* – до 16 %. составляли значительную численность по всей восточной прибрежной зоне. В реперной части озера отмечалась криптофитовая водоросль *Cryptomonas erosa* с массовой долей до 21 %. Вдоль западного берега активно развивались синезеленые водоросли р. *Anabaena*, массовая доля которых, на отдельных станциях составляла 60 %. Представители этого рода водорослей в отдельные годы отмечены на 50 % реперных станций, где их массовая доля была от 4 до 13 %. В восточной прибрежной зоне весной представители р. *Anabaena* не обнаружены.

Осенью альгоценоз был представлен 24–89 видами водорослей. Доминантный комплекс водорослей в сентябре был аналогичен июльской съемке. Лидировали криптофитовая водоросль *Rhodomonas pusilla* от 40 до 56 % от общей численности фитопланктона, золотистая водоросль *Chrysochromulina parva* от 25 до 73 % и зеленая *Monoraphidium pseudomirabile* от 12 до 29 %, которые были отмечены в пробах, отобранных на всех станциях.

На станциях, расположенных в северо-восточной части полигона эпизодически отмечали сине-зеленые *Anabaena flos-aquae* (до 8 %) и зеленые колониальные водоросли *Dictyosphaerium pulchellum* (до 6 %).

В 2016 г. в 60 % проб отобранных у западного берега определялась криптофитовая водоросль *Cryptomonas marssonii*, у восточного берега эта водоросль наблюдалась во всех отобранных пробах.

Во все сезоны наблюдений 2014–2017 гг. в зоопланктонных пробах, отобранных в прибрежной зоне описываемого района озера, отмечали зеленую нитчатую водоросль – обитателя обрастаний *Spirogyra* sp. нетипичную для открытого Байкала, которая в период 2001–2007 гг. не была обнаружена. У восточного берега спирогиру наблюдали на станции, расположенной возле мыса Хакусы, где в настоящее время действует бальнеологический курорт (ранее этот район был выбран фоновым).

Выводы

1. Интенсивное освоение прибрежной территории озера Байкал, отсутствие современных очистных сооружений оказывает неблагоприятное воздействие на состояние гидробионтов. Численность гетеротрофной микрофлоры остается высокой как в прибрежном районе (в 5 раз), так и открытой части озера (в 3,5 раза) в сравнении с началом наблюдений.

2. Наиболее загрязненными являются реки Верхняя Ангара, Кичера и Тья. Среднегодовые значения количественного развития гетеротрофных бактерий в воде этих рек увеличились в 2–3 раза в сравнении с начальным периодом наблюдений, что указывает на поступление в озеро все больших количеств органических веществ, т. е. идет активный процесс антропогенного эвтрофирования.

3. В сравнении с 2001–2007 гг. произошло увеличение численности и биомассы фитопланктона в прибрежном районе озера в 1,7 и 1,9 раза, а в центральной части озера в 2,3 и 4 раза соответственно.

4. Во все сезоны наблюдений 2014–2017 гг. в зоопланктонных пробах, отобранных в прибрежной зоне, отмечали зеленую нитчатую водоросль – обитателя обрастаний *Spirogyra* sp. нетипичную для открытого Байкала, которая ранее не была обнаружена.

Список литературы

1. О распределении канцерогенных углеводородов в пресноводных водоемах / А. П. Ильницкий, Ж. Л. Лембик, Л. Г. Соленова, Л. М. Шабад // Канцерогенные вещества в окружающей среде : тр. расширенного пленума комитета по канцерогенным веществам. Л. : Гидрометеиздат, 1979. С. 48–53.
2. Котова В. Е., Андреев Ю. А., Черновьянц М. С. Идентификация полициклических ароматических углеводородов в донные отложения озера Байкал // Вода: химия и экология. 2017. № 4 (106). С. 71–76.

3. Лембик Ж. Л., Есырева В. И. Водоросли как тест-объект при оценке загрязнения водоема канцерогенными углеводородами // Растения и химические канцерогены. М. : Наука, 1979. С. 49–51.

4. Динамика накопления полициклических ароматических углеводородов в донных биосензах озера Байкал по результатам биогеохимического мониторинга / С. А. Резников, О. В. Якунина, А. А. Матвеев, Н. Н. Лукьянова, И. В. Богуш, Р. А. Аджиев // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 80–90.

5. Романенко В. И., Кузнецов С. И. Экология организмов пресных водоемов. М. : Наука, 1974. 194 с.

6. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / под ред. В. А. Абакумова. М. : Гидрометеиздат, 1992. 318 с.

УДК 556.537

Картографический подход к оценке эрозионно-аккумулятивных процессов в дельте реки Селенги

А. П. Рогачёв (arogachov25@gmail.com)¹

Е. А. Ильичёва (lenail3663@mail.ru)^{1,2}

М. В. Павлов (maksimpavlov_v@mail.ru)²

¹ Иркутский государственный университет, г. Иркутск

² Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск

Аннотация. Статья посвящена использованию разновременных картографических материалов для оценки плановых русловых деформаций в дельте реки Селенги. Описан алгоритм обработки картографической информации с целью расчёта объёмов эрозии, аккумуляции в дельте и выноса материала в акваторию озера Байкал в различные периоды времени. Представлены результаты обработки.

Ключевые слова: дельта, река Селенга, русловые деформации, сток воды, наносы, картографирование, объём наносов, эрозионно-аккумулятивные процессы, морфология русел, русловая сеть.

Введение

Оценка деформации русел рек несёт инженерный (прикладной) характер и фундаментальный научный интерес. В прикладном смысле, информация о деформации русел рек используется в целях проектно-экономического обоснования в постройке инженерных сооружений близ рек или непосредственно на реках, например, мосты, дамбы, русловые укрепления и оценки природных рисков. В научных целях информацию о деформациях русел рек можно использовать для создания морфодинамических моделей развития эрозионно-аккумулятивных процессов, разработки новых методов и методик расчётов для прикладного интерпретирования или для оценки стока наносов.

Традиционные способы получения информации об объёме стока наносов рек основаны на эмпирических данных, получаемых в полевых условиях: производство промерных работ с целью получения морфометрических характеристик русла с последующим измерением скоростей течения воды, и дальнейший отбор проб воды для получения значений мутности потока. Описанная методика является наиболее часто используемой в гидрометрических работах и отлично подходит для задач оценки объёма наносов рек. Полевые результаты подвергаются камеральной обработке и анализируются.

На множестве рек установлены гидрологические посты наблюдений за уровнями воды. Как правило, посты расположены на прямолинейных участках рек с преимущественно с трудноразмываемыми, коренными породами дна русел. Подобное расположение водомерных постов обуславливает необходимость получения информации только об уровне воды (промерные работы и работы по измерению скоростей потока и отбор проб воды на мутность осуществляются единожды, в дальнейшем, при необходимости уточнения, повторяются). С помощью расчётных методик с применением в качестве входной информации геометрию русла и уровня воды, вычисляются расходы воды и взвешенных наносов.

Разумеется, метод описан значительно упрощённо. При использовании такого подхода на участках рек с интенсивно изменяющимися морфометрическими параметрами русла, результаты будут неточными: со временем геометрия потока изменятся и появляется необходимость в повторении полного цикла измерительных работ, что требует материальных и временных затрат, для получения статистического ряда наблюдений. Особенно неудобным данный метод является при использовании его в устьевых участках, где русловая сеть подвержена интенсивным деформациям, как горизонтальным, так и вертикальным. Авторами работы представлен подход к оценке объёмов наносов с использованием разновременного картографического материала с целью получения объёмов эрозионно-аккумулятивной деятельности флювиальной системы.

Материалы и методика обработки

Методика заключается в получении площадей размыва русел рек с разновременных топографических карт или космических снимков с учётом высот размываемых и аккумулируемых берегов. Предложенный метод будет рассмотрен на примере трёх оцифрованных топографических карт дельты реки Селенги, которые были выпущены в 1956, 1986 и 1998 гг. По полученным контурам проток дельты были рассчи-

таны площади русловой сети. Сами по себе, эти площади несут в себе информацию о площадях размыва, а при сопоставлении с последующими величинами площади русловой сети более поздней топографической съёмки, об объёмах и скорости размыва внутри временного диапазона. Цель исследования – получить объём накопленного или эродированного материала. Вычислить объём можно путём умножения площадей размыва на высоту соответствующих берегов русла протоки. Знание временных рамок, позволяет рассчитать объём эрозии/аккумуляции за единицу времени ($\text{км}^3/\text{год}$). В рамках данной работы не стояла задача рассчитать сток наносов в традиционных единицах измерения ($\text{кг}/\text{с}$), для чего необходимо привлечение данных геолого-геоморфологических данных о строении аллювиальных толщ.

Недостатком методики является отсутствие периодически издаваемых топокарт через равный интервал времени. Как известно, для территории нашей страны, топографические карты не издаются каждый год. Подобный материал отсутствует, вследствие чего нет возможности проанализировать межгодовые изменения в протоках дельты, что было бы наиболее верным решением, так как внутри рассматриваемых временных интервалов (30 и 12 лет соответственно), несомненно, имеют место разнознаковые флуктуации искомым величин (объём материала). Поэтому, данный подход может дать лишь линейное изменение объёма эрозии/аккумуляции в крайних точках рассматриваемого периода: нельзя говорить об изменениях внутри интервала, только предполагать, что изменения линейны.

Использование разновременных аэро- и космоснимков, находящихся внутри рассматриваемых временных интервалов, может дать больше информации, чем топографические карты. Различные космические снимки можно использовать, только при наличии достоверных данных о стоке воды на дату съёмки. Рассматривать имеет смысл только те снимки, на которых обеспеченность стока воды равна обеспеченности стока на топографических картах (гидрография на топокартах отображается в фазу летней межени). Информация о стоке воды на даты имеющихся аэро- и космоснимков отсутствует или же отсутствуют сами космоснимки, соответствующие датам известных расходов воды.

Предлагаемый подход

На первом этапе работы производится оцифровка гидросети разновременных топографических карт. Далее необходимо обособить каждую протоку в полигональный объект и рассчитать площадь русла. Оцифровка и расчёт производились с помощью программы QGIS.

QGIS является программным комплексом для анализа и векторизации карт и картографических материалов, а также обработки цифровых моделей местности (DEM).

Расчёт выполняется в атрибутивной таблице, поля которой заполняются при оцифровывании карт, с помощью модуля «калькулятор полей атрибутов».

Путём «наложения» разновременных слоёв русел друг на друга рассчитывается площадь эрозии и аккумуляции (рис. 1).

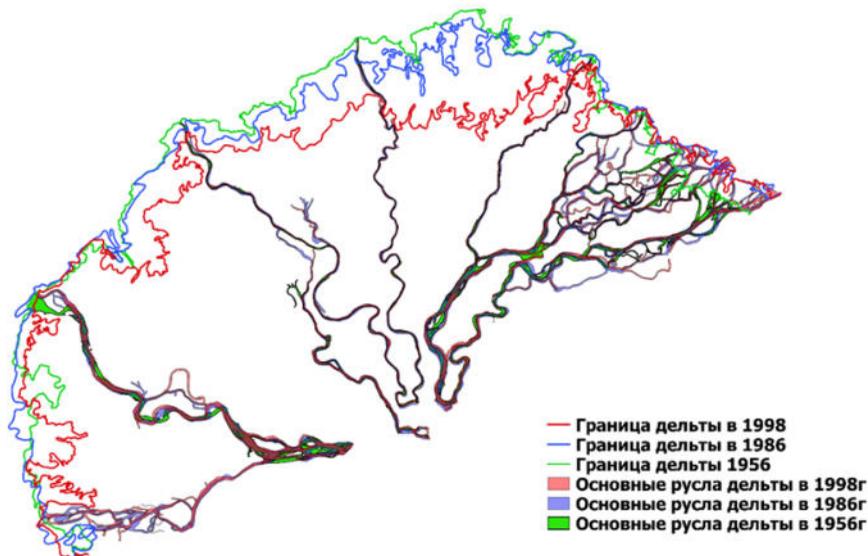


Рис. 1. Совмещённая модель русловой сети дельты р. Селенги

Области пересечения покажут устойчивые участки русел, области расхождений покажут участки эрозии или аккумуляции: например, если русло в 1956 г. отсутствует на том же месте в 1986 г., то, очевидно, на рассматриваемом участке превалировали эрозионные процессы; если русло в 1986 г. в том месте, где оно было в 1956 г., то аккумулятивные процессы имели большее значение, чем эрозионные. Данный процесс будет представлен на примере протоки Дологан в период с 1986 по 1998 г. (рис. 2–3).

Слой «участки с преобладанием эрозии» показывает, что внутри данного временного интервала в границах рассматриваемого слоя произошёл размыв русла и образовались новые пути течения реки. Слой «участки с преобладанием аккумуляции» показывает, что в гра-

ницах этого слоя наоборот, преобладали аккумулятивные процессы и русла перестали существовать. Слой «наиболее устойчивые участки русла» показывает наиболее стабильные участки русла реки, где процессы эрозии и аккумуляции либо не проявляются, либо взаимно компенсируют друг друга.

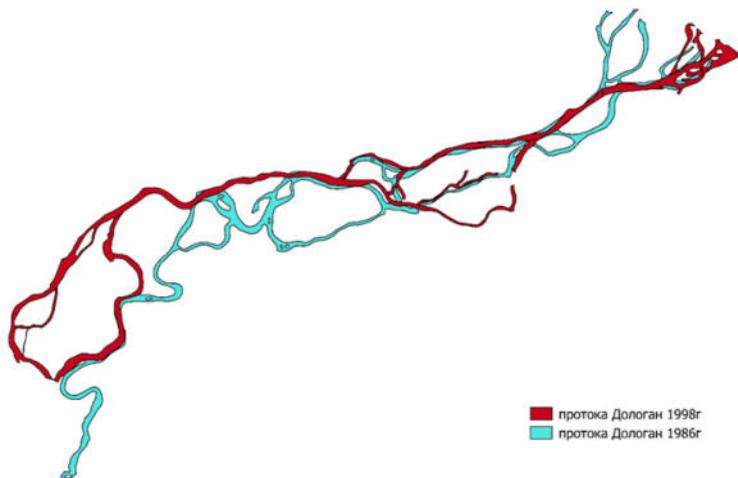


Рис. 2. Схема протоки Дологан в 1998 и 1986 гг.

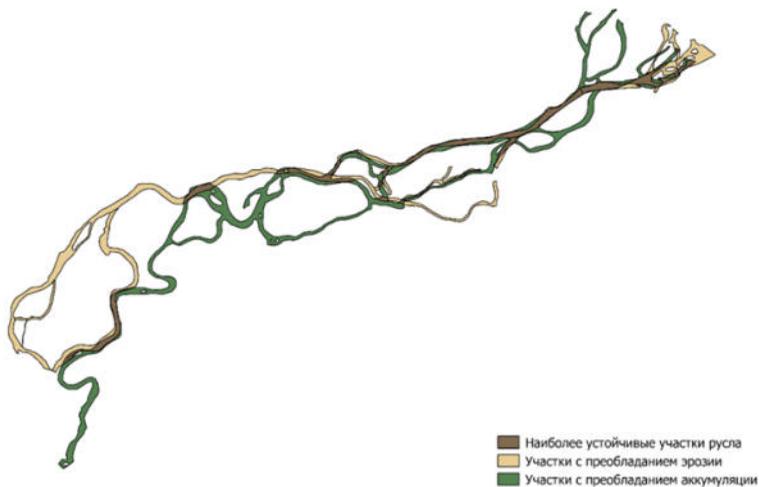


Рис. 3. Интегральная модель развития протоки Дологан в 1998 и 1986 гг.

Последним этапом является вычисление объёмов материала, участвующих в эрозионно-аккумулятивных процессах. Для решения этой задачи, необходимо полученные площади соотнести с высотой берегов в конкретных участках проток. Высота берегов была получена с топографических карт, уровень воды в конкретной точке русла вычислялся переносом известной отметки уровня воды вниз или вверх по течению, исходя из уклона водной поверхности. Данная методика основана на том допущении, что высота берегов проток за исследуемый период времени практически не изменялась и остаётся постоянной. Так же имеет смысл использовать материалы современной ортофотосъёмки и данными нивелировки, с помощью которых можно получить высоту берегов на конкретном участке русла реки.

Результаты и обсуждение

Предложенной методикой получены следующие результаты за рассматриваемые периоды: площади наиболее устойчивых к размыву участков проток дельты, с преобладанием процессов эрозии и/или аккумуляции; объёмы эродируемого и накопленного материалов и дана интегральная оценка эрозионно-аккумулятивных процессов.

Очевидно, что между интервалами с 1986–1998 и 1956–1986 гг. значительные различия между значениями накопленных/эродированных объёмов, но и в знаковом соотношении: за тридцатилетний период, в большинстве проток, наблюдается незначительное преобладание эрозионных процессов над аккумулятивными. За двенадцатилетний период наоборот: значительное преобладание аккумулятивных процессов над эрозионными. Это может быть связано как с временными рамками, так и с аномально маловодным периодом в конце 80-х гг. прошлого века, послужившим причиной высоких темпов аккумуляции. Относительно короткий рассматриваемый временной интервал, 12 лет, может быть недостаточным и при наличии большего количества информации, соотносимой с тридцатилетним периодом, значения объёмов руслового материала будут сравнимы друг с другом.

Заключение

Использование предлагаемого подхода позволило оценить значение объёма материалов, участвующих в эрозионно-аккумулятивных процессах в дельте Селенги внутри двух рассматриваемых временных интервалов с 1956–1986 и с 1986–1998 гг. Результаты обработки первого тридцатилетнего периода показывают, преобладание процессов эрозии над аккумуляцией ($344 \text{ км}^3/\text{год}$ были вынесены из дельты в

озеро Байкал). Объем продуктов эрозии в среднем составлял $918 \text{ км}^3/\text{год}$, аккумуляции – $633 \text{ км}^3/\text{год}$.

Второй, двенадцатилетней период, характеризуется высокими темпами аккумуляции. Внутри данного временного интервала объем аккумуляции значительно превышает объем эрозии. В пределах суб-аэральной дельты перемещалось в среднем $3115 \text{ км}^3/\text{год}$, аккумуляция составила $1458 \text{ км}^3/\text{год}$, размыв составил $1657 \text{ км}^3/\text{год}$.

Исследования проводятся при финансовой поддержке гранта РФФИ 17-29-05052 офи_м «Экзоморфолитогенез устьев Байкальских притоков на современном этапе гидроклиматического цикла: моделирование и прогноз».

УДК 556.16; 556.512; 551.583

Статистические неоднородности в водном балансе крупных рек Архангельской области

И. В. Соломонова (_iren@mail.ru)

А. В. Фролов (anatolyfrolov@yandex.ru)

Институт водных проблем РАН, г. Москва

Аннотация. Рассмотрен водный баланс крупных рек Архангельской области – Северной Двины, Пинеги, Мезени. Показано, что возможны ситуации, когда при практически неизменном математическом ожидании процесса многолетнего стока рек имеют место значимые изменения дисперсий и коэффициентов автокорреляции.

Ключевые слова: многолетний сток, Северная Двина, Мезень, Пинега, статистическая неоднородность, осадки, испарение, температура воздуха.

Введение

Наблюдаемые изменения климата, происходящие как в глобальном, так и в региональном масштабе, ставят перед гидрологами задачу, выявления закономерностей изменений водного режима рек в новых меняющихся климатических условиях. Очевидно, что эти изменения скажутся (тем или иным образом) на всех компонентах водного баланса рек. Поэтому, для получения более полной картины возможных изменений характера многолетних колебаний речного стока необходимо проведение комплексного анализа, помимо собственно стока, основных стокоформирующих факторов (осадков, испарения, температуры воздуха). Часто при исследованиях ограничиваются по-

пытками выявления неоднородности математических ожиданий для различных временных интервалов наблюдений за стоком или выявления трендов в стоковых рядах (см., например, [13–15] и др.), но изменения режима стока могут проявляться и более сложным образом.

Ряд исследователей отметит несколько типов изменений в режиме многолетнего стока и/или стокообразующих факторов: среднее процесса меняется, дисперсия же не меняется; меняется и среднее и дисперсия и более редкий случай – когда меняется дисперсия при неизменном среднем (см., например, [0–3; 7; 9; 12; 13; 16]).

Ситуация, когда не происходит изменение средних значений стока рек, но происходит изменение дисперсии (размаха колебаний) может оказывать негативное влияние на качество жизни человека, например, создавая проблемы, связанные с наводнениями, или, наоборот, с дефицитом воды.

Поэтому, для более полного понимания процессов, происходящих на водосборе, мы предлагаем использовать в качестве дополнительного параметра при исследовании, например, стока рек, не только математическое ожидание (среднее), но и дисперсию, а также коэффициент автокорреляции. Представляется, что данный подход выявления неоднородностей не только по первым (математическое ожидание), но и по вторым (дисперсия, коэффициент автокорреляции) моментам, дает возможность получить более подробное представление о реакции многолетних колебаний речного стока на климатические изменения в речном бассейне.

Материалы и методы

Нами были проанализированы многолетние ряды годовых величин речного стока Северной Двины (Усть-Пинега, 1891–2008 гг.), Пинеги (Кулогора, 1915–1999 гг.) и Мезени (Малонисогорская, 1921–1999 гг.) (рис. 1), а также ряды годовых слоев осадков, испарения и среднегодовой температуры воздуха в бассейнах этих рек. Характеристики многолетних изменений годовых осадков и среднегодовой температуры воздуха, усредненные по бассейну р. Сев. Двина, были приняты как оценки для соответствующих процессов в бассейне р. Пинеги.

Неоднородности соответствующих рядов наблюдений могут проявляться вследствие реакции стока на изменения климата на водосборе. Для выявления таких зависимостей требуются достаточно длительные интервалы времени, необходимые для получения относительно надежных оценок статистических характеристик исследуемых процессов. Всемирная метеорологическая организация в качестве пе-

риодов, характеризующихся относительной стационарностью климатических условий, рекомендует использовать не менее чем 30-летние интервалы. Для большей надежности оценок моментов распределения стока, ряды наблюдений были разделены на две примерно равные части, с продолжительностью наблюдения в каждом интервале не менее 40 лет. Для этих интервалов получены средние значения, дисперсии и коэффициенты автокорреляции.



Рис. 1. Схема расположения постов наблюдений (красный круг) на реках Сев. Двина, Пинега, Мезень

Сток рек С. Двины, Пинеги и Мезени не зарегулирован, изъятия из стока незначительны, поэтому режим стока этих рек можно считать практически не искаженным прямым техногенным воздействием.

Для нахождения оценок статистических характеристик испарения с бассейна был применен метод, основанный на использовании динамико-стохастической модели стока [10; 11]. В рамках этой модели, речной сток рассматривается как выходной процесс гидрологической системы. Входными процессами являются годовые осадки и испарение, усредненные по территории речного бассейна.

Результаты

В многолетних колебаниях стока р. Северная Двина и осадков в ее бассейне были обнаружены два относительно длительных интервала времени (1891–1949 и 1950–2008 гг.), характеризующиеся существенным различием по вторым моментам – дисперсии и автокорреляции. Особенностью выявленной неоднородности оказалось практическая неизменность средних величин стока и осадков для интервалов 1891–1949 и 1950–2008 гг. (табл. 1).

Таблица 1
Статистические характеристики процессов на водосборе р. Северная Двина

Характеристика Процесс	Среднее		Дисперсия		Коэффициент автокорреляции	
	Интервал		Интервал		Интервал	
	I	II	I	II	I	II
Осадки, мм/год	550	578	3781	3103	0,32	0,00
Сток, мм/год	311	293	3802	2500	0,41	0,03
Испарение ^{*)} , мм/год	239	285	2863	1894	0,09	-0,21
Температура, °С	1,0	1,2	1,3	1,6	0,15	0,18

Обозначения: I – интервал 1891–1949 гг.; II – интервал 1950–2008 гг. ^{*)} по динамико-стохастической модели [11].

Для оценки достоверности полученных результатов в бассейне реки С. Двина были привлечены данные по ближайшим бассейнам рек – Пинеги и Мезени (рис. 1). Расстояние между пунктами наблюдения С. Двины и Пинеги около 100 км, между С. Двиной и Мезенью – около 300 км. В случае выявления похожих статистических неоднородностей на этих реках, можно будет более обосновано судить об описанном выше явлении, когда при неизменном среднем от одного интервала к другому существенно меняется дисперсия.

Анализ результатов показал, что и в стоке Пинеги есть интервалы времени (1915–1957 и 1958–1999 гг.), когда математическое ожидание остается неизменным, а дисперсия существенно меняется (табл. 2).

Таблица 2
Статистические характеристики процессов на водосборе р. Пинега

Характеристика Процесс	Среднее		Дисперсия		Коэффициент автокорреляции	
	Интервал		Интервал		Интервал	
	I	II	I	II	I	II
Осадки, мм/год	569	571	4809	2482	0,26	-0,10
Сток, мм/год	318	334	4611	2897	0,43	-0,23
Испарение ^{*)} , мм/год	251	237	3453	3712	0,18	-0,51
Температура, °С	1,4	1,4	1,0	1,2	0,24	0,08

Обозначения: I – интервал 1915–1957 гг.; II – интервал 1958–1999 гг. ^{*)} по динамико-стохастической модели [11].

В стоке реки Мезень и осадках в ее бассейне прослеживается такая же закономерность, как и на предыдущих двух реках – неизменность среднего от одного интервала к другому (1921–1959 и 1960–1999 гг.) и существенное изменение дисперсии процесса (табл. 3).

Таблица 3

Статистические характеристики процессов на водосборе р. Мезень

Характеристика Процесс	Среднее		Дисперсия		Коэффициент автокорреляции	
	Интервал		Интервал		Интервал	
	I	II	I	II	I	II
Осадки, мм/год	550	571	5838	2901	0,12	-0,18
Сток, мм/год	365	369	4749	2647	0,31	-0,17
Испарение [*] , мм/год	185	212	3660	3064	0,11	-0,44

Обозначения: I – интервал 1921–1959 гг.; II – интервал 1960–1999 гг.; ^{*}) по динамико-стохастической модели [11].

Таким образом, можно констатировать, что ряды стока и осадков в бассейнах рек С. Двина, Пинега и Мезень являются однородными по математическому ожиданию и *не однородными* по дисперсии. Обращает на себя внимание смена знака коэффициента автокорреляции (от одного интервала времени к другому) в рядах стока на реках Пинега (0,52 и -0,28) и Мезень (0,31 и -0,17), и в рядах осадков на р. Мезень (0,12 и -0,18) (табл. 2 и 3).

Применение динамико-стохастической модели многолетних колебаний стока [10; 11]. С. Двины показало соответствие изменений статистических характеристик стока и осадков. Это позволило оценить изменения соответствующих характеристик испарения с водосбора. Средние величины осадков и стока р. С. Двина для указанных интервалов отличаются незначительно, однако средние величины испарения, вычисленные как разность между осадками и стоком, заметно различаются – 239 и 285 мм/год для I и II интервалов соответственно (табл. 1). Это различие находит некоторое подтверждение и в увеличении от I ко II интервалу среднегодовой температуры воздуха – от 1, 0 °С до 1,2 °С, что должно было способствовать увеличению испарения. Таким образом, есть основания предположить, что, помимо влияния осадков на изменения статистических характеристик стока С. Двины повлияло и изменение режима колебаний испарения.

Сравнение средних значений испарения на реках Пинега и Мезень не показывает заметного увеличения от одного интервала к другому, такого, как это наблюдается на С. Двине. В бассейне р. Пинега (табл. 2) оно немного уменьшилось – 251 и 237 мм/год для I и II интервалов соответственно, а в бассейне р. Мезень (табл. 3) слегка уве-

личилось – 182 и 212 мм/год, приобретя на обеих реках отрицательную автокорреляцию во втором интервале. Средние значения температура воздуха в бассейне р. Пинеги остаются без изменений в обоих интервалах.

Обращает на себя внимание, что дисперсии стока и осадков во всех трех бассейнах уменьшается от I-го интервала ко II-му (примерно 1950-е – 1960-е гг.). Т. е. их колебания носят более упорядоченный характер. Такие же изменения мы видим и в дисперсии испарения в бассейнах рек С. Двина и Мезень. В бассейне Пинеги дисперсия испарения, наоборот, увеличивается во втором интервале времени.

Проведенные нами ранее [8] исследования многолетнего стока на 64 створах рек мира (Европы, России, Северной Америки и Австралии) показали, что почти в половине рассмотренных случаев (29 случаев из 64) обнаружены относительно длительные интервалы времени (в основном 50 и более лет), характеризующиеся существенным различием дисперсий многолетнего стока (на 30–60 %). При этом математические ожидания (средние значения) стока практически не менялись. Во всех этих случаях дисперсия стока рек Северной Америки, Австралии и Европы увеличивалась во втором интервале времени (за исключением четырех рек), в то время как дисперсия стока проанализированных нами рек России вела себя противоположным образом, т. е. уменьшалась.

Изменение дисперсии от одного интервала к другому и смена знака коэффициента автокорреляции, говорит о том, что в режиме процесса происходят серьезные изменения (перестройка), возможно, климатического характера. Действительно, по рядам стока и осадков в бассейне рек (см., например, рис. 2) видно, что примерно в 50–60-е гг. прошлого столетия произошел «перелом», изменился «вид» графиков. Колебания стали больше тяготеть к среднему, без резких сильных изменений, каковые наблюдались ранее.

Изменения стока рек, атмосферных осадков, температуры воздуха, многими авторами также связываются с климатическими изменениями: перестройкой атмосферной циркуляции; с изменениями в основных океанских течениях, например, Эль-Ниньо; общим количеством облачности (см., например, [1; 6; 7; 13; 13] и др.). Эти глобальные климатические изменения в XX в. начали проявлять с конца 1960-х – начала 1970-х гг. В докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [6] такие изменения отмечены даже раньше, с 1950-х гг. По данным [4] происходят изменения характера общей циркуляции атмосферы, изменяются и границы цир-

куляционных эпох в секторах полушарий: 1899–1915 гг. эпоха блокирующих процессов, 1916–1956 гг. зональная эпоха, 1957 г. настоящее время – эпоха выходов циклонов из низких широт в высокие.

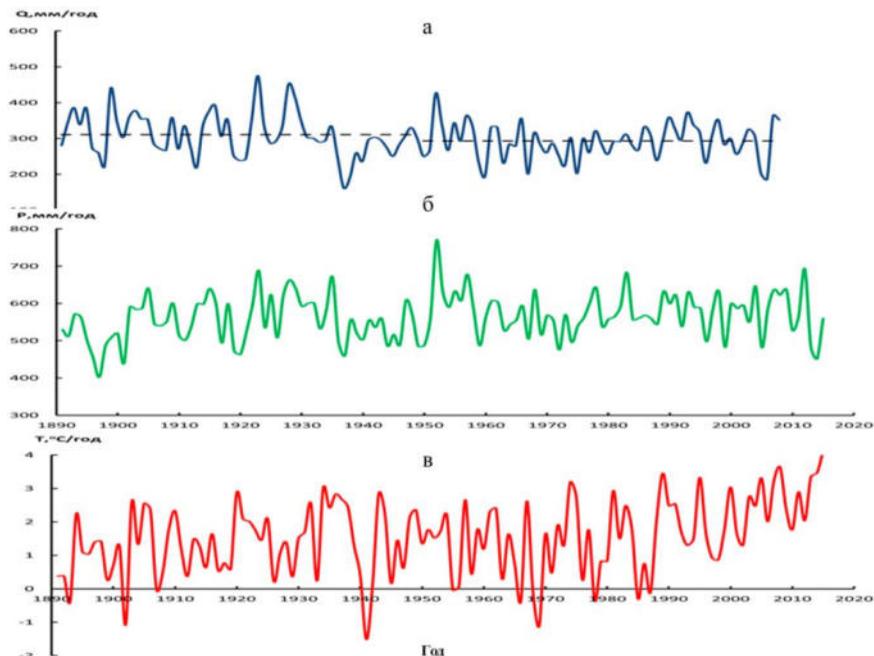


Рис. 2. Изменение стока (а) р. Северная Двина (пост Усть-Пинега) за 1891–2008 гг., осадков (б) и температуры воздуха в её бассейне за 1891–2015 гг.

В наших исследованиях, в большинстве случаев, переломными годами между двумя интервалами как раз и оказывались 40–50-е гг. В [9] нами показано, что изменение режима стока и осадков р. С. Двина могло произойти из-за смещения центров действия атмосферы по широте и долготе. На сток С. Двины с 1960-х гг. стало оказывать влияние Североатлантическое колебание (NAO) и Арктическое колебание. На осадки в бассейне (с 1970-х гг.) – NAO.

Выявленные изменения режима многолетних колебаний стока и осадков в бассейнах рек С. Двина, Пинега и Мезень, именно, нестационарность по вторым моментам – дисперсии и коэффициенту автокорреляции (в некоторых случаях), вероятнее всего связаны с перестройкой общей циркуляции атмосферы. Для более точного ответа на эти вопросы требуется проведение дальнейших исследований.

Выводы

В рядах стока рек С. Двина, Пинега и Мезень и осадков в их бассейнах обнаружены два относительно длительных интервала времени (1891–1949 и 1950–2008 гг.; 1915–1957 и 1958–1999 гг.; 1921–1959 и 1960–1999 гг. соответственно), характеризующиеся существенным различием по вторым моментам – дисперсии и автокорреляции. Особенностью выявленной неоднородности оказалась практическая неизменность средних величин стока и осадков для данных интервалов. Таким образом, эти ряды являются однородными по математическому ожиданию и *не однородными* по дисперсии и коэффициенту автокорреляции. Изменения вторых моментов распределения стока, испарения и осадков в этих бассейнах могут быть следствием климатического воздействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы ФНИ гос. академий наук, тема № 0147-2018-0001 (№ гос. регистрации АААА-А18-118022090056-0).

Список литературы

1. Георгиевский В. Ю., Шалыгин А. Л. Глава 2. Гидрологический режим и водные ресурсы. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. 34 с.
2. Долгопериодные изменения режима температуры и осадков в Санкт-Петербурге по эмпирическим данным и модельные оценки региональных изменений в прошлом и будущем / Г. С. Голыцын, Л. К. Ефимова, И. И. Мохов, В. А. Тихонов, В. Ч. Хон // Метеорология и гидрология. 2004. № 8. 13 с.
3. Добровольский С. Г. Климатические изменения в системе «гидросфера-атмосфера». М.: ГЕОС, 2002. 231 с.
4. Добровольский С. Г., Соломонова И. В. О вековых изменениях параметров стационарности колебаний речного стока // Учен. зап. РГГМУ. СПб.: РГГМУ, 2018. № 53. 21 с.
5. Кононова Н. К. Типы глобальной циркуляции атмосферы: результаты мониторинга и ретроспективной оценки за 1899–2017 гг. // Фундаментальная и прикладная климатология. М.: ИГКЭ, 2018. № 3. 16 с.
6. МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата [основная группа авторов Р. К. Пачаури, Л. А. Мейер (ред.)]. МГЭИК, Женева, Швейцария, 2014. 163 с.
7. Симонов Ю. А., Христофоров А. В. Анализ многолетних колебаний стока рек бассейна Северного ледовитого океана // Вод. ресурсы. 2005. Т. 32, № 6. 8 с.
8. Соломонова И. В. Статистические неоднородности в рядах годового стока рек // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития : тр. II Всерос. конф. [Электронный ресурс]. СПб.: Химиздат, 2018 4 с.
9. Соломонова И. В., Фролов А. В. Неоднородности в многолетних колебаниях речного стока и основных гидроклиматических процессов в бассейне Северной Двины в условиях изменения климата // Третьи виноградовские чтения. Грани гидрологии Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова / под ред. О. М. Макарьевой [Электронный ресурс]. СПб.: Наукоемкие технологии, 2018. 5 с.
10. Фролов А. В. Дискретная динамико-стохастическая модель многолетних колебаний речного стока // Вод. ресурсы. М., 2011. Т. 38, № 5. 10 с.

11. Фролов А. В. Оценка статистических характеристик многолетних колебаний испарения с крупных речных водосборов // Докл. Акад. наук. М. : Наука, 2014. Т. 458, № 3. 4 с.
12. Фролов А. В., Соломонова И. В. Климатическая неоднородность в многолетних колебаниях водного баланса водосбора р. Северной Двины // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения : сб. науч. тр. : посвящается Году экологии в России и 50-летию Института водных проблем РАН / Ин-т водных проблем Рос. акад. наук, Рос. информ.-аналит. и науч.-исслед. водохозяйственный центр. Новочеркасск : Лик, 2017. 7 с.
13. Многолетние колебания стока рек в бассейне Селенги / Н. Л. Фролова, П. А. Белякова, В. Ю. Григорьев, А. А. Сазонов, Л. В. Зотов // Вод. ресурсы. 2017. Т. 44, № 3. 13 с.
14. Burn D. H., Elmur M. A. H. Detection of hydrologic trends and variability // Journal of Hydrology – Elsevier. 2002. Vol. 255. 16 p.
15. The influence of decadal-scale variability on trends in long European streamflow records / J. Hannaford, G. Buys, K. Stahl, L. M. Tallaksen // Hydrology and Earth System Sciences. Copernicus GmbH. 2013. Vol. 17. 17 p.
16. Sayemuzzaman M., Manoj M. K. Seasonal and annual precipitation time series trend analysis in North Carolina, United States / Atmospheric Research. Elsevier. 2014. Vol. 137. 12 p.
17. Solomonova I. V., Yushkov V. P., Dobrovolski S. G. On the Effect of Intermittent Nonstationarity of Long-Term Changes in the River Runoff / Water Resources. Pleiades Publishing, Ltd., 2018. Vol. 45, Suppl. 2. 11 p.

УДК 556.555.5+528.88

Влияние циркуляционных факторов на ледовый режим водоёмов бассейна р. Селенги

Е. Н. Сутырина (ensut78@gmail.com)

А. Н. Вяткин (aptemzm1997@gmail.com)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. В работе с применением данных дистанционного спутникового зондирования определены даты наступления ледостава и полного очищения ото льда для ряда озер в бассейне р. Селенги за период с 2000 по 2018 г. Проанализированы параметры многолетней изменчивости сроков становления ледяного покрова и полного очищения от него водоёмов. Изучено влияние различных циркуляционных факторов на формирование и разрушение ледяного покрова изучаемых водных объектов.

Ключевые слова: ледовый режим, водосбор Селенги, данные MODIS, атмосферная циркуляция.

Введение

Ледовый режим является важным параметром состояния экосистем водоёмов, а также служит индикатором изменения климата, что делает актуальным изучение многолетней изменчивости его характеристик. Целью настоящего исследования является изучение ледового режима озер в пределах бассейна р. Селенги и влияния на него атмосферной циркуляции. Селенга является самым крупным притоком оз. Байкал и имеет трансграничный водосборный бассейн с площадью

447 060 км². Существенные размеры бассейна Селенги обуславливает воздействие различных циркуляционных факторов на ледовый режим озер, расположенных в пределах его территории. Объектами исследования являются озера Хубсугул, Гусиное, Иргень, Большой Ундугун, Шакшинское, Арахлей, Иван и Тасей (рис. 1). Площадь исследуемых водоёмов варьирует от 12 км² (Большой Ундугун) до 2620 км² (Хубсугул). Оз. Гусиное расположено на высоте 550 м над у. м., оз. Хубсугул – на высоте 1646 м над у. м., группа Ивано-Арахлейских озёр располагается на высотах от 945 до 965 м над у. м.

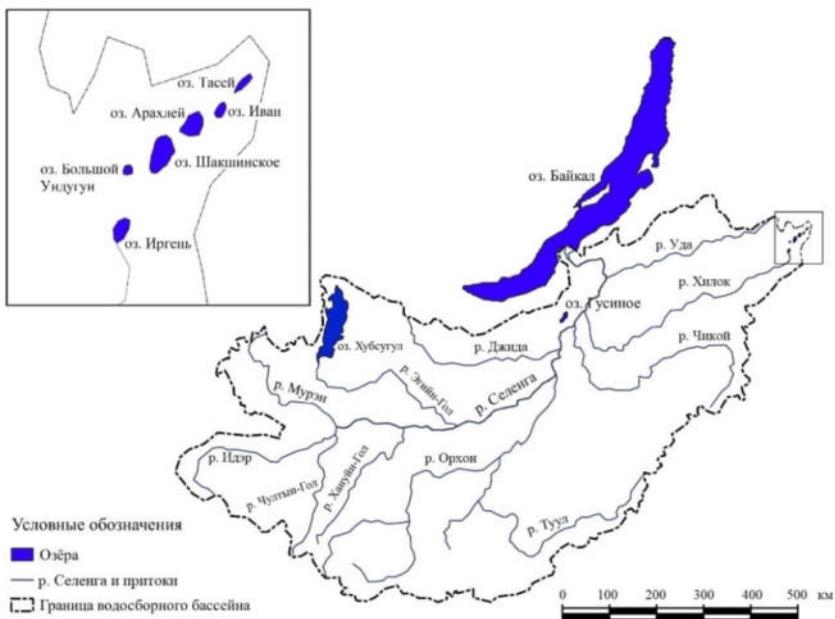


Рис. 1. Схема водосборного бассейна р. Селенги

Использованные материалы и методы

Для установления сроков наступления ледостава и полного очищения ото льда изучаемых водных объектов в бассейне р. Селенги за период с 2000 по 2018 г. были использованы RGB-синтезированные изображения 2,1,1 каналов (с пространственным разрешением 0,25 км) спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), который является одним из ключевых инструментов на борту американских спутников Terra и Aqua, который ведет

съемку в 36 спектральных каналах в видимом, ближнем, среднем и тепловом инфракрасном диапазонах с полосой обзора в 2330 км. Благодаря непрерывному режиму работы и любая территория в пределах зоны видимости станции ежедневно снимается, как минимум, один раз. Это позволяет использовать данные MODIS для решения задач по регулярному мониторингу ледовых явлений и изучению ледового режима водоемов в пределах такой значительной территории, как водосбор р. Селенги.

В работе анализировалось влияние следующих циркуляционных факторов на параметры ледового режима:

1. Арктической осцилляции, которая является одним из основных факторов, определяющих характер погоды северного полушария в течение зимнего периода;

2. Азиатского антициклона, который представляет собой мощный сезонный центр действия атмосферы, находящийся над Центральной Азией и Сибирью в течение почти всего зимнего периода;

3. Южной осцилляции, которая также является фактором циркуляции атмосферы, влияющим на умеренные широты [1].

В качестве показателя Арктической осцилляции в работе использованы значения индекса АО (Arctic Oscillation) по данным NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Интенсивность Азиатского антициклона лучше всего определяется с использованием значений атмосферного давления на уровне моря [4], осреднённые в области $40\text{--}60^\circ$ с. ш. и $70\text{--}120^\circ$ в. д., взятые из базы данных реанализа NCEP/NCAR (the National Centers for Environmental Prediction and the National Center for Atmospheric Research). За индикатор интенсивности Южной осцилляции принят индекс OLR (Outgoing Longwave Radiation) по данным NOAA.

Для оценки изменчивости параметров ледового режима исследуемых водоёмов и установления тесноты связи сроков ледостава и полного очищения ото льда озёр с телеконнекционными индексами использовались методы статистического анализа.

Результаты

По данным MODIS были определены сроки ледостава и полного очищения ото льда водоёмов бассейна р. Селенги за многолетний период (рис. 1) и дана оценка межгодовой изменчивости наступления указанных фаз ледового режима на исследуемых озёрах (табл. 1). Из таблицы 1 видно, что из исследуемых озёр наиболее поздно ледостав устанавливается на оз. Хубсугул, в среднем 18 декабря. Почти на месяц раньше – 25 ноября в среднем устанавливается ледостав на

оз. Гусиное и в конце октября – начале ноября – на озёрах Ивано-Арахлейской группы. В первую очередь различия в сроках ледостава может объясняться существенным различием в объемах воды в данных озерах, а также высотной зональностью и влиянием теплового загрязнения от Гусиноозерской ГРЭС.

Наиболее раннее очищение ото льда происходит на оз. Гусином – в среднем 13 мая, на озёра Ивано-Арахлейской группы – в среднем с 3 по 7 июня, и позднее всех очищается ото льда оз. Хубсугул – в среднем 14 июня. Причины различия в сроках очищения также различие в высоте расположения водоёмов и существенные различия в объёмах озёр и связанной с этим тепловой инерцией.

Из таблицы 1 видно, что размах дат наступления ледостава составляет от 18 (оз. Гусиное) до 32 суток (оз. Иргень), размах сроков полного очищения ото льда данных водоёмов варьирует от 20 (оз. Гусиное) до 29 дней (оз. Шакшинское). Установленная межгодовая изменчивость в сроках указанных фаз ледового режима объясняется колебанием климата и совокупным действием различных факторов атмосферной циркуляции.

Межгодовые колебания сроков очищения ото льда на большинстве изучаемых водоёмов имеют между собой тесную или очень тесную связь, что показывает влияние схожих атмосферных процессов на очищение водоёмов ото льда. Исключение составляет оз. Хубсугул, у которого связь межгодовых колебаний сроков очищения с другими водоёмами не прослеживается. Это может быть вызвано, как существенным отличием в размере данного озера от прочих изучаемых озёр, так и в преобладании влияния других циркуляционных факторов на ледовые явления на оз. Хубсугул.

Межгодовые колебания дат наступления ледостава менее связаны между собой: связь сроков начала ледостава на озёра Ивано-Арахлейской группы тесная или заметная. Наиболее в данной группе озёр выделяется оз. Арахлей, так как отличается от прочих озёр группы большими глубинами и объёмом массы воды. Связь наступления ледостава на оз. Гусиное и оз. Хубсугул не выявляется, также практически не прослеживается связь сроков установления на них ледостава со сроками наступления этой фазы ледового режима на озёрах Ивано-Арахлейской группы (только умеренная связь сроков на оз. Гусиное и оз. Арахлей). Данное обстоятельство может свидетельствовать о меньшей зависимости данного явления от крупномасштабных атмосферных циркуляций. Также это может говорить о том, что озера с разной массой воды замерзают в разные сроки и подпадают под действие разных атмосферных процессов.

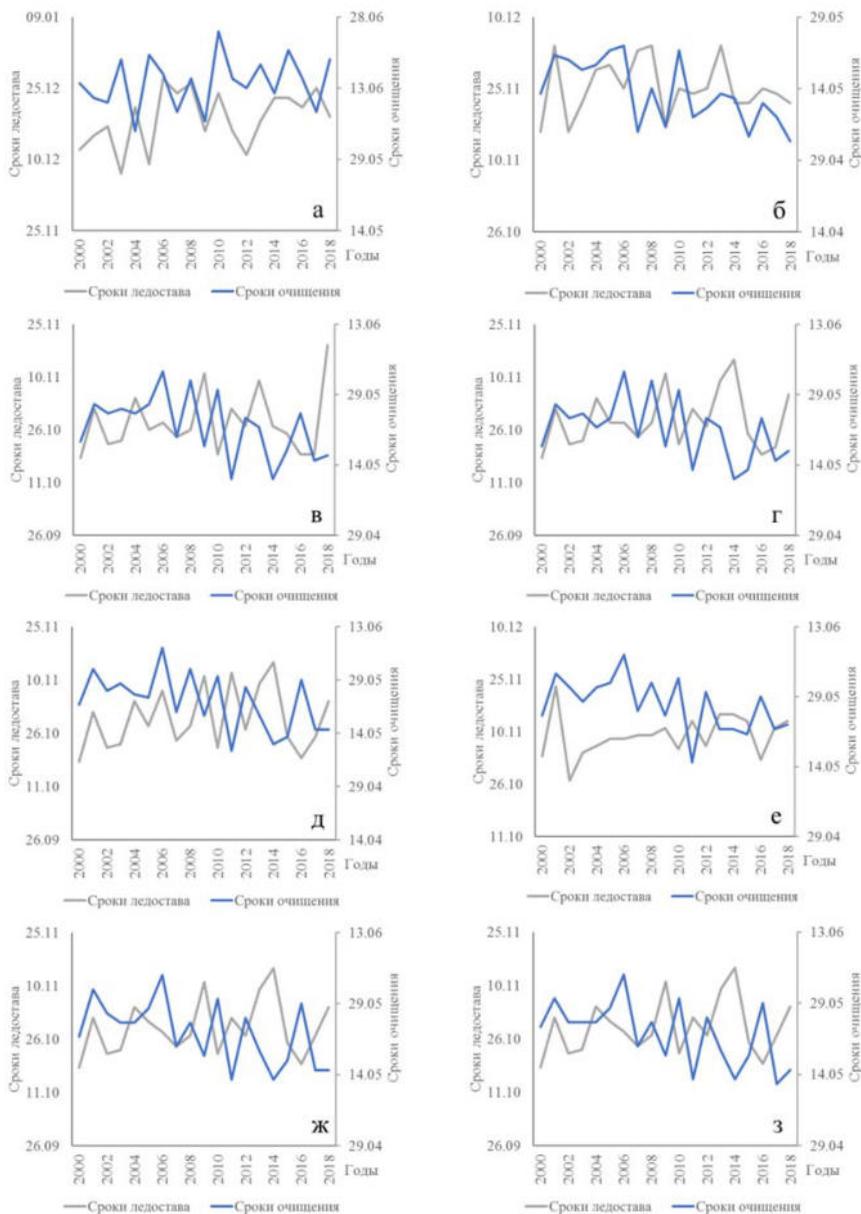


Рис. 1. Сроки наступления ледостава и полного очищения ото льда по данным MODIS: а – Хубеугул; б – Гусиное; в – Иргень; г – Большой Ундугун; д – Шакшинское; е – Арахлей; ж – Иван; з – Тасей

Таблица 1

 Изменчивость сроков наступления ледостава и полного очищения ото льда
исследуемых водоёмов

Фаза ледового режима	Характеристика	Озёра							
		Хуб-сугул	Гусиное	Иргень	Большой Ундугун	Шакшинское	Арахлей	Иван	Тасей
Наступление ледостава	Наиболее ранние	07.12	16.11	18.10	18.10	18.10	27.10	18.10	18.10
	Наиболее поздние	27.12	04.12	19.11	15.11	15.11	23.11	15.11	15.11
	Среднее	18.12	25.11	28.10	28.10	30.10	08.11	29.10	29.10
	Размах, сутки	20	18	32	28	28	27	28	28
	Стандартное отклонение, сутки	6	6	9	8	9	6	8	8
Полное очищение ото льда	Наиболее ранние	04.06	03.05	11.05	11.05	09.05	15.05	13.05	12.05
	Наиболее поздние	25.06	23.05	03.06	03.06	07.06	07.06	04.06	04.06
	Среднее	14.06	13.05	22.05	21.05	22.05	27.05	22.05	22.05
	Размах, сутки	21	20	23	23	29	23	22	23
	Стандартное отклонение, сутки	6	7	7	6	8	6	7	7

Для изучения влияния на характеристики ледового режима циркуляции атмосферы были рассчитаны значения парных и множественных коэффициентов корреляции между установленными в работе сроками ледовых явлений и различными показателями, характеризующими интенсивность Арктической и Южной осцилляций и Азиатского антициклона.

В результате корреляционного было анализа было установлено, что более явное влияние анализируемые циркуляционные факторы оказывают влияние на очищение водоёма ото льда, чем на сроки его формирования. Это может быть связано с тем, что сроки ледостава часто происходят на время смены циркуляционных факторов и оценка их влияния становится более затруднительной. В целом, только для оз. Гусиное выявлена обратная заметная связь сроков ледостава с индексом Южным колебания, для остальных водоёмов связь с исследуемыми циркуляционными факторами слабая или отсутствует. При этом сроки ледостава имеют тесную (Гусиное, Арахлей), заметную (Хубсугул, Шакшинское) или умеренную связь (Иргень, Большой Ундугун, Иван, Тасей) с температурой воздуха в преддверии ледостава.

В случае разрушении ледяного покрова имеет место накопительный эффект от воздействия атмосферных циркуляций на ледовые явления в течение продолжительного периода формирования и разрушения ледяного покрова, который выражается в более тесной связи количественных характеристик атмосферных процессов со сроками очищения ото льда водоёмов. В табл. 2 приведены наибольшие значения парных и множественных коэффициентов корреляции сроков полного очищения ото льда с индексами АО, OLR, а также со значением атмосферного давления на уровне моря в зоне действия Азиатского антициклона, усреднёнными за различные периоды времени, частично или полностью включающие осеннее и предледоставное охлаждение, ледостав и период таяния и разрушения льда.

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции сроков очищения водоёмов с показателями, характеризующими интенсивность Арктической и Южной осцилляций и Азиатского антициклона

Коэффициент	Озёра							
	Хуб-сугул	Гусиное	Иргень	Большой Ундугун	Шакшинское	Арахлей	Иван	Тасей
Парная корреляция с индексом АО	-0,37	-0,66	-0,55	-0,59	-0,49	-0,46	-0,54	-0,53
Парная корреляция с давлением в зоне действия Азиатского антициклона	0,47	0,39	0,42	0,47	0,44	0,40	0,48	0,50
Парная корреляция с индексом OLR	-0,48	-0,29	-0,33	-0,23	-0,26	-0,29	-0,36	-0,36
Множественная корреляция с индексом АО и давлением в зоне действия Азиатского антициклона	0,51	0,67	0,59	0,65	0,55	0,52	0,60	0,61
Множественная корреляция с индексами АО, OLR и давлением в зоне действия Азиатского антициклона	0,66	0,67	0,62	0,65	0,58	0,55	0,66	0,67

Из табл. 2 видно, что для оз. Гусиное и озёр Ивано-Арахлейской группы наблюдается заметная или умеренная связь сроков очищения ото льда с колебаниями значений индекса АО, и из всех анализируемых в работе факторов данная циркуляция вносит наибольший вклад в процессы разрушения льда и очищения от него данных водоёмов. Полученная картина хорошо соотносится с преобладающим влиянием Арктической осцилляции на разрушение льда на ряде других водоёмов.

мов Сибири, расположенных в том же диапазоне широт [2; 3]. Связь сроков очищения оз. Гусиное и озёр Ивано-Арахлейской группы с параметром, характеризующим интенсивность Азиатского антициклона, умеренная, с Южным колебанием – наименее выраженная – умеренная или слабая.

Несколько иная ситуация наблюдается на оз. Хубсугул, расположенном в более низких широтах: сроки его очищения ото льда имеют более выраженную связь с интенсивностью Южного колебания и с межгодовыми колебаниями Азиатского антициклона, с индексом АО связь заметно слабее.

Множественной корреляции при учёте трех циркуляционных факторов составляет для исследуемых водоёмов от 0,55 до 0,67, что характеризует связь как значимую, однако, показывает, что ряд факторов остался неучтённым. В целом, коэффициент множественной корреляции оказывается заметно выше абсолютных значений коэффициента корреляции сроков очищения ото льда с температурой воздуха за предшествующей этому период, которые по модулю составляют от 0,40 до 0,54 для изучаемых озёр.

Исследования проводятся при финансовой поддержке гранта РФФИ 17-29-05045 офи_м «Анализ влияния изменений климата и параметров циркуляции атмосферы на современные тенденции изменчивости гидрологических условий озера Байкал».

Список литературы

1. Теория общей циркуляции атмосферы : учеб. пособие / Ю. П. Переведенцев [и др.] ; науч. ред. Э. П. Наумов. Казань : Казан. ун-т, 2013. 224 с.
2. Сутырина Е. Н. Межгодовая изменчивость и прогноз весенних ледовых явлений на оз. Байкал и водохранилищах Ангарского каскада // Лёд и Снег. 2017. Т. 57, № 1. С. 108–116. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-1-108-116.
3. Сутырина Е. Н. Методики долгосрочного прогнозирования сроков полного очищения ото льда водохранилищ Ангаро-Енисейского каскада // Геогр. вестн. 2017. № 1(40). С. 66–72. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-1-66-72.
4. Observed Trends and Teleconnections of the Siberian High: A Recently Declining Center of Action / F. Panagiotopoulos, M. Shahgedanova, A. Hannachi, D. B. Stephenson. American Meteorological Society. 2005. Vol. 18. P. 1411–1422.

556.556+ 528.88

Изучение антициклонической вихревой структуры у полуострова Святой Нос в оз. Байкал по ДЗ

Е. Н. Сутырина (ensut78@gmail.com),
Г. В. Обытоцкий (grigory.obytotsky@yandex.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. В статье представлены результаты изучения антициклонической вихревой структуры у полуострова Святой Нос в оз. Байкал по данным тепловой инфракрасной съемки прибором AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) за период с 1998 по 2018 г. Определены поперечные размеры, продолжительность существования, горизонтальный градиент температуры на границе данного вихревого образования в безледоставный период.

Ключевые слова: озеро Байкал, антициклоническая вихревая структура, данные AVHRR.

Введение

Вихри в водоемах оказывают существенное влияние на передачу тепла и импульса, поскольку они перемещают захваченные объемы аномально холодной или теплой воды [7]. Таким образом, вихри способны существенно изменять физические и химические условия, включая распределение температуры, плотности, минерализации и концентрации загрязняющих веществ в воде, и, как следствие, могут влиять на биологические процессы [7] в озерных экосистемах, что обуславливает актуальность их исследования. Интерес к изучению вихревых процессов в водоемах существенно вырос благодаря развитию методов дистанционного зондирования [2; 8; 11]. Так вместе с широким внедрением дистанционных методов разными исследовательскими группами параллельно и практически одновременно было обнаружено антициклоническое вихревое образование у мыса Нижнее Изголовье (полуостров Святой Нос) в оз. Байкал по спутниковым данным в видимом, тепловом инфракрасном и радио-диапазонах [4; 9; 10]. Рядом авторов высказывается гипотеза о том, что кольцевая структура на льду оз. Байкал в районе мыса Нижнее Изголовье может быть ассоциирована с данным вихревым образованием [9; 10].

В связи со сказанным выше, цель данного исследования состоит в изучении антициклонического вихревого образования у мыса Нижнее Изголовье в оз. Байкал с применением спутниковых данных тепловой инфракрасной съемки, так как температурные изображения позволяют

регистрировать вихревые структуры, определять их локализацию и размеры, измерять различные температурные характеристики вихрей и оценивать их динамику.

Использованные материалы и методы

Вихревые образования могут детектироваться по спутниковым изображениям температуры поверхности воды за счёт характерной спиралевидной структуры, кроме этого, вихри обычно состоят из водных масс, которые имеет температурные характеристики, отличные от воды вне вихря (рис. 1). Что даёт дополнительные возможности для их идентификации. Также существует прямая связь между свойствами водной массы вихря и его вращением: вихри с холодным ядром вращаются циклонически, а вихри с теплым ядром – антициклонически, что позволяет идентифицировать типы вихрей по их температурным характеристикам с помощью инфракрасных изображений температуры поверхности [12].

В рамках данного исследования для изучения локализации и динамики антициклонического вихревого образования в оз. Байкал у полуострова Святой Нос были использованы данные радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) за период с 1998 по 2018 г. Для составления карт распределения температуры поверхности воды оз. Байкал использовались региональные алгоритмы тематической обработки данных AVHRR, описанные в [3].

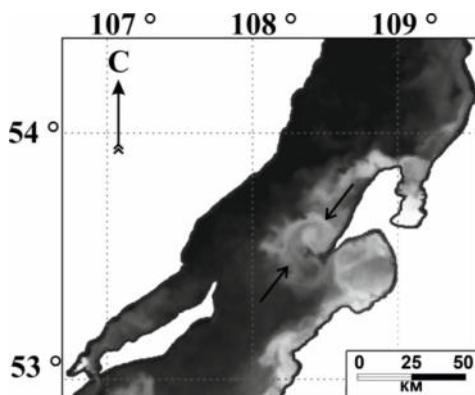


Рис. 1. Локализация антициклонического вихревого образования (показано стрелками) у мыса Нижнее Изголовье (полуостров Святой Нос) по данным AVHRR от 08.08.2010 [4]

Результаты

На спутниковых снимках вихревые образования в оз. Байкал прослеживаются с начала июля по середину или даже третью декаду ноября. Наибольшие вихревые образования, различимые на спутниковых картах распределения температуры, достигают размеров около 25–40 км в поперечнике.

Наиболее заметное в оз. Байкал антициклоническое вихревое образование наблюдается ежегодно и появляется на выходе из Баргузинского залива у полуострова Святой Нос на границе Центральной и Северной котловин (рис. 2) в конце июня-начале июля, постепенно увеличивается в размерах, достигает максимума в августе-сентябре, распадается только в ноябре при развитии в озере осенней гомотермии, а в отдельные годы регистрируется вплоть до ледостава и, вероятно, какое-то время существует подо льдом.

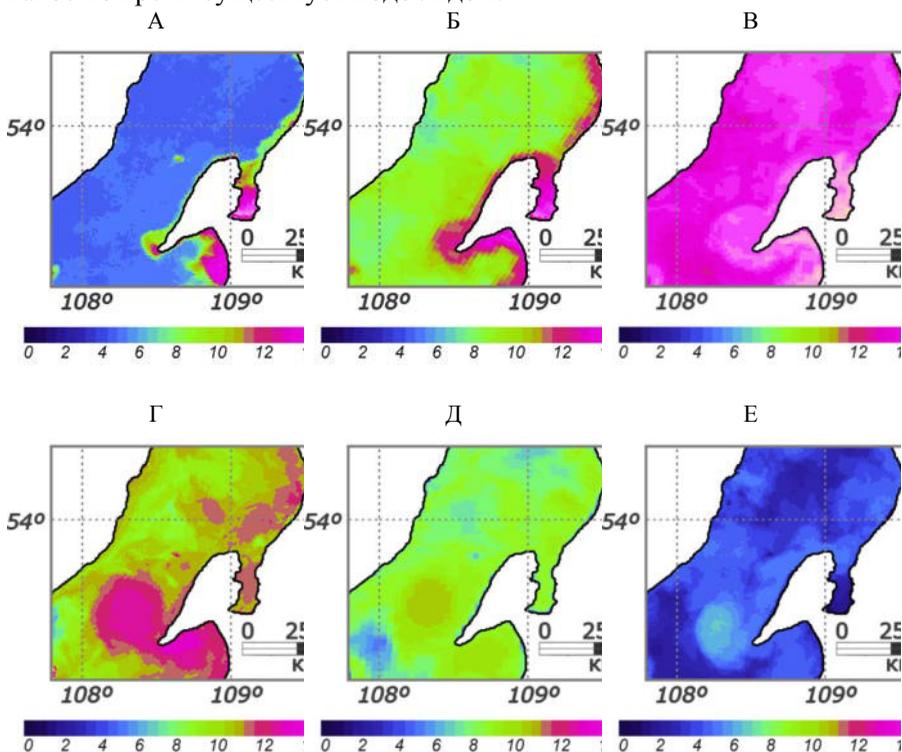


Рис. 2. Эволюция антициклонического вихревого образования у полуострова Святой Нос в 2011 г. по данным AVHRR: А – 1 июля, Б – 28 июля, В – 17 августа, Г – 19 сентября, Д – 4 октября, Е – 3 ноября

Формируется данная вихревая структура в теплоактивной области весеннего термобара у мысы Нижнее Изголовье (рис. 2, А), гидрологический фронт на границе которого затем эволюционирует во фронт на границе вихря. Горизонтальный градиент температуры на поверхности в пределах данного фронта может достигать до $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$. В целом контрасты температуры поверхности воды в пределах вихря могут достигать более $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ на начальном этапе формирования данной структуры. Для примера на рис. 3 приведена изменчивость поперечных размеров данной вихревой структуры и максимального значения градиента температуры на поверхности на границе данного вихря в безледоставный период 2010–2013 гг.

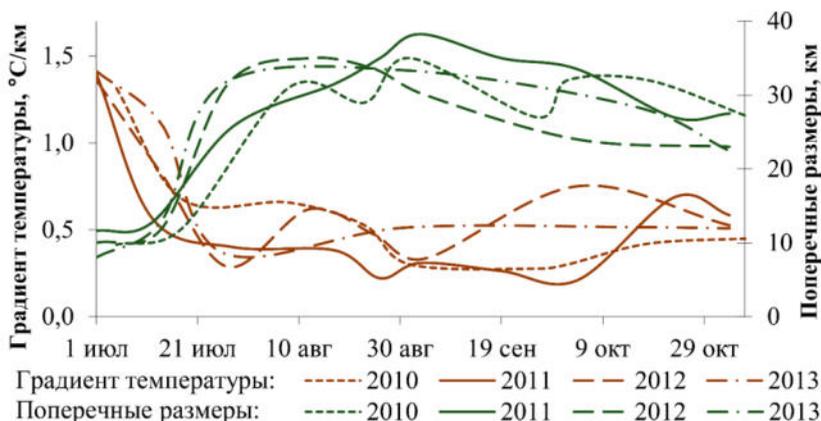


Рис. 3. Изменчивость поперечных размеров антициклонической вихревой структуры у полуострова Святой Нос и максимального значения градиента температуры поверхности на её границе [5]

Из рисунка 3 видно, что в указанные годы наблюдается схожий характер развития указанной вихревой структуры. Установлено, что имеется закономерное уменьшение величины горизонтального градиента температуры воды на поверхности по мере увеличения размеров вихревой структуры.

Согласно работам [1; 6; 10; 13] способствовать образованию вихрей может наличие:

- топографических эффектов (подводных впадин и возвышений);
- форма береговой линии,
- характер ветра,

- приток рек.

В случае данной вихревой структуры можно констатировать наличие всех четырёх факторов. Развитие данной вихревой структуры может быть ассоциировано с выходом имеющего стоково-градиентный характер Баргузинского течения из Баргузинского залива. Завихрению данного течения может способствовать обтекание мыса Нижнее Изголовье и наличие сложного подводного рельефа в месте дислокации вихря.

В работе также была предпринята попытка изучить возможность влияния вихревого образования на появление гигантских ледовых колец у полуострова Святой Нос. Для этого были сопоставлено существование данной вихревой структуры вплоть до ледостава (после этого регистрация вихря по температурным спутниковым картам становится уже невозможной) с наличием гигантских колец на льду в весенний период соответствующего года. Было установлено, что почти в 90 % случаев после регистрации вихревого образования в предледоставный период в том же районе были обнаружены ледовые кольца в период весеннего ледотаяния, что косвенно может подтверждать гипотезу, высказанную в работах [9; 10].

Кроме вихревой структуры у полуострова Святой Нос, по картам распределения температуры воды в период охлаждения озера, как правило, со второй декады, а иногда с начала сентября по первую половину ноября в Северной котловине оз. Байкал наблюдается до 4–6 вихрей антициклонического или грибовидного характера одновременно в основном у западного побережья (рис. 4). Они также выделяются в поле температуры поверхности воды озера спиралевидной структурой и существенным повышением температуры в их пределах до 2,5 °С, а иногда и более. Продолжительность их существования может достигать 2 месяца. Несколько раз за указанный период они могут ослабевать или распадаться и вновь развиваться повторно. Размеры некоторых из этих образований могут достигать в поперечнике до 30 км.

Дислокация наибольшего числа относительно крупных антициклонических вихрей в Северной котловине озера в период охлаждения водоёма может быть связана с ослаблением циклонической циркуляции в данной котловине в указанный период, а также с тем, что по сравнению с другими котловинами в Северной чаше циклоническая циркуляция имеет меньшие значения скорости и является менее устойчивой. В Центральной и Южной котловинах озера в период охлаждения водоёма также образуются антициклонические вихри в

непосредственной близости от берега, но данные структуры, как правило, имеют меньшие размеры, повторяемость и контрасты температуры с окружающими водами на поверхности данных акваторий, что делает их регистрацию по данным AVHRR более трудной задачей.

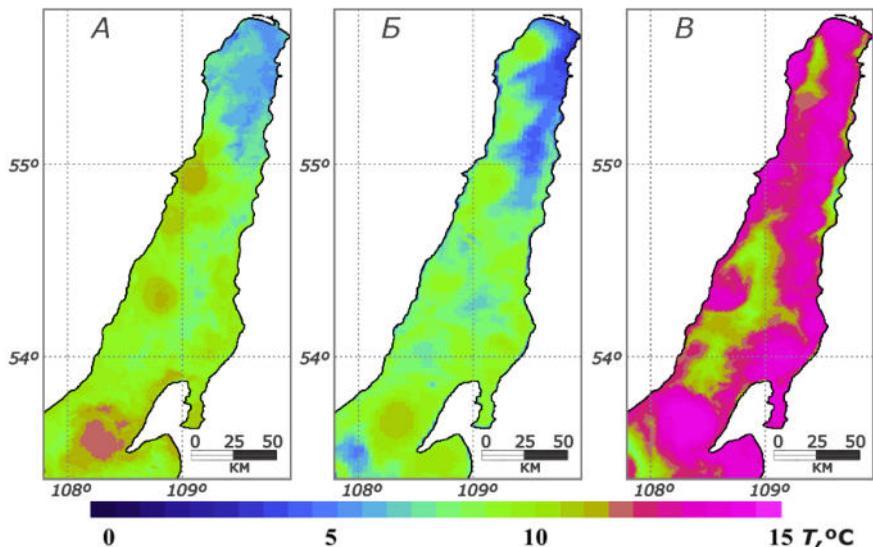


Рис. 4. Антициклонические вихревые образования в Северной котловине и на границе Центральной и Северной котловин у полуострова Святой Нос:

А – 26.09.2009, Б – 04.10.2011, В – 11.09.2017 [5]

Антициклонические вихревые образования, как в Северной котловине, так и в Центральной, напротив полуострова Святой Нос, а также антициклонические образования более мелких размеров в Центральной и Южной котловинах, как правило, формируются в непосредственной близости к берегу за крупными мысами, выступающими в озеро на несколько километров. Согласно [1; 6] генерация обозначенных вихрей может быть ассоциирована с неустойчивостью струйных вдольбереговых течений при обтекании островов, полуостровов, мысов, подводных неровностей.

Показано последовательное уменьшение размеров и повторяемости антициклонических вихрей от Северной котловины оз. Байкал к Центральной, а затем к Южной котловине, что, как представлено выше, ассоциировано с большей устойчивостью и скоростью циклонических поверхностных течений в Центральной и, особенно, в Южной

котловине. В Северной котловине, как видно из рисунка 3 в период охлаждения антициклоническая вихревая активность начинает преобладать над циклонической.

Исследования проводятся при финансовой поддержке гранта РФФИ 17-29-05045 офи_м «Анализ влияния изменений климата и параметров циркуляции атмосферы на современные тенденции изменчивости гидрологических условий озера Байкал».

Список литературы

1. *Зацепин А. Г.* Вихри в океане: наблюдение и моделирование [Электронный ресурс]. URL: http://d33.infospace.ru/d33_conf/2010_conf_pdf/school/zacepin.pdf.
2. Уникальные явления озера Байкал на космических радиолокационных изображениях и оптических снимках / А. Ю. Иванов, Н. В. Евтушенко, Н. А. Филимонова, Н. В. Терлеева // *Земля из космоса*. 2016. № 5(21). С. 61–66.
3. *Сутырина Е. Н.* Особенности температурного режима оз. Байкал по данным радиометра AVHRR // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13, № 5. С. 121–130. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-121-130.
4. *Сутырина Е. Н.* Использование данных дистанционного спутникового зондирования для картографического отображения и анализа распределения температуры поверхности воды озера Байкал // *Изв. ИГУ. Сер. Науки о Земле*. 2012. Т. 5, № 2. С. 240–251.
5. *Сутырина Е. Н.* Изучение вихревых структур в озере Байкал с применением данных дистанционного зондирования // *Междунар. науч.-исслед. журн.* 2016. № 7 (49), ч. 4. С. 157–159. DOI: 10.18454/IRJ.2016.49.109.
6. *Филатов Н. Н.* Гидродинамика озер. СПб.: Наука, 1991. 196 с.
7. Pattern of vertical velocity in the Lofoten vortex (the Norwegian Sea) / I. Bashmachnikov, T. Belonenko, P. Kuibin, D. Volkov, V. Foux // *Ocean Dynamics*. 2018. Vol. 68 (12). P. 1711–1725.
8. An Index to Distinguish Surface- and Subsurface-Intensified Vortices from Surface Observations / C. Assassi, Y. Morel, F. Vandermeirsch, A. Chaigneau, C. Pegliasco, R. Morrow, F. Colas, S. Fleury, X. Carton, P. Klein, R. Cambra // *Journal of Physical Oceanography*. 2016. Vol. 46. P. 2529–2552.
9. Atmospheric and oceanic phenomena in Lake Baikal visible from space on SAR and optical images / A. Ivanov, N. Evtushenko, N. Filimonova, N. Terleeva // *Proceedings ESA Living Planet Symposium (ESA SP-740) (9–13 May 2016, Prague, Czech Republic)*, 2016. URL: http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?2016ESASP.740E.221I&.
10. Giant ice rings on lakes Baikal and Hovsgol: Inventory, associated water structure and potential formation mechanism / A. V. Kouraev, E. A. Zakharova, F. Rémy, A. G. Kostianoy, M. N. Shimaraev, N. Hall, A. Ya. Suknev // *Limnology and Oceanography*. 2016. Vol. 61. P. 1001–1014. DOI: 10.1002/lno.10268.
11. Vortex structures in the Southeastern Baltic Sea: satellite observations and concurrent measurements / O. Yu. Lavrova, E. V. Krayushkin, K. R. Nazirova, A. Ya. Strochkov // *Proc. SPIE*, 2018/10784. 1078404
12. Application of Airborne Infrared Remote Sensing to the Study of Ocean Submesoscale Eddies / G. O. Marmorino, G. B. Smith, R. P. North, B. Baschek // *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 4 (10). P. 1–10.
13. *Zyryanov V. N.* Eddies under the ice in the Ekman boundary layer with the application to giant ice rings on Lake Baikal // *International Conference “Freshwater Ecosystems – Key Problems” (10–14 September, 2018)*. Irkutsk, 2018. P. 390–391.

УДК 556.531.4 (282.256.341.5)

Экологическое состояние р. Селенги в современный период

И. В. Томберг (kaktus@lin.irk.ru)¹

В. Н. Синюкович (sin@lin.irk.ru)¹

Л. М. Сороковикова (lara@lin.irk.ru)¹

В. Г. Ширеторова (vshiretorova@rambler.ru)²

И. А. Павлов (pavlov@binm.ru)³

¹ Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

² Байкальский институт природопользования СО РАН, г. Улан-Удэ

³ Бурятский государственный университет им. Доржи Банзарова, г. Улан-Удэ

Аннотация. В статье приведены результаты исследования водного стока и химического состава воды р. Селенги (от границы с Монголией) и ее притоков в 2018 г. Рассмотрены изменения ионного состава, концентраций растворенного кислорода и биогенных элементов по длине реки и в разные гидрологические сезоны, даны оценки качества воды в районах испытывающих антропогенную нагрузку.

Ключевые слова: водный сток, ионный состав, биогенные элементы, качество воды.

Введение

Река Селенга-основной приток оз. Байкал, обеспечивающий 50 % водного и 70 % химического стока в озеро. Со второй половины 1990-х гг. отмечается период снижения водного стока реки (в среднем на 22 %), наступление которого связано с колебаниями климата, и со снижением общей увлажненности в ее бассейне [6; 11]. Так как изменение водности является основным фактором, определяющим динамику содержания химических веществ в воде Селенги, то в этот период отмечается значительное снижения стока растворенных веществ в Байкал [5; 10]. Низкая водность реки обусловила снижение разбавляющей способности потока при поступлении бытовых и промышленных стоков городов и поселков, расположенных в ее бассейне, что привело к ухудшению качества воды [7].

В результате обильных дождей, прошедших июле-сентябре 2018 г. водность Селенги и ее притоков увеличилась до среднесезонных значений. В связи с этим, химический состав воды реки в 2018 г. отражает особенности качественного состава вод как в завершающей стадии маловодного периода, так и во время высоких летне-осенних паводков и исследование динамики концентраций приоритетных загрязнителей, биогенных элементов и кислородного режима, что весьма актуально для оценки состояния экосистемы реки.

Методы

В 2018 г. в разные гидрологические сезоны (зимняя межень, половодье, летний осенний паводок) отобраны пробы воды на гидрохимический анализ на Российском участке р. Селенги от границы с Монголией (пос. Наушки) до с. Кабанск (рис. 1). Кроме того, пробы воды взяты на устьевых участках притоков Селенги (рек Джиды, Темник, Чикой и Уда).



Рис. 1. Карта схема отбора проб

На месте отбора воды измеряли величину рН и фиксировали растворенный кислород. В пробах воды после предварительного фильтрования (мембранные фильтры $d_{\text{пор}} = 0,45$ мкм) проводили измерение ионного состава и биогенных элементов общепринятыми в гидрохимии пресных вод методами [1; 4; 12]. Анионы (хлорид, сульфат, гидрокарбонат) определяли методом ВЖХ, катионы – атомной абсорбцией (Ca^{2+} и Mg^{2+}) и пламенной эмиссией (K^+ и Na^+). Содержание био-

генных элементов измеряли на спектрофотометре: нитриты определяли с реактивом Грисса, аммонийный азот – индофенольным методом, нитраты с салициловокислым натрием, фосфаты методом Дениже-Аткинса с хлористым оловом в качестве восстановителя, определение общего фосфора проводили после высокотемпературного персульфатного окисления. Определение органических веществ проводили методами перманганатной (ПО) и бихроматной (БО) окисляемости. Ошибка использованных методов не превышает 10 %.

Расходы воды р. Селенги приведены по данным Росгидромета в створе у с. Кабанск.

Результаты

Водный сток. В 2018 г. водность р. Селенги после четырех маловодных лет подряд (2014–2017 гг.) повысилась и в среднем на 8–9 % была выше нормы. В период весеннего половодья максимальный расход воды в нижнем течении (с. Кабанск) приходился на 3 апреля и достигал 1560 м³/с. В летнее время на реке отмечались три дождевых паводка средней интенсивности. Первый из них проходил в конце июля и характеризовался повышением стока Селенги до 2390 м³/с (29 июля). Во время второго паводка, который наблюдался в третьей декаде августа, наибольший расход составил 2430 м³/с. Практически таким же был и паводок в начале сентября с максимальным расходом воды 2420 м³/с.

В феврале-марте сток реки, наоборот, был несколько ниже среднемноголетних значений в связи с низкой летне-осенней водностью 2017 г., не благоприятствующей восполнению запасов подземных вод, являющихся основным источником питания реки в зимнее время. Средний сток Селенги в феврале-марте составлял около 100 м³/с, а в конце зимней межени снизился до 83 м³/с.

Величины рН и концентрации растворенного кислорода являются важными показателями, характеризующими условия для развития гидробионтов в водоеме и способность воды к самоочищению. В воде р. Селенги и ее притоков величины рН в течении всего года были близки к нейтральным. В подледный период они изменялись в диапазоне 7,33–7,82, немного ниже эта величина была в воде р. Чикой (6,99). Содержания кислорода в Селенге в подледный период было достаточно низким и изменялись от 5,9 до 9,5 мг/дм³ (44–70 % нас.). Минимальное содержание растворенного кислорода наблюдалось у п. Новоселенгинск, ниже г. Улан-Уде, у с. Кабанск и в р. Уде, что говорит о низком качестве воды на этих участках и вероятно связано по-

ступлением в русло сточных вод. По содержанию кислорода качество вод здесь согласно экологической классификации [3] соответствует категории «сильно загрязненная». В воде притоков Джиды, Темник и Чикой в зимний период эта величина была выше – 8,0–11,2 мг/дм³ (60–82 % нас.). В мае после освобождения рек ото льда кислородный режим улучшился и его содержание оставалось достаточно высоким (80–105 % нас.) до октября, что было благоприятно для развития гидробионтов. В результате активизации развития фитопланктона после вскрытия реки повысилась и величина рН (до 8,2). Однако высокий паводок в июле, обусловил незначительное снижение рН (7,81–7,89) по сравнению с предыдущими годами [8].

Ионный состав. В течение всего года воды р. Селенги и ее притоков относились к гидрокарбонатным группы кальция (рис. 2). При изменении водности относительный ионный состав оставался стабильным, содержание гидрокарбонатов, кальция, магния и сульфатов отклонялось от средних значений менее, чем на 2 % экв.

В 2018 г. в воде р. Селенги на изученном участке концентрации HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+ изменялись в пределах 81–177; 10,0–22,2; 0,6–2,6; 19,2–45,7; 3,7–10,1; 4,3–8,9 и 1,1–2,1 мг/дм³ соответственно. Суммарное содержание ионов колебалось от 107 до 268 мг/дм³. Максимальные концентрации ионов и их суммарное содержание наблюдались в подледный период, когда в питании реки превалировала подземная составляющая. В мае после вскрытия реки концентрации ионов в среднем снизились на 30 %. Минимальные концентрации наблюдались в июле после сильных затяжных дождей, когда водность реки была наибольшей.

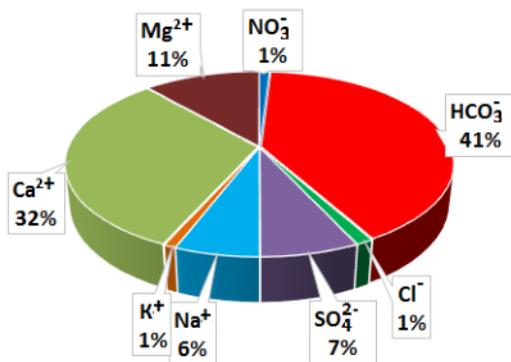


Рис. 2. Средний относительный ионный состав воды р. Селенги (%экв), 2018 г.

По длине реки суммарное содержание ионов в воде на участке от пос. Наушки до Новоселенгинска практически не изменялось и равнялось зимой 260–267 мг/дм³, а в период открытой воды 170–190 мг/дм³. Поступление вод р. Джиды не оказывало заметного влияния на химический состав и сумму ионов в р. Селенге ввиду близких величин. Вниз по течению сумма ионов постепенно снижалась и в районе с. Кабанск составляла зимой 171 мг/дм³, а в теплое время года изменялась от 107 до 130 мг/дм³. Такое снижение обусловлено разбавляющим влиянием менее минерализованных вод впадающих притоков – Темника, Чикоя и Уды (рис 3).

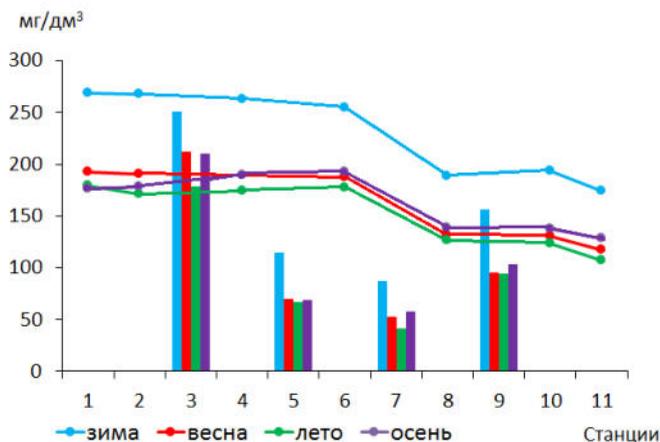


Рис. 3. Суммарное содержание ионов в воде р. Селенги (линии) и в ее притоках (прямоугольники). Номера станций соответствуют рис. 1

Биогенные элементы. Содержание биогенных элементов и органических веществ в р. Селенге в значительной степени определяется уровнем развития фитопланктона, и поступлением сточных вод. Анализ данных, полученных ранее [2; 7; 8] показал, что зимой при отсутствии поступления органических веществ с водосбора и низком уровне развития фитопланктона в речных водах регистрируется накопление концентраций биогенных элементов до максимальных величин, при этом содержание органических веществ снижается до минимума. Концентрации биогенных элементов и органических веществ в р. Селенге зимой 2018 г. (таблица) изменялись незначительно, однако в районе пос. Новоселенгинск и особенно ниже г. Улан-Удэ наблюдалось увеличение концентраций соединений фосфора и азота, что обусловлено поступлением в русло реки сточных вод (таблица). В условиях низкой водности разбавление стоков затруднено и ниже по

течению (с. Кабанск) концентрации биогенных элементов хоть и снижаются, однако остаются выше значений, которые регистрировались выше г. Улан-Удэ. В воде притоков р. Селенги концентрации биогенных элементов и органических веществ зимой 2018 г. также изменялись в широких пределах (см. таблицу), с наиболее высокими значениями в р. Уда, в русло которой поступают сточные воды г. Улан-Удэ.

Таблица

Изменение концентраций биогенных элементов и органических веществ в воде р. Селенга и ее притоках в феврале (числитель) и июле (знаменатель) 2018 г.

Номера станций согласно рис.1.

Станции отбора проб	БО	ПО	Р _{общ.}	Р _{мин}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻
	мг О/дм ³		мкг Р/дм ³		мкг N/дм ³		
1	3,8/17,4	0,5/6,2	17/517	6/26	20/47	2/18	200/340
2	3,5/18,3	0,5/7,0	16/392	7/25	10/53	1/22	230/320
3	3,5/17,5	0,6/5,8	9/125	6/9	<10/26	1/2	280/162
4	4,1/11,9	0,5/6,7	12/316	7/20	<10/41	1/18	240/270
5	0,6/6,5	0,6/4,1	5/16	0/15	10/10	2/1	200/75
6	3,5/11,4	0,6/6,0	20/422	17/25	30/33	1/31	280/291
7	5,8/13,0	1,1/6,7	9/115	6/9	10/29	1/1	340/135
8	3,9/11,5	0,9/5,7	18/191	7/22	30/33	1/16	310/230
9	3,6/8,1	0,8/5,3	44/55	17/39	60/23	2/1	400/75
10	6,7/17,6	1,1/5,5	94/271	61/29	250/58	7/19	630/240
11	4,0/11,4	0,8/5,8	54/170	22/10	110/11	2/3	320/140

Весной и летом интенсивное развитие фитопланктона является основной причиной снижения содержания минеральных форм азота и фосфора в Селенге и притоках до минимальных значений, при этом увеличиваются концентрации общего фосфора и органических веществ [9]. Так в мае 2018 г. в воде р. Селенги на приграничном участке концентрации общего фосфора превышали зимние значения почти на порядок (150 мкг Р/дм³), в то время как концентрации фосфатов были ниже зимних – 3 мкг Р/дм³. Аммонийный азот в мае в воде Селенги регистрировался в следовых количествах и только на участке реки ниже г. Улан-Удэ концентрации этого компонента увеличились до 29 мкг N/дм³. Высокий дождевой паводок в июле 2018 г., обусловил поступление с водосбора в русло реки большого количества биогенных элементов и органических веществ (см. таблица), в то время как развитие фитопланктона было ограничено низкой прозрачностью воды. Уже от границы с Монголией (пос. Наушки) содержание фосфатов, нитратов, аммонийного азота и органического вещества в воде Селенги были выше, чем в зимний период. В соответствии с классификацией [3] по содержанию общего фосфора качество воды на этом участке

оценивалось как «сильно загрязненная». Вниз по течению реки концентрации биогенных элементов постепенно снижались, однако, как и зимой в районе пос. Новоселенгинск и ниже г. Улан-Удэ наблюдалось увеличение их содержания.

В конце сентября водность реки оставалась достаточно высокой, но поступления биогенных элементов и органики в русло реки снизились. Концентрации фосфатов изменялись от 2 до 4 мкг/дм³, нитратного азота от 70 до 240 мкг/дм³ снижаясь вниз по течению реки. Аммонийный азот в воде реки регистрировался в следовых количествах, однако на участке ниже г. Улан-Удэ его содержание увеличилось до 29 мкг/дм³.

Заключение

Проведенные исследования показали, что при низкой водности р. Селенги в зимний период на участках в районе пос. Новоселенгинск и ниже г. Улан-Удэ, находящихся под влиянием сточных вод, содержание растворенного кислорода снизилось до 5,9 мг/дм³ (44 % нас), что характеризует качество вод как «сильно загрязненные». В июле, во время дождевого паводка отмечалось поступление биогенных элементов и органических веществ с водосбора. Высокое содержание общего фосфора в воде в приграничном районе (пос. Наушки), позволяет говорить о загрязнении селенгинских вод на территории Монголии. Не смотря на паводок и разбавление поступающих в русло реки сточных вод, в летне-осенний период 2018 г. на участках реки ниже пос. Новоселенгинск и ниже г. Улан-Удэ, регистрировали повышенные концентрации биогенных элементов и органических веществ.

Таким образом, исследования химического состава вод р. Селенги, выполненные в завершающий период длительного маловодья (зима) и высоких дождевых летне-осенних паводков 2018 г. показали высокую антропогенную нагрузку на отдельных участках реки, снижение качества воды по отдельным показателям и ухудшение условий обитания гидробионтов.

Работа выполнена в рамках РФФИ (грант № 17-29-05085) и госзаданий № № 0345-2019-0008, 0339-2019-0003.

Список литературы

1. Барам Г. И., Верещагин А. Л., Голобокова Л. П. Применение микроколоночной высокоэффективной жидкостной хроматографии с УФ-детектированием для определения анионов в объектах окружающей среды // Аналит. химия. 1999. Т. 54, № 9. С. 962–965.
2. Обожин В. Н., Богданов В. Т., Кликунова О. Ф. Гидрохимия рек и озер Бурятии. Новосибирск : Наука, 1984. 150 с.

3. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши / О. П. Окснюк, В. Н. Жукинский, Л. П. Брагинский, П. Н. Линник, М. И. Кузьмин, В. Г. Кленус // Гидробиол. журн. 1993. № 4. С. 62–76.
4. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Ч. 1 / ред. Л. В. Боева. Ростов н/Д : НОК, 2009. 1045 с.
5. Особенности современных изменений притока воды в озеро Байкал / В. Н. Синокович, Л. Н. Сизова, М. Н. Шимараев, Н. Н. Курбатова // География и природ. ресурсы. 2013. № 4. С. 57–63.
6. Изменение климата и химический сток реки Селенги / В. М. Синокович, Л. М. Сороковикова, И. В. Томберг, А. К. Тулохонов // Докл. Акад. наук (Науки о земле). 2010. Т. 433, № 6. С. 817–821.
7. Особенности современного качества воды в дельте р. Селенги в период открытого русла / В. Н. Синокович, Л. М. Сороковикова, И. В. Томберг, А. С. Горшкова, Г. И. Поповская // Вода: химия и экология. 2015. № 6. С. 17–22.
8. Качество воды реки Селенги на границе с Монголией в начале XXI в. / Л. М. Сороковикова, Г. И. Поповская, И. В. Томберг, В. Н. Синокович, О. С. Кравченко, И. И. Маринайте, Н. В. Башенхаева, Т. В. Ходжер // Метеорология и гидрология. 2013. № 2. С. 93–103.
9. Особенности современного качества воды в дельте р. Селенги в период открытого русла Л. М. Сороковикова, В. Н. Синокович, И. В. Томберг, А. С. Горшкова, Г. И. Поповская // Вода: химия и экология. 2015. № 6. С. 17–22.
10. Фосфор в воде р. Селенги и его вынос в оз. Байкал в условиях низкой водности / Л. М. Сороковикова, И. В. Томберг, В. Н. Синокович, Е. В. Моложникова, Е. В. Елецкая // География и природ. ресурсы. 2018. Т. 39, № 4. С. 88–94.
11. Many-year variations of river runoff in the Selenga basin / N. L. Frolova, P. A. Belyakova, V. Yu. Grigor'ev, A. A. Sazonov // Water Res. 2017. Vol. 4, N 3. P. 359–371.
12. *Wetzel R. G., Likens G. Limnological Analyses. N. Y. : Springer-Verlag, 1991. 391 p.*

УДК 556.555.4:551.583.14 (282.256.341)

Сезонная и межгодовая динамика температуры воды в литорали Южного Байкала (пос. Листвянка – м. Берёзовый – губа Большие Коты) в 2000–2018 гг.

Е. С. Троицкая (elena.troitskaya@lin.irk.ru)
О. В. Медвежонкова (popova-olga87@yandex.ru)
М. Н. Шимараев (shimarae@lin.irk.ru)
О. А. Тимошкин (timole.turgenevo@gmail.com)

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

Аннотация. По материалам наблюдений в 2000–2018 гг. за температурой воды на станциях в литорали Южного Байкала на участке п. Листвянка – губа Большие Коты выявлены межгодовые колебания температуры воды с периодом 3–6 лет. Показано, что в этот период времени максимальные изменения температуры воды наблюдались весной (0,65 °C/10 лет), в остальные сезоны тренды слабо положительны и незначимы. Причинами заметного повышения температуры воды могли быть более высокие темпы прогрева воздуха весной, смещение сроков вскрытия и замерзания льда в последние десятилетия и, как следствие, смещение на более ранние даты сроков подлёдного и прямого прогрева водной толщи. Среднегодовая температура воды также име-

ет значимый положительный тренд ($0,61\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет), обусловленный повышением температуры весной и в декабре – январе.

Ключевые слова: озеро Байкал, литораль, температура воды.

Введение

Температура воды является одним из широко применяемых параметров для изучения влияния изменений климата на озёра. На Байкале давно ведутся исследования влияния изменений климата на его температурный и ледовый режим [2–7; 9–11]. Наибольшее внимание уделяется пелагиали озера и береговой зоне, однако для биологов наибольший интерес представляет литораль, где наблюдается максимальное биологическое разнообразие. В последнее время пристальное внимание уделяется изменениям температуры воды [8; 12] в литорали Байкала в связи с массовым цветением водоросли *Spyrogira*, отмеченным, начиная с 2010 г. [1; 12].

Целью нашей работы стал анализ температуры воды в 2000–2018 гг. в литорали Южного Байкала на участке от п. Листвянка до губы Большие Коты (рис. 1), где отмечен рост водоросли *Spyrogira* [12].



Рис. 1. Расположение станций наблюдения за температурой воды:
1–2 – пирс ЛИН СО РАН в п. Листвянка, 3–6 – полигон у м. Берёзовый,
7 – бух. Емельяновка, 8 – губа Бол. Коты

Материалы наблюдений и методы обработки данных

Для анализа были использованы многолетние наблюдения за температурой воды на пирсе Лимнологического института СО РАН в

п. Листвянка, а также данные её измерений во время экспедиционных работ на различных участках берега Южного Байкала (рис. 1). Ряды наблюдений на разных станциях имеют различную продолжительность и дискретность измерений (табл. 1).

Таблица 1

Информация по станциям наблюдений

Номер станции	Название	Глубина измерений, м	Расстояние от берега, м	Период наблюдений
1	Листвянка (пирс) 1	0–1,0	5	01.01.2000–31.12.2018
2	Листвянка (пирс) 2	3,0	8	15.08.2015–14.09.2015
3	мыс Берёзовый (ст. 1)	2,9–3,0	300	01.09.2003–29.06.2006
4	мыс Берёзовый (ст. 2)	5,0–6,0	750	01.09.2003–29.06.2006
5	мыс Берёзовый (ст. 3)	3,2	750	01.09.2003–29.06.2006
6	мыс Берёзовый (ст. 4)	6,5	750	01.09.2003–25.06.2006
7	бух. Емельяновка	3,0	5	15.08.2015–14.09.2015
8	губа Бол. Коты	3,0 (дно)	5	01.07.2016–24.10.2016

На ст. 1 измерения в 2000–2006 г. проводились 1 раз в день ртутным термометром в 16:00 часов, после установки электронного оборудования дискретность составила 1 раз в 2–4 мин (2006–2018 гг.). На остальных станциях измерения проводились с помощью термисторов в отдельные месяцы и годы с дискретностью 1 раз 30–60 мин. Измерения на всех станциях предварительно были выверены на наличие выбросов, после чего были усреднены посуточно, а затем были получены среднемесячные, среднесезонные и среднегодовые значения температуры воды для отдельных лет. Затем полученные величины прошли статистическую обработку.

Так как только на одной станции (ст. 1) проводились практически непрерывные наблюдения за температурой воды, то было проведён корреляционный анализ с данными с других станций. Анализ показал, что, несмотря на большую протяженность береговой линии (~17 км) и разные глубины измерений (1,0–6,5 м), данные имеют тесную связь (табл. 2), и результаты анализа данных на ст. 1 в п. Листвянка могут быть применены и для других пунктов наблюдений.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции (номера станций те же, что и на рис. 1)

Станция наблюдений	2	3	4	5	6	7	8
1	0,98	0,97	0,95	0,91	0,93	0,80	0,92

Результаты и обсуждение

Анализ изменений температуры воды в отдельные сезоны (рис. 2) выявил наличие периодов колебаний 3–6 лет. Выделяется заметное понижение сезонных температур в 2009–2013 гг., а затем резкое их повышение (за исключением осени). Тренд изменения для всех сезонов, кроме весны, слабо положителен ($0,11–0,33\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) и незначим (достоверность более 0,1). Весной тренд положителен ($0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) и значим (достоверность 0,08). Если рассматривать тёплый период (май – сентябрь), то тренд слабоположительный ($0,19\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) и незначимый (достоверность 0,1).

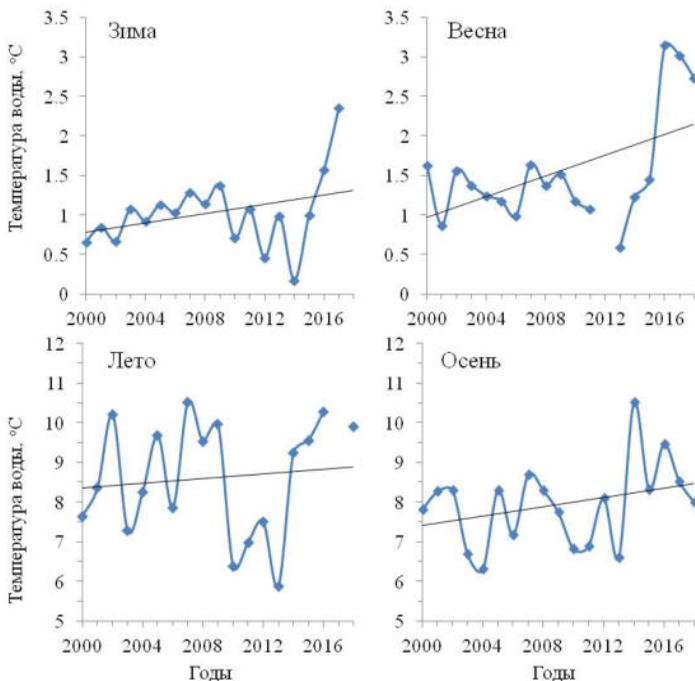


Рис. 2. Многолетние изменения температуры воды в отдельные сезоны в 2000–2018 гг.

Полученные результаты для тёплого периода совпадают с результатами исследований температуры воды в береговой зоне для всего Южного Байкала [7; 12]. Значимые изменения температуры воды в литорали Южного Байкала весной, возможно, связаны с более высокими температурами воздуха в районе Байкала в последние десятилетия [10; 11], смещением сроков замерзания и вскрытия льда [4; 11] и, как следствие, более ранними сроками начала подлёдного и прямого прогрева водной толщи.

Анализ годовых значений температуры воды (рис. 3) выявил один полный цикл с периодом 11 лет (200–2013 гг.) и начало нового цикла (2014–2018 гг.). Величина средней величины среднемноголетней температуры в 2000–2018 гг. составила 4,89 °С. Относительно этой величины и с учётом СКО к тёплым годам можно отнести 2016–2018 гг., к холодным – 2003, 2011 и 2013 гг. Максимальные среднегодовые температуры наблюдались в 2016–2018 гг. (6,07–6,08 °С), а минимальное значение пришлось на 2013 г. (3,45 °С).

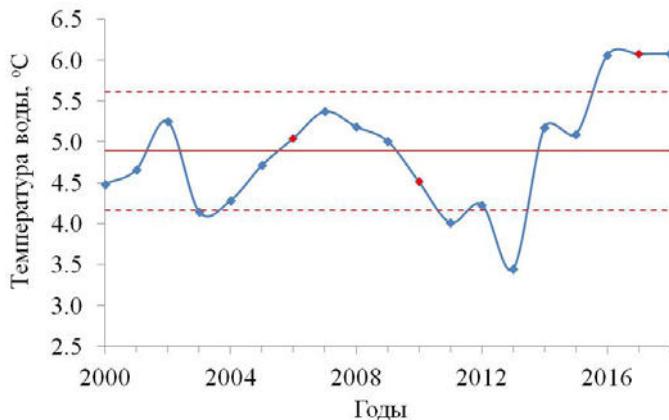


Рис. 3. Изменение среднегодовой температуры воды в п. Листвянка в 2000–2018 гг.: синяя кривая – среднегодовые значения температуры воды, красные пунктирные линии – её среднеквадратичные отклонения, бордовая прямая – среднее за 2000–2018 гг. значение среднегодовой температуры воды. Красные точки – интерполированные значения из-за отсутствия данных продолжительную часть года (2–4 месяца)

Тренд среднегодовой температуры за время наблюдений составил 0,61 °С/10 лет (достоверность 0,05). По-видимому, это результат вклада возрастающих температур воды весной. Также могло сказаться повышение температуры воздуха в зимние месяцы, которые были

максимальны в декабре, январе [10]. Согласно [10] тренд в эти месяцы составил $2,1\text{--}2,2\text{ }^{\circ}\text{C}/100$ лет (по данным наблюдений в 1896–2006 гг. на станции Бабушкин). Такое заметное повышение зимних температур воздуха привело к сохранению тепла в верхних слоях воды и более высоким температурам воды в декабре-январе (рис. 4). Тренды температуры воды в зимние месяцы 2000–2018 гг. также отражают положительную тенденцию, что и температуры воздуха. Для декабря и января тренды составляют $0,55$ и $0,44\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет (достоверность $0,04$), соответственно, а для февраля тренд значительно ниже ($0,09\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет) и незначим (достоверность $0,1$).

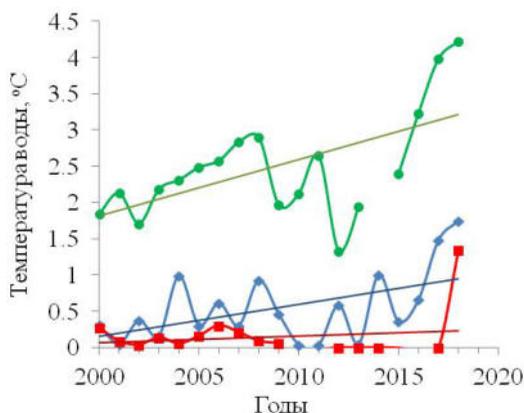


Рис. 4. Изменение температуры воды в декабре (зелёная кривая), январе (синяя кривая) и феврале (красная кривая) 2000–2018 гг. и их тренды

Выводы

Таким образом, для температуры воды в литорали Южного Берега на участке от п. Листвянка до губы Большие Коты выявлены 3–6-летние циклы её колебаний в отдельные сезоны года и 11-летний цикл для года в целом. Значимые тенденции изменения температуры воды в 2000–2018 гг. наблюдались весной ($0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет). Причинами могут быть более высокие температуры воздуха весной, смещение сроков вскрытия и замерзания льда и начала подлёдного и прямого прогрева водной толщи. Близким к весеннему оказался тренд и для среднегодовых значений температуры воды ($0,61\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет). Наибольшее влияние на среднегодовую температуру воды оказало её значимое повышение в декабре-январе и весной (март – май).

Работа выполнена в рамках гос. тем 0345-2019-0008 «Оценка и прогноз экологического состояния озера Байкал и сопряженных территорий в условиях антропогенного воздействия и изменения климата», 0345-2019-0009 «Крупномасштабные изменения в экологии и биоразнообразии сообществ прибрежной зоны озера Байкал: междисциплинарное исследование, выявление причин, прогноз развития».

Список литературы

1. Нарушение вертикальной зональности зеленых водорослей в открытом Лиственничном заливе озера Байкал, как следствие локального антропогенного воздействия / Л. С. Кравцова, Л. А. Ижболдина, И. В. Ханаев, Г. В. Помазкина, В. М. Домышева, О. С. Кравченко, М. А. Грачев // Докл. Акад. наук (Общая биология). 2012. Т. 447, № 2. С. 227–229.
2. *Сизова Л. Н., Куимова Л. Н., Шимараев М. Н.* Влияние циркуляции атмосферы на ледово-термические процессы на Байкале в 1950–2010 гг. / География и природ. ресурсы. 2013. № 2. С. 74–83.
3. *Троицкая Е. С., Шимараев М. Н., Цехановский В. В.* Многолетние изменения температуры поверхности воды в Байкале // География и природ. ресурсы. 2003. № 2. С. 47–50.
4. Климат и гидрологические процессы в бассейне оз. Байкал в XX столетии / М. Н. Шимараев, Л. Н. Куимова, В. Н. Синюкович, В. В. Цехановский // Метеорология и гидрология. 2002. № 3. С. 71–78.
5. *Шимараев М. Н.* Циркуляционные факторы изменения ледово-термического режима Байкала // География и природные ресурсы. 2007. № 4. С. 54–60.
6. *Шимараев М. Н., Старыгина Л. Н.* Зональная циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале (1968–2007 гг.) // География и природ. ресурсы. 2010. № 3. С. 62–68.
7. *Шимараев М. Н., Троицкая Е. С.* Тенденции изменения температуры верхнего слоя воды на прибрежных участках Байкала в современный период // География и природ. ресурсы. 2018. № 4. С. 95–104.
8. Climate factors as a possible trigger of modern ecological changes in shallow zone of Lake Baikal (Russia) / T. G. Potemkina, V. L. Potemkin, O. V. Kotsar, A. P. Fedotov // International Journal of Environmental Studies. 2018. Vol. 75, N 1. P. 86–98.
9. Global Lake surface warming / C. M. O'Reilly, S. Sharma, D. K. Gray, S. E. Hampton joint first authors // Geophysical Research Letters. 2015. Vol. 42 (24). P. 10.733–10.781.
10. *Shimaraev M. N., Domysheva V. M.* 3. Trends in Hydrological and hydrochemical Processes in Lake Baikal under Conditions of Modern Climate Change // Climatic Change and Global Warming of Inland Waters. Impacts and Mitigation for Ecosystems and Societies. Eds. Charles R. Goldman, Michio Kumagai, Richard D. Robarts – A John Wiley&Sons, Ltd., Publication. 2013. С. 43–66.
11. *Shimaraev M. V., Sinyukovich, L. Sizova, E. Troitskaya, L. Kuimova* Ice-thermal and water regime of Lake Baikal during 1950–2014 / 9th Symposium of European Freshwater Sciences – SEFS 9. Unimail, Geneva, Switzerland | 5–10 July, 2015. С. 275.
12. Groundwater contamination by sewage causes benthic algal outbreaks in the littoral zone of Lake Baikal (East Siberia) / O. A. Timoshkin, M. V. Moore, N. N. Kulikova, I. V. Tomberg, V. V. Malnik, M. N. Shimaraev, E. S. Troitskaya, A. A. Shirokaya, V. N. Sinyukovich, E. P. Zaitseva, V. M. Domysheva, M. Yamamuro, A. E. Poberezhnaya, E. M. Timoshkina // Journal of Great Lakes Research. 2018. N 44. P. 230–244.

УДК 556.161; 556.51 (571.5)

Современные изменения гидрологических характеристик р. Ушаковки

Д. В. Царенкова (tsarenkova.diana@yandex.ru)

Е. Н. Сутырина (ensut78@gmail.com)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Целью настоящего исследования является изучение современных тенденций изменений гидрологических характеристик р. Ушаковки, которая испытывает существенную антропогенную нагрузку, ведущую как к изменению параметров стока, так и морфометрических характеристик русла данного водотока.

Ключевые слова: р. Ушаковка, расход воды, климатические факторы, морфометрические характеристики.

Актуальность

Объектом исследования является р. Ушаковка на юге Иркутской области, которая представляет собой правый приток р. Ангары. Длина р. Ушаковки составляет около 77 км [4], из которых 7 км в нижнем течении находится в пределах г. Иркутска (рис. 1). Кроме г. Иркутска, на р. Ушаковке (от истока к устью) находятся населённые пункты Горячие Ключи, Добролёт, Поливаниха, Кукша, Худяково, Пивовариха, много садоводств. В г. Иркутске на берегах реки располагаются предприятия и рынки. Размещение в начале прошлого века ремесленных мастерских и других производственных предприятий в прибрежной полосе привело к захламлению и замусориванию территорий. В пределах 7 км от устья реки ландшафт поймы подвергся сильному антропогенному воздействию: произведена отсыпка пойменных территорий, водоохранная зона загрязнена строительными и бытовыми отходами, что существенно влияет на естественный режим водотока, приводит к нарушению путей миграции рыб и к трансформации русла р. Ушаковки [2; 7].

Ширина русла реки р. Ушаковки в настоящее время, как правило, не превышает до 20 м. В 1892 г. ширина реки составляла от 80 до 100 м [6]. Ширина устья р. Ушаковки сократилась с 600 – в середине XIX в., до 200 м – в начале XX в. и до 60 м – настоящее время [2]. По архивным данным как минимум до середины XIX в. р. Ушаковка была судоходной [2]. Сопоставление ретроспективных и современных изображений (см. рис. 1) позволяют получить представления насколь-

ко существенно изменился внешний облик р. Ушаковки в районе г. Иркутска.



А



Б

Рис. 1. Внешний облик р. Ушаковки в пределах г. Иркутска:
А – в начале XX в.; Б – в 2012 г. [6; 7]

Под влиянием антропогенной нагрузки уже к началу XX в. произошло существенное изменение параметров стока и переформирование русла р. Ушаковки. Ситуация продолжает усугубляться, в том числе под негативным влиянием современных изменений стокоформирующих климатических факторов. Поэтому изучение современных тенденций изменения параметров стока и морфометрических характеристик р. Ушаковки является актуальной задачей.

Материалы и методы исследования

В рамках исследования для изучения современных тенденций изменения стока были использованы ряды данных о среднегодовых расходах воды р. Ушаковки на посту г. Иркутск за 1938–1947, 1949–1955 и 1989–2016 гг. и посту пос. Добролет за 1954–1990 и 2003–2016 гг. (рис. 2).



Рис. 2. Расположение гидрологических постов на р. Ушаковке

Для удаления пробелов и восстановления рядов данных о среднегодовых расходах за весь период с 1938 по 2016 г. на обоих постах был использован метод гидрологической аналогии. В качестве реки-аналога для р. Ушаковки на посту г. Иркутск выступил пост в пос. Добролет на данной водотоке и наоборот. Данные посты имеют ряд совместных наблюдений за 1989–1990 гг. и 2005–2016 гг., составляющий 14 лет, обладают сходством условий формирования стока, имеют размеры водосборных бассейнов одного порядка: 322 км^2 – на посту пос. Добролет и 829 км^2 – на посту г. Иркутск, а также очень тесную связь между среднегодовыми расходами на данных постах (рис. 3). Для восстановления информации о среднегодовых расходах в 1948 г. на обоих постах в качестве аналога использовалась информация об осадках в пределах водосбора по данным реанализа.

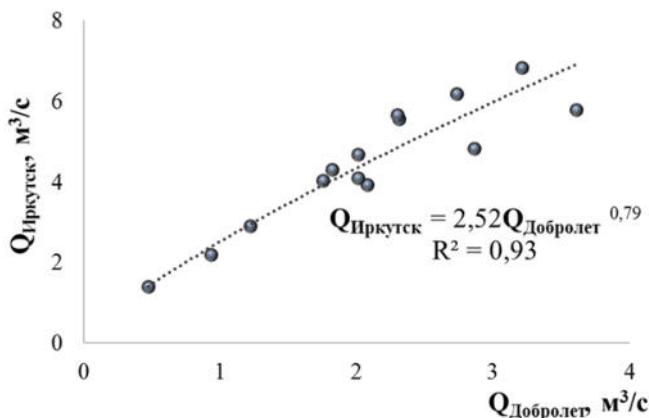


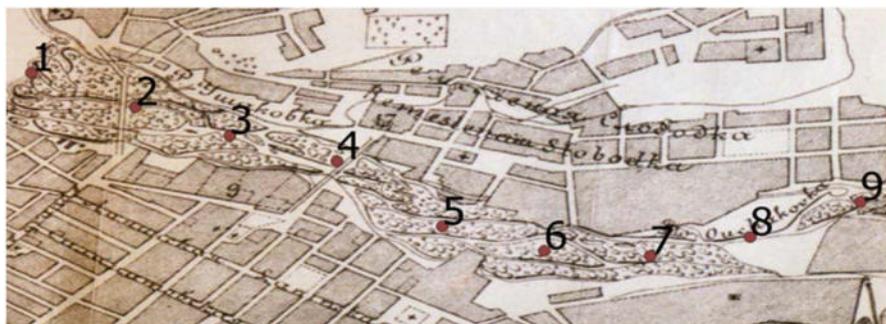
Рис. 3. Связь среднегодовых расходов воды р. Ушаковки на постах пос. Добролет и г. Иркутск [5]

Для изучения современных тенденций влияющих на сток климатических факторов в пределах бассейна р. Ушаковки была использована информация об осадках и приземной температуре воздуха по данным реанализа NCEP/NCAR (The National Centers for Environmental Prediction / The National Center for Atmospheric Research) за период с 1948 по 2016 г.

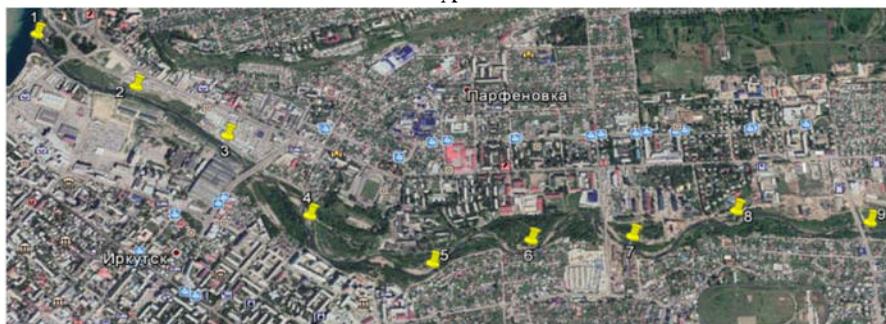
Для изучения переформирования русла была произведена оценка и сопоставление морфометрических характеристик, измеренных по ретроспективной схеме г. Иркутска за 1900 г. [1] и по современным космоснимкам за 2018 г. [8]. Для работы с исторической схемой, была произведена ее привязка в программе QGis, после средствами данной ГИС на данной карте-схеме был определен ряд морфометрических характеристик в 9 створах (рис. 4, А). На соответствующих расстояниях от устья реки с использованием программы Google Earth на современной космофотокарте за 2018 г. также были определены характеристики русла р. Ушаковки (рис. 4, Б).

Полученные результаты

Для многолетнего периода с 1938 по 2016 г. были получены ряды без пропусков среднегодовых расходов воды р. Ушаковки на постах пос. Добролет и г. Иркутск и проанализированы современные тенденции их изменений. Установлено наличие отрицательных линейных трендов изменения среднегодовых расходов р. Ушаковки, которые составили минус 0,095 и минус 0,153 (м³/с)/10 лет на постах пос. Добролет и г. Иркутск соответственно (рис. 5).



А



Б

Рис. 4. Ушаковка в пределах г. Иркутск:

А – на фрагменте схемы г. Иркутска за 1900 г. [1], Б – на космоснимке за 2018 г. [8]

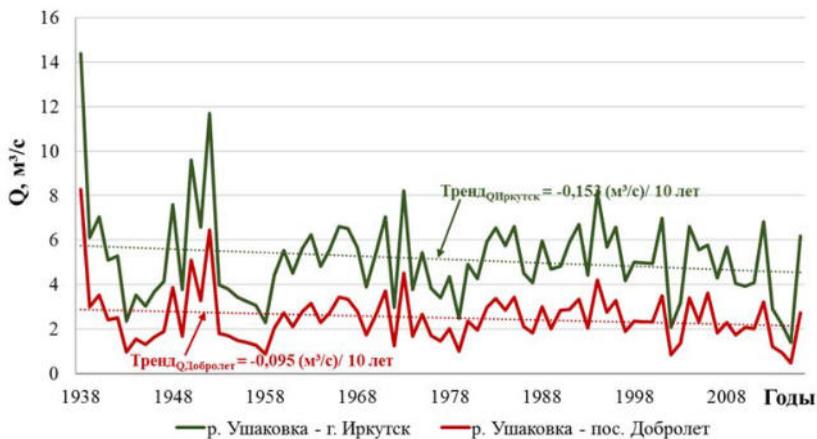


Рис. 5. Межгодовая изменчивость среднегодовых расходов воды р. Ушаковки на постах пос. Добролет и г. Иркутск и тренды их изменения [5]

Оценка значимости трендов с применением F-критерия показала уровень статистической надёжности около 90 %, что демонстрирует снижение среднегодовых расходов за период исследования с 1938 по 2016 г. на 31 и 24 % на постах пос. Добролет и г. Иркутск соответственно. Более подробно оценка тенденций изменения стока р. Ушаковки описана авторами в статье [5].

Сток представляет собой сложный многофакторный природный процесс, обусловленный влиянием комплекса физико-географических факторов и хозяйственной деятельности. Основными факторами стока, определяющими его развитие, являются климатические. Климат воздействует на сток не только непосредственно, но и через другие природные факторы: почву, растительность, рельеф [3]. В работе проанализированы многолетние ряды ряда климатических факторов, оказывающих влияние на сток: осадков и приземной температуры воздуха с использованием данных реанализа NCEP/NCAR за 1948–2016 гг. в пределах водосбора р. Ушаковки и были проанализированы их современные тенденции (рис. 6). В период с 1948 по 1970 гг. в пределах рассматриваемого бассейна наблюдался отрицательный тренд температуры, который составил минус $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет. В более поздний период (с 1971 по 2016 г.) тренд температуры воздуха был положительным $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет. Уровень статистической надёжности трендов температуры составил более 95 % в период с 1948 по 1970 г. и более 99 % в период с 1971 по 2016 г. При этом известно, что вместе с ростом температуры должно происходить и увеличение зависящей от неё величины испаряемости, т. е. потенциально возможного, не лимитируемого запасами воды испарения в данной местности. Таким образом, происходит сокращение приходной части водного баланса изучаемого водосбора.

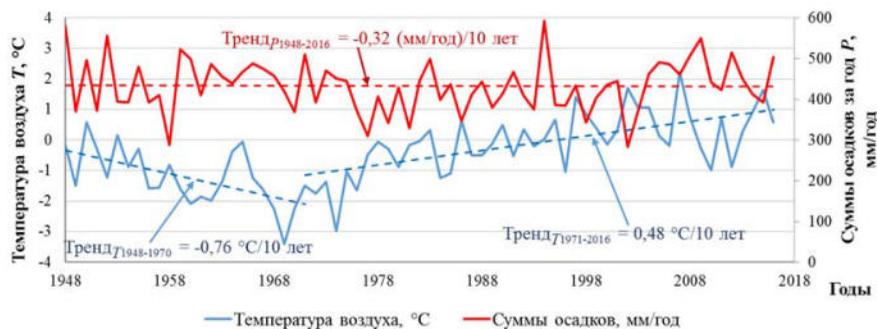


Рис. 6. Многолетняя изменчивость годовых сумм осадков и среднегодовых значений приземной температуры воздуха в пределах водосбора р. Ушаковки [5]

Статистически значимых трендов изменения годовых сумм осадков за период с 1948 по 2016 г. не выявлено.

Также на основе анализа разновременных картографических материалов выявлены изменения ряда морфометрических показателей русла. Изменение ширины русла р. Ушаковки в 1900 и 2018 гг. продемонстрировано на рис. 7. Можно заметить существенное уменьшение ширины русла, за последние 118 лет она уменьшилась в среднем на один порядок. Это может быть связано как со снижением расходов воды, показанным выше, так и с отсыпкой грунта в пойме.

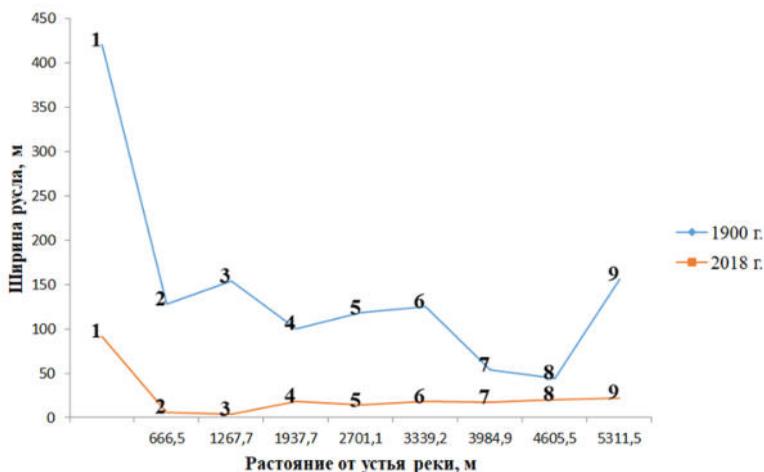


Рис. 7. Ширина русла р. Ушаковки в нижнем течении в 1900 и 2018 гг.

Также показано изменение типа русловых процессов при анализе разновременных картографических материалов. В настоящее время на участке, где река протекает уже непосредственно по территории города и где находятся постройки и заселенные участки г. Иркутска отмечается ограниченное меандрирование, ввиду воздействия антропогенных ограничивающих факторов. Выше по течению влияние ограничивающих факторов ослабевает так, что на участке реки за пределами г. Иркутска отмечается свободное меандрирование, углы разворота излучин становятся больше 90° , наблюдаются излучины на различных стадиях развития, а также следы стариц с близко расположенными концами на пойме. На ретроспективной схеме в пределах г. Иркутска и в непосредственной близости к нему наблюдается пойменная многоруканность.

Выводы

В ходе проведённого исследования выявлены существенные современные изменения стока р. Ушаковки, выражающиеся в снижении среднегодовых расходов с 1938 по 2016 г. на 31 и 24 % на постах пос. Добролет и г. Иркутск соответственно.

В ходе исследовании показано, что осадки, определяющие приходную часть водного баланса водосбора реки не претерпели существенных изменений за период с 1948 по 2016 г. На увеличение расходной части баланса мог повлиять рост приземной температуры воздуха, отмечающийся с 1970 по 2016 г. и ведущий к росту испаряемости, т. е. потенциально возможного испарения. Также к увеличению расходной части водного баланса приводит ведущаяся в пределах водосбора р. Ушаковки без соблюдения необходимых экологических требований интенсивная хозяйственная деятельность. Постоянное снижение расходов воды наблюдается вследствие осушения торфяных болот для использования территорий под садовоогороднические нужды, бесконтрольной откачке подземных вод, имеющих гидравлическую связь с рекой и т. д. Также интенсивные вырубki лесов на территории водосбора р. Ушаковки ухудшают инфильтрационную способность почв и видоизменяют водный баланс.

Также в работе установлено изменение типа русловых процессов на участке русла в пределах г. Иркутска с пойменной многорукавности на ограниченное меандрирование и выявлено уменьшение ширины русла на порядок за период с 1900 по 2018 г., что стало отражением как существенного снижения расходов воды, показанных в работе, так и отсыпок пойменных территорий и замусоривания русла.

Исследования проводятся при финансовой поддержке гранта РФФИ 17-29-05045 офи_м «Анализ влияния изменений климата и параметров циркуляции атмосферы на современные тенденции изменчивости гидрологических условий озера Байкал».

Список литературы

1. Иркутск 350 лет: историко-геогр. атлас города / гл. ред. Ю. М. Юрин ; сост., комп. картография: Л. Б. Михалап, Т. Г. Смирнова. Иркутск : ВостСиб АГП, 2011. 119 с.
2. Кламер М., Дружинина И. Е., Глебова Н. М. Особенности расположения реки Ушаковки в Иркутске и ее природный потенциал // Изв. вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость, 2017. Т. 7, № 2. С. 117–125.
3. Комлев А. М. Закономерности формирования и методы расчетов речного стока. Пермь : Изд-во Перм. ун-та, 2002. 157 с.
4. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Л. : Гидрометеоиздат, 1965. Т. 16, вып. 2. 224 с.

5. Сутырина Е. Н., Царенкова Д. В. Современные изменения стока р. Ушаковки / Материалы II международной научно-практической конференции «Безопасность природопользования в условиях устойчивого развития» (19–21 нояб. 2018 г.). Иркутск, 2018. С. 109–112.

6. Ушаковка [Электронный ресурс]. URL: <http://irkipedia.ru/content/ushakovka> (дата обращения: 31.08.2018).

7. Vaikal info. Водоохранную зону реки Ушаковка в Иркутске продолжают незаконно застраивать и загрязнять сточными водами [Электронный ресурс]. URL: <http://baik-info.ru/archives/51387> (дата обращения: 15.05.2019).

8. Google Планета Земля [Электронный ресурс]. URL: <https://www.google.ru/intl/ru/earth> (дата обращения: 29.04.2019).

УДК 556.555.2/3

Водный режим оз. Байкал в XXI столетии

И. А. Чернявская (ermar23@mail.ru)¹

В. Н. Синюкович (sin@lin.irk.ru)²

М. С. Чернышов (chernishov@lin.irk.ru)²

¹ Иркутское УГМС, г. Иркутск

² Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

Аннотация. Рассмотрены некоторые особенности водного режима оз. Байкал, формирующегося в текущем столетии в условиях пониженной водности и изменения правил использования водных ресурсов озера. Охарактеризован уровенный режим водоема, оценены изменения составляющих его водного баланса в рассматриваемый период, определяющие современные колебания уровня оз. Байкал, в том числе его снижение в 2015–2017 гг.

Ключевые слова: уровень воды, маловодье, водный баланс.

Введение

Формирование водного режима оз. Байкал определяется соотношением приходно-расходных составляющих его водного баланса и в современных условиях происходит как под воздействием климата, характеризующегося усилением неустойчивости, так и вследствие регулирования озера плотиной Иркутской ГЭС. Порядок регулирования стока через Иркутский гидроузел также претерпевает определенные изменения, наиболее значимым из которых явилось установление с 2001 г. предельных уровней Байкала на отметках 456 и 457 м в тихоокеанской системе высот (ТО) [2]. Существовавший до этого времени диапазон допустимых значений уровня оказался уменьшен практически вдвое и его поддержание в условиях последовавшего за этим снижения водности оказалось трудновыполнимым. В результате, в 2015–

2018 г. уровни Байкала выходили за нижнюю регламентированную отметку, снижаясь до 455,71 м ТО.

Правомерность использования водных ресурсов озера в подобных ситуациях обеспечивалась принятием временных постановлений Правительства РФ, последнее из которых [3] действует до начала 2021 г. и расширяет диапазон колебаний уровня до 2,3 м (455,54–457,85 м). Перечисленные выше нюансы обуславливают актуальность и ряд особенностей водного режима озера в наступившем столетии и требуют более детального рассмотрения.

В настоящей статье для характеристики водного режима Байкала, в соответствии с терминологией [1; 7], используются материалы наблюдений за уровнем озера с начала нормальной эксплуатации Иркутского водохранилища (1962 г.). Помимо этого, привлечены данные по основным элементам водного баланса озера. Вся исходная информация принята по сведениям Росгидромета.

Результаты и обсуждение

Современное потепление климата в байкальском регионе проявляется значительно сильнее, чем в среднем на планете [8] и сопровождается перестройкой различных гидрологических процессов как в самом озере, так и в его бассейне. Колебания уровня Байкала, являющиеся основным показателем водного режима водоема, с начала текущего столетия (рис. 1) до 2014 г. характеризуются определенной стабильностью, а в последующий период существенно снижаются вследствие дефицита притока поверхностных вод в озеро.

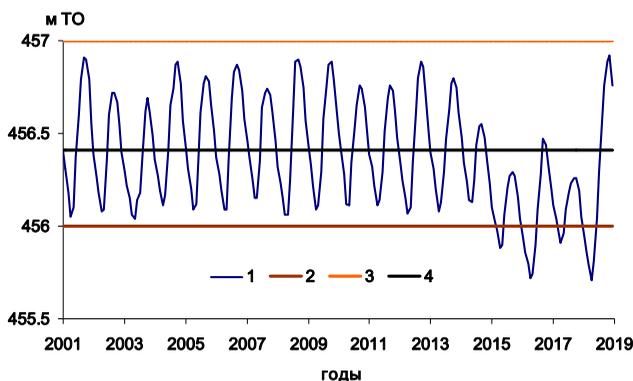


Рис. 1. Уровни оз. Байкал в период 2001–2018 гг.:

1 – среднемесячные значения; 2, 3 – верхний и нижний предельные уровни по Постановлению [2]; 4 – среднее значение за 1962–2000 гг.

В маловодные годы наблюдалось снижение выработки электроэнергии на Ангарском каскаде ГЭС, ухудшение условий судоходства на р. Ангаре ниже г. Иркутска и рост напряженности водообеспечения населения и промышленности в нижнем бьефе Иркутской ГЭС. Наивысший уровень Байкала с 2001 по 2017 г. достигал 456,94 м, а наинизший – 455,71 м. В сравнении с предшествующим периодом (1962–2000 гг.), когда наивысший уровень достигал 457,42 м (1988 г.), а наинизший 455,27 м (1982 г.), абсолютная амплитуда колебаний уровня уменьшилась с 2,15 до 1,23 м, т. е. почти в два раза.

Главной составляющей приходной части баланса озера является поверхностный приток, представляющий собой сумму стока всех притоков Байкала. В колебаниях притока выделяются маловодные и многоводные периоды, наглядно отображаемые видом разностной интегральной кривой поступления поверхностных вод в озеро (рис. 2).

Последний период маловодья, в котором особенно низкий приток приходится на 2014–2017 гг., продолжается с 1996 г. Дефицит притока воды в этот период практически достиг по своим показателям маловодья, наблюдавшегося в 1976–1981 гг. В 2015 г. обеспеченность притока составила 97,3 % (42,5 км³), что превосходит минимум предшествующего маловодья (1979 г.), когда приток составлял 44,4 км³, а его обеспеченность – 96,0 % (табл. 1).

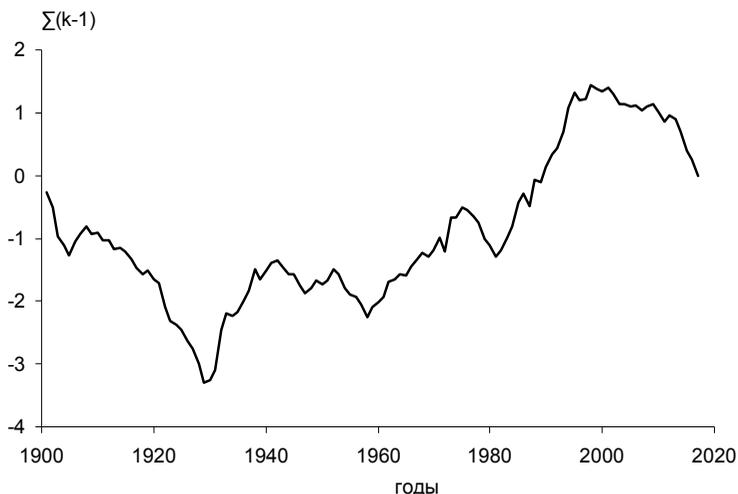


Рис. 2. Разностная интегральная кривая поверхностного притока воды в оз. Байкал k – модульный коэффициент (значения притока, отнесенные к его средней величине).

Таблица 1

Поверхностный приток в маловодные периоды 1976–1982 и 2013–2017 гг.

Год	Приток		Год	Приток	
	км ³	%		км ³	%
1976	57,5	59,0	2013	56,7	59,7
1977	53,2	73,0	2014	46,9	92,4
1978	53,6	87,1	2015	42,5	97,3
1979	44,4	96,0	2016	51,4	83,2
1980	53,6	87,1	2017	44,2	96,6
1981	49,7	85,7			

Внутри года изменения уровня Байкала носят выраженный сезонный характер, закономерно меняющиеся в зависимости от соотношения между приходом и расходом воды. Поскольку определяющим элементом прихода является приток речных вод, то и ход уровня в первом приближении и с запаздыванием в два-три месяца соответствует внутригодовому ходу приточности в озеро, повышаясь с конца апреля-начала мая и достигая максимума обычно в сентябре (рис. 3). После этого он постепенно понижается вплоть до весны следующего года.

Несмотря на определенные искажения, связанные с зарегулированием озера, эта закономерность сохраняется со времени естественных колебаний уровня, повторяясь в современных условиях на более высоких отметках.

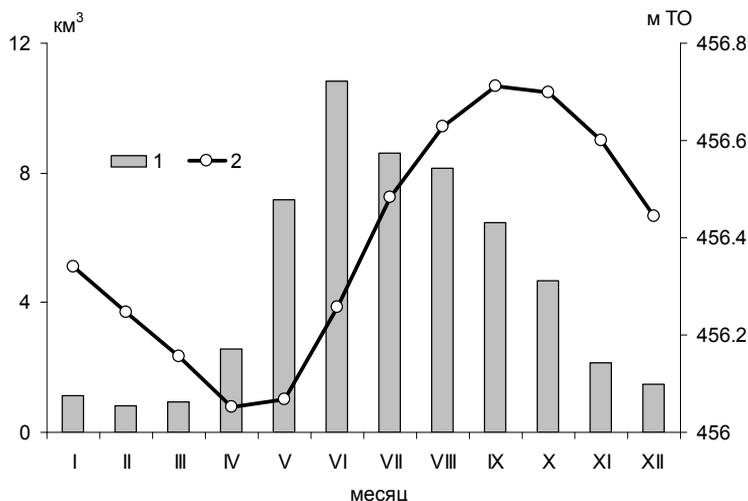


Рис. 3. Осредненный внутригодовой ход притока (1) и уровня (2) за 2001–2017 гг.

Изменения притока и стока, двух главных элементов водного баланса Байкала, в текущем столетии (табл. 2, рис. 4) также отличаются преобладанием пониженных значений, в особенности в 2014–2017 гг. Общее падение притока с 1996 г. обусловлено дефицитом водности рек в бассейне озера, связанного с ослаблением зональной составляющей циркуляции атмосферы [5; 9] и усилением процессов антициклогенеза на юге Восточной Сибири и севере Монголии [4].

Таблица 2

Средние значения показателей водного режима оз. Байкал в разные периоды

Показатель	2001–2017 гг.	1962–2000 гг.	Среднее многолетнее [6]
Уровень воды, м ТО	456,38	456,41	456,40
Поверхностный приток, км ³ /год	55,03	64,77	63,60
Сток через р. Ангару, км ³ /год	51,23	60,31	58,90
Осадки на зеркало озера, км ³ /год	11,93	12,42	12,45
Испарение с водной поверхности, км ³ /год	15,46	14,66	14,73
Полезный приток, км ³ /год	51,50	62,53	61,32

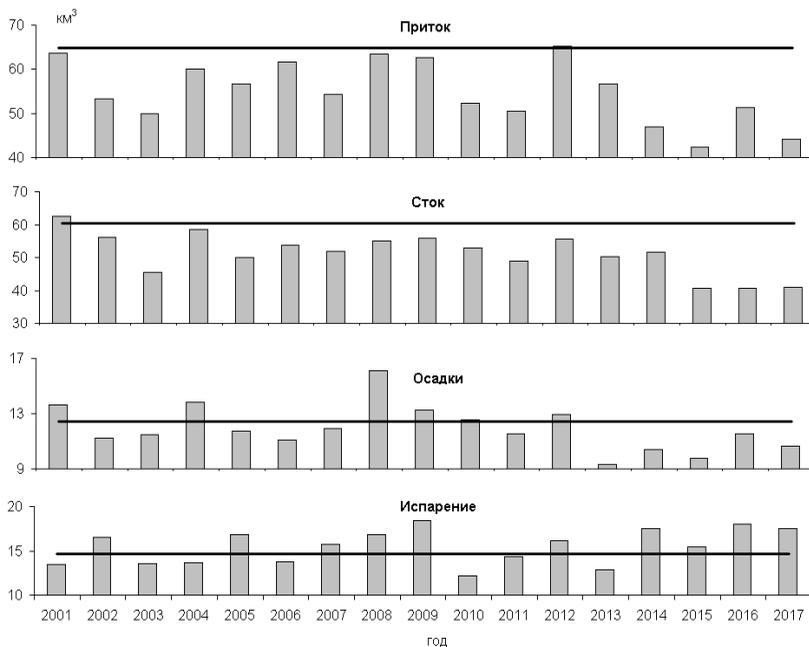


Рис. 4. Годовые значения элементов водного баланса озера: жирная линия – среднее значение за 1962–2000 гг.

В гидроэнергетике вместо притока зачастую используется понятие «полезный приток», т. е. количество воды, которое может быть полезно использовано при работе ГЭС. Для Иркутской ГЭС полезный приток включает поверхностный приток и осадки за вычетом испарения и в среднем составляет $59,0 \text{ км}^3/\text{год}$. Его наибольшее значение ($92,7 \text{ км}^3/\text{год}$) зафиксировано в 1973 г. (обеспеченность 1,8 %); наименьшее ($36,9 \text{ км}^3$) – в 2015 г. (обеспеченность 98,2 %). Для сравнения, в 1979 г. величина полезного притока составила $38,2 \text{ км}^3/\text{год}$ (обеспеченность 98,1 %).

Сток из озера в течение рассматриваемого периода также лишь один раз (2001 г.) был незначительно выше среднесноголетней величины, а в 2015–2017 гг. составлял около 70 % от нее. Отличительной особенностью для стока в указанные годы является беспрецедентно продолжительная (с октября 2014 по октябрь 2018 г.) работа Иркутской ГЭС на постоянных расходах воды, составляющих $1250\text{--}1300 \text{ м}^3/\text{с}$ ($\sim 40,7 \text{ км}^3/\text{год}$) и обеспечивающих минимальные требования водообеспечения в нижнем бьефе.

Межгодовая изменчивость притока и стока в XXI в., как и в более ранние годы, оставалась сравнительно низкой и по коэффициенту вариации составляла 0,12–0,13.

В маловодные годы, как правило, недостаток притока в оз. Байкал связан с уменьшением количества осадков в его бассейне. В маловодный период 2000–2017 гг. отмечался существенный дефицит осадков, особенно в 2013–2015 гг. В наиболее засушливом 2013 г. выпадение осадков на зеркало озера снизилось до $9,3 \text{ км}^3$ и лишь немного уступало минимуму ($8,7 \text{ км}^3$) за весь период наблюдений, который приходился на 1979 г.

При малом количестве осадков в 2013–2015 гг. величины испарения с поверхности озера, наоборот, превышали среднесноголетнее значение. В целом, с начала XXI в. испарение на 5,5 % было выше среднесноголетнего и изменялось от 12,2 (2010 г.) до $18,4 \text{ км}^3$ (2009 г.).

Относительная межгодовая изменчивость осадков и испарения оказалась несколько выше, чем притока и стока и по коэффициенту вариации составила 0,14 и 0,16 соответственно.

Заключение

Водный режим оз. Байкал с начала XXI в. отличался уменьшением амплитуды колебаний уровня до 1 м в соответствии с законодательно установленными пределами ($456\text{--}457 \text{ м ТО}$) и близкими к

средним условиями водности. За счет углубления маловодья в 2015–2017 гг. колебания уровня превысили метровый диапазон с выходом за нижнюю предельную отметку 456 м.

Несколько изменилось соотношение между элементами прихода-расхода воды в озере – приток и осадки уменьшились, а испарение возросло, что особенно заметно проявилось в 2014–2017 гг.

Список литературы

1. ГОСТ 19179-73 Гидрология суши. Термины и определения. М., 1988. 36 с.
2. О предельных значениях уровня воды в озере Байкал при осуществлении хозяйственной и иной деятельности : постановление Правительства РФ от 26 марта 2001 г. № 234 // Собр. законодательства РФ. 2001. № 14. Ст. 1366.
3. О максимальных и минимальных значениях уровня воды в озере Байкал в 2018–2020 гг. : постановление Правительства РФ от 27 дек. 2017 г. № 1667 // Собр. законодательства РФ. 2018. № 1. Ст. 394 (ч. 2).
4. Макухин В. Л., Синюкович В. Н., Латышева И. В. Циркуляционные факторы изменения притока воды в оз. Байкал // Безопасность природопользования в условиях устойчивого развития. Иркутск, 2017. С. 219–226.
5. Особенности современных изменений притока воды в озеро Байкал / В. Н. Синюкович, Л. Н. Сизова, М. Н. Шимараев, Н. Н. Курбатова // География и природ. ресурсы. 2013. № 4. С. 57–63.
6. Синюкович В. Н. Водный баланс озера Байкал в условиях зарегулированного режима // Водное хозяйство России. 2011. № 1. С. 12–22.
7. Чеботарев А. И. Гидрологический словарь. Издание второе переработанное и дополненное. Л. : Гидрометеиздат, 1970. 308 с.
8. О проявлении на Байкале глобальных изменений климата в XX столетии / М. Н. Шимараев, Л. Н. Куимова, В. Н. Синюкович, В. В. Цехановский // Докл. РАН. 2002. Т. 383, № 3. С. 397–400.
9. Шимараев М. Н., Старыгина Л. Н. Зональная циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале (1968–2007 гг.) // География и природ. ресурсы. 2010. № 3. С. 62–68.

УДК 551.581

Колебание высоты снежного покрова в границах бассейна малой реки

М. А. Чулунов (Chulunovmegal7@gmail.com)

Горно-Алтайский государственный университет, г. Горно-Алтайск

Аннотация. Важной особенностью регионов России является характер пространственно-временного распределения снежного покрова. В работе рассмотрены проблемы распределения снежного покрова на примере бассейна малой реки р. Майма – правого притока р. Катунь. Приведены результаты снегомерной съёмки и расчетов по характеру снежного покрова.

Ключевые слова: снежный покров, распределение снега, бассейн малой реки, Республика Алтай.

Оценка снежного покрова занимает особое место в ряде проблем, встающих при плановом освоении территорий, развитии экономики и строительства. Из всех параметров, характеризующих снежный покров, наиболее информативной характеристикой является высота снежного покрова. К тому же эту информацию можно получать с наименьшими материальными и физическими затратами.

Географические исследования снежного покрова осуществляются с целью получения информации о его пространственном распределении, динамике накопления, продолжительности залегания, условиях снеготаяния, влагосодержании и многих других свойствах. Данные наблюдений могут применяться при решении различных задач: изучения климатического и гидрологического режимов территории, составлении агрометеорологических и гидрологических прогнозов, оценке изменений природной среды (в том числе климатических колебаний) и др. [5].

В Западной Сибири первый снег появляется на севере в сентябре, а ко второй декаде октября почти на всей территории региона. Устойчивый снежный покров на побережье Карского моря образуется в начале октября, в центральной части – в третьей декаде октября и в южной – в начале ноября. Процесс весеннего снеготаяния и разрушения устойчивого снежного покрова начинается в апреле и завершается окончательно в южных степных районах в конце апреля, в лесной зоне – в конце мая, в северных районах – в середине июня. Но в зависимости от характера зимних условий, эти сроки могут сдвигаться на две недели или даже на месяц.

Алтай самая юго-восточная часть Западной Сибири. Основные закономерности распределения снежного покрова в горах Алтая идентичны всей территории Западной Сибири, а также совпадают с особенностями распределения снега в горных странах. В высокогорных районах Алтая снег сохраняется большую часть года, а снежники сохраняются в течение всего лета, как на Алтае, так и в других горных регионах Сибири, например, в горах Кузнецкого Алатау. Число дней со снежным покровом на севере составляет около 250 дней, уменьшаясь до 160–140 в степных районах [9]. На север Алтай граничит с равнинами Западной Сибири, на юге горные сооружения Российского Алтая продолжают структурами Монгольского Алтая. Поэтому условия распределения снежного покрова в разных областях Алтая весьма значительно различаются. Также весьма различна и плотность населения и, соответственно, характер хозяйственной деятельности, что актуализирует исследование распределения снега на склонах бор-

тов долины реки, где располагается единственный город Республики Алтай – р. Майма.

Цель исследования – изучение основных характеристик и пространственной дифференциации снежного покрова в бассейне р. Майма в период максимального снегонакопления 2016/17 и 2017/18 гг.

Объекты и методы исследования

Преимущественно низкогорный бассейн р. Майма (диапазон высот 260–1460 м, площадь 776,5 км²) расположен в пределах Северной Алтайской (69,6 %) и Северо-Восточной Алтайской (30,4 %) физико-географических провинций Алтайской горной области [1; 3]. Бассейн относительно неплохо обеспечен гидрометеорологической информацией. Имеется замыкающий створ (гидропост в с. Майма) и одна длительно функционирующая метеостанция – ГМС Кызыл-Озёк, которые расположены в нижней части бассейна. По данным ГМС Кызыл-Озёк среднегодовая температура воздуха составляет +1,0 °С, годовая сумма осадков – 795 мм. Продолжительность периода со среднесуточной температурой ниже 0 °С 170 дней. Устойчивый снежный покров образуется в первую декаду ноября. Сход снежного покрова происходит в третьей декаде марта, реже – в первой декаде апреля. Важно отметить, что анализ ряда данных по высоте снежного покрова за весь период наблюдений показал, что до 1966 г. максимум снегонакопления приходился на вторую, реже – первую декаду марта. В период с 1966 по 2015 г. наблюдается смещение периода максимального снегонакопления на первую декаду марта, реже – третью декаду февраля [6]. Особенностью рассматриваемого бассейна является преобладание склонов теневых (северная, северо-восточная, северо-западная) экспозиций (40,5 %). Примерно по 30 % занимают склоны световых (южной, юго-западной, юго-восточной) и переходных (восточной и западной) экспозиций. Такое положение объясняется общим наклоном бассейна на северо-северо-запад, близким к этому направлению простиранием магистральной долины и ряда долин притоков. В целом для бассейна характерны покатые (4–10°) и пологие (10–20°) склоны, которые в сумме занимают 87,2 %. Плоские поверхности (0–4°), представленные как в долинах, так и на водоразделах, занимают 7,7 %. Значительно меньше склонов средней (20–30°) крутизны (4,9 %), еще меньше (0,2 %) крутых склонов (30–45°) [6]. Лесами, в том числе разреженными, покрыто немногим менее 70 % от общей площади бассейна. Петрофитные варианты степей и остепнённых лугов занимают около

4 %. Оставшаяся часть (почти 30 %) – различного рода антропогенные модификации ландшафтов: вторичные луга, луга с разреженным древостоем, пашня, лесопосадки, застроенные участки [4].

Исследования проводились ландшафтно-маршрутным методом в период максимального снегонакопления (середина марта) 2016/17 и 2017/18 гг. Места для замеров: начало населенного пункта Кызыл-Озек и конец населенного пункта Майма (гидропост). Было выполнено 12 замеров, по 4 с одного и другого берега реки Майма в начале Кызыл-Озека, а также по два возле гидропоста в с. Майма (рис. 1).



Рис. 1. Схематичное расположение крайних точек полевого изучения зимой 2016–2017 гг. и фото гидрологического поста на р. Майма (фото Н. А. Кочеевой)

Известно, что формирование снежного покрова находится в тесной зависимости от температурных условий. Изменение дат образования и разрушения снежного покрова связано с региональным потеплением. Все тенденции повышения температуры статистически значимы [2].

Зима 2016–2017 гг. была многоснежной. Устойчивый снежный покров установился по наблюдениям автора 18 октября. Однако зима 2016–2017 гг. была необычной в том, что установился снежный покров рано, но и продолжал расти в течение всей зимы. Этим обусловлен риск подтопления низинных территорий в случае активного таяния снега в бассейне р. Майма [7].

Первый снег в 2017–2018 гг. выпал 6 октября, но в дальнейшем снег выпадал и таял из-за положительной температуры. Окончательно снежный покров установился 20 ноября при устойчивой отрицательной температуре. В конце декабря в связи с аномально теплой температурой не характерной для нашей территории 2 дня были осадки в виде дождя в результате чего почва промокла, и в начале января 2018 г. были резкие заморозки в течение одной недели, что привели к промерзанию почвы. В результате этого явления погоды образовалась трещина у подножия г. Тугая (рис. 2).



Рис. 2. Фото трещин снежного наката и грунта у подножья горнолыжной трассы в г. Горно-Алтайске (Фото М. Чулунова, 12.01.2018)

По итогам замеров двух годов, была составлена таблица с помощью Microsoft Excel, а также сравнительная гистограмма (рис. 3), в которых заметно как кардинально отличается высота снега на одних и тех же местах промеров. Небольшие отличия в высоте только на наветренных подошвах склонов. Метелевый или ветровой перенос снега играет значительную роль в его локальном распределении. Снег

с наветренных склонов сносится в расположенные на склонах «подветренных» экспозиций вогнутые формы рельефа.

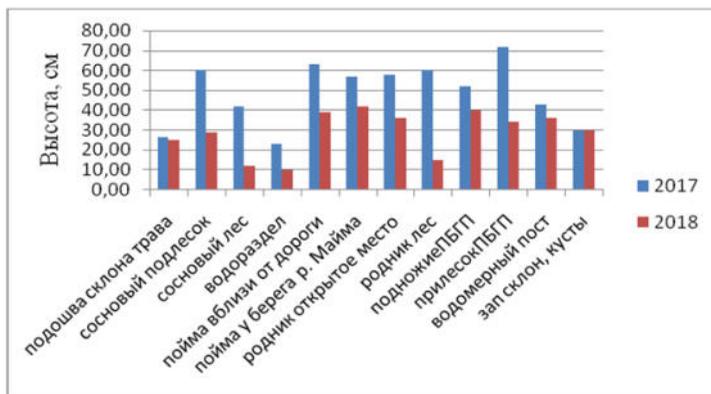


Рис. 3. Гистограмма сравнения высоты снежного покрова за 2 года

Таким образом, в бассейне р. Майма расположен единственный город – столица Республики Алтай г. Горно-Алтайск. Этим объясняется самая большая плотность населения. Наблюдения за распределением и изменениями в этом бассейне необходимы для предотвращения чрезвычайных ситуаций, связанных с таянием снега. Неравномерность распределения снега контролируется рельефом, температурой воздуха, ветрами, антропогенной деятельностью, облачностью и пр.

Список литературы

1. Атлас Алтайского края [Карта]. М. ; Барнаул, 1978. Т. 1. 226 с.
2. Оценочный доклад об изменении климата на территории Казахстана / Долгих С. А., Р. М. Илякова, П. Ж. Кожакметов, Л. И. Никифорова, Е. Е. Петрова. Астана, 2014. 55 с.
3. Золотов Д. В., Лубенец Л. Ф., Черных Д. В. Ландшафтные факторы формирования стока в бассейне реки Майма (Северный и Северо-Восточный Алтай) // Мир науки, культуры и образования. 2012. № 2 (33). С. 360–369.
4. Лубенец Л. Ф., Черных Д. В. Роль Антропогенных модификаций в ландшафтногидрологической организации бассейна р. Майма // Вестн. Волгогр. гос. ун-та. Сер. 11. Естеств. науки. 2015. № 1 (11). С. 61–67.
5. Рихтер Г. Д. Роль снежного покрова в физико-географическом процессе // Тр. Ин-та географии. М. ; Л., 1948. Вып. 40. 171 с.
6. Черных Д. В., Самойлова Г. С. Ландшафты Алтая (Алтайский край и Республика Алтай) [Карта]. Новосибирск, 2011.
7. Чулунов М. А., Параев М. Изучение формирования стока малых рек Республики Алтай, Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии России. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2018. С. 353–358.
8. Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации [Электронный ресурс] // Всерос. НИИ гидрометеорол. информ. : офиц. сайт. URL: <http://www.meteo.ru>.
9. <https://geographyofrussia.com/snezhnyj-pokrov>.

ОПАСНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ

УДК 556.512

Пространственная дифференциация максимальной водоносной способности речных систем бассейна озера Байкал

И. Ю. Амосова (irinaamosova_83@mail.ru)¹

Е. А. Ильичева (lenail3663@mail.ru)^{1,2}

¹ *Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск*

² *Иркутский государственный университет, г. Иркутск*

Аннотация. С целью выявления пространственных особенностей максимальной водоносной способности речных систем бассейна озера Байкал, был рассмотрен комплекс структурно-гидрографических характеристик и морфометрических параметров суббассейнов и водно-эрозионной сети. Показателем степени максимальной водоносной способности служит экстремально высокий сток как признак возникновения опасных гидрологических явлений. Выделение русловой сети осуществлялось по топографическим картам и цифровой модели рельефа.

Ключевые слова: речные системы, водоносная способность, экстремально высокий сток, опасные гидрологические явления, статическая модель, динамическая модель.

Введение

Сток воды, как процесс стекания воды, так и его количественная характеристика – один из важнейших физико-географических и геологических факторов, определяющий все другие виды перемещения вещества и энергии в речных системах (РС). В периоды недостаточного увлажнения, характерные для фазы летней межени, реки обычно имеют меньший сток, иногда могут и пересыхать. Настоящее исследование направлено на определение максимальной водоносной способности или максимально возможного стока, который может вместить водно-эрозионная сеть в периоды интенсивного и экстремального увлажнения и его пространственное распределение.

Водоносная способность речных систем рассматривается как величина среднего многолетнего стока, определяемая по устойчивой статической модели межennaleго стока, так и максимального (динамическая модель), и, как следствие возникновение опасных гидрологических явлений.

Информационной гидрологической основой являются средне-многолетние и максимальные наблюдаемые расходы воды в створах стандартной сети наблюдений.

В рисунке речной сети заложена информация о геологических, геоморфологических, гидрологических условиях возникновения и развития, как системы водотоков, так и территории их бассейна. Исследование строения речной сети становится актуальным для тех районов, где невозможно получить данные путем непосредственного наблюдения и включает комплекс параметров по речному бассейну с его русловой сетью с выявлением индикационных возможностей оценки максимального стока и, связанное с этими событиями потенциальное возникновение опасных гидрологических явлений.

Методы

Исследования максимальной водоносной способности заключаются в сопоставлении комплекса параметров автоматизированной обработки структуры водно-эрозионной сети с русловой сетью, полученной по топографическим картам.

Все параметры речных систем и их бассейнов разделены на три класса: простейшие, структурные и экспозиционные. Каждый класс включает несколько групп, а группы в свою очередь, делятся на основные по бассейну и водно-эрозионной сети [3].

Группа ориентационных характеристик (экспозиционно-симметричный класс) определяет увлажненность территории относительно главного направления влагопереноса [1].

Простейший класс характеристик включает в себя морфометрические параметры бассейна. Этот класс объединяет группы:

- 1) элементарных характеристик (площадь бассейна, суммарная длина водно-эрозионной сети);
- 2) высотных характеристик (средняя и максимальная высота водосбора, средний уклон водосбора и водной поверхности, глубина эрозионного вреза речного русла).

Характеристики структурного класса предусматривают исследование закономерностей строения речных систем. К структурному классу относятся группы:

1) составных характеристик (графическая характеристика – граф речной сети, разбиение системы на порядки по схемам порядковой бонитировки Хортон-Стралера [4; 7], Шрива [6] и Шайдеггера [5], коэффициент бифуркации);

2) удельных характеристик (частота потока, коэффициент водно-эрозионного расчленении рельефа, гидроморфологический коэффициент);

3) системно-структурных характеристик (суммарная энтропия и структурный модуль для устойчивого среднего многолетнего и максимально наблюдаемого стока).

Удельные характеристики речных систем, опираясь на составные параметры РС и простейшие характеристики, отражают закономерности условий формирования стока.

За основу пространственного распределения максимальной водоносной способности речных систем была принята локальная зависимость средней водоносности бассейна оз. Байкал от энтропии РС (структурный модуль) [2]. Такая зависимость отражает условия прекращающегося меженного стока.

Результаты

Различия в морфометрических и структурно-гидрографических характеристиках дает представление о порядке рассматриваемых величин в исследуемых бассейнах, что в свою очередь определяет контрастность и мозаичность распределения стока в речных системах.

Исследование проведено для речных систем бассейна оз. Байкал на российской его части. Информационной гидрологической основой являются среднеголетние и максимальные наблюдаемые расходы воды в створах стандартной сети наблюдений. Расчеты проведены по 96 створам, из них 52 находятся в бассейне р. Селенги.

Распределение средних и максимальных высот суббассейнов подчиняется общим значениям абсолютных отметок высот систем хребтов. Не менее важной характеристикой формирования стока являются уклоны водосбора и водной поверхности. В силу того, что бассейн оз. Байкал является горной страной, то и уклоны и водосбора, и водной поверхности довольно высоки.

Суммарная длина водно-эрозионной сети определялась как совокупность длин постоянно действующих рек и временных водотоков с учетом оврагов, логов и балок и других звеньев эрозионной сети, длиной от 75 м.

При комплексном рассмотрении всех параметров речных систем, на общем фоне рельефа поверхности бассейнов, выделяются следующие

щие области, объединяющие речные системы: речные системы Приморского хребта, Байкальского хребта, речные системы котловинного типа, реки, дренирующие северо-западные склоны хребтов Хамар-Дабан и Улан-Бургасы, западные склоны Баргузинского хребта и отдельную область составляют речные системы бассейна р. Селенги в пределах РФ. Бассейн р. Селенги рассматривается как отдельный объект по причине значительной площади водосбора и, как следствие, полизональности физико-географических условий стокоформирования.

Пространственная дифференциация водоносной способности речных систем бассейна оз. Байкал (табл. 1) весьма сложная и определяется совокупностью морфометрических и структурно-гидрографических характеристик бассейна и русловой сети, а также согласуется с общим распределением осадков по территории.

Таблица 1
Пространственная дифференциация максимальной водоносной способности речных систем бассейна оз. Байкал

	Осадки (в среднем по территории), мм			
	300	475	613	300
	Максимальная водоносная способность, м ³ /с			
	<1000	1000–1500	1500–5000	>5000
РС	Приморский хребет	Баргузинский хребет	Котловинного типа	бассейн р. Селенги
		Байкальский хребет	хр. Хамар-Дабан	
		хр. Улан-Бургасы		

Несомненно, наибольшей водоносной способностью обладают речные системы суббассейна р. Селенги за счет значительной площади суббассейна (занимает 80 % водосборной площади оз. Байкал). Также большей величиной водоносной способности отличаются РС котловинного типа (реки Верхняя Ангара и Баргузин) и первичных наветренных северо-западных склонов хр. Хамар-Дабан. Наименьшую водоносную способность (до 1000 м³/с) имеют РС первичных подветренных склонов Приморского хребта. От 1000 до 1500 м³/с стока сформируют РС, дренирующие вторичные наветренные склоны (Баргузинский хребет и хр. Улан-Бургасы) и юго-восточные склоны Байкальского хребта.

Выводы

Большая густота водно-эрозионной сети, что подтверждается коэффициентом эрозионного расчленения и частотой потока, и значи-

тельные уклоны поверхности бассейна и тальвегов, благоприятствуют интенсивному формированию и стеканию водных масс на водосборе.

Ограниченность наблюдений за осадками, а в некоторых районах и полное их отсутствие, не позволяет дать более полную характеристику их распределения и построить абсолютную зависимость со стоком. В отдельных случаях, осадки, вызванные затяжными дождями, превышают месячную, а в ряде случаев и среднюю сезонную нормы. Поэтому максимальная водоносная способность рассматривается как максимально возможный (экстремальный) сток, который может транспортировать водно-эрозионная сеть в периоды интенсивного и экстремального увлажнения, в зависимости от строения водосборного бассейна и водно-эрозионной сети.

Исследования проводятся при финансовой поддержке гранта РФФИ 17-29-05052 офи_м «Экзоморфолитогенез устьев Байкальских притоков на современном этапе гидроклиматического цикла: моделирование и прогноз».

Список литературы

1. *Афанасьев А. Н.* Водные ресурсы и водный баланс бассейна озера Байкал. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1976. 238 с.
2. *Ильичева Е. А.* Закономерности строения речных систем юга Восточной Сибири и использование при расчетах и картографировании водных ресурсов : автореф. ... канд. геогр. наук. Иркутск, 2001. 162 с.
3. *Корытный Л. М.* Морфометрические характеристики речного бассейна // География и природ. ресурсы. 1984. № 3. С. 105–112.
4. *Хортон Р.* Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. Гидрофизический подход к количественной морфологии. М. : Гос. изд-во иностр. лит., 1948. 158 с.
5. *Strahler A. N.* Hypsometric (area – altitude) analysis of erosional topography // Geol. Soc. Amer. Bull. 1952. Vol. 63. P. 1117–1142.
6. *Schreive R. L.* Infinite topologically random channel networks // Y. Geol. 1967. Vol. 75, N 2. P. 178–186.
7. *Scheidegger A. E.* On the topology of river nets // Water. Res. Res. Vol. 3, N 1. P. 3–6.

УДК 551.50: 551.581 (571.53)

Индекс пожароопасности

А. В. Аргучинцева (arg@math.isu.ru)

Л. В. Голубева (TaTuN0203@yandex.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Приведены различные подходы к определению индексов пожароопасности: отмечены положительные стороны и недостатки. По мнению авторов статьи, индекс пожароопасности должен быть безразмерным, а потому предложена его модификация в безразмерном виде. Проведён расчёт индекса пожароопасности по Иркутской области. Дано сравнение с индексом Нестерова.

Ключевые слова: лесной пожар, индексы пожароопасности, точка росы, метеорологические условия.

Введение

Лесной пожар – это неконтролируемое горение растительности с быстрым и стихийным распространением. Проблема лесных пожаров является актуальной во всем мире, подтверждением тому – Конференция 2003 г. ООН по изменению климата, на которой одной из мер по сокращению выбросов диоксида углерода было предложено реформирование охраны леса и усовершенствование системы лесного хозяйства. В связи с этим необходимо, используя современные научные методы и решения, добиться максимально эффективной организации мероприятий по предотвращению лесных пожаров. С этой целью следует изучить весь спектр обстоятельств, способствующих возникновению лесных пожаров, и в первую очередь, метеорологические факторы [2].

Пожары приводят: к температурным аномалиям и гибели людей; изменениям циркуляционных и гидрологических процессов, которые могут заметно повлиять на увеличение количества и площади возгорания; уничтожению животных, растительности, населённых пунктов, промышленных предприятий, естественного и культурного наследия, лесного фонда; выводу из строя линий электропередач и коммуникационных связей; изменению состава атмосферного воздуха и пр.

В Иркутской области (площадью $7,68 \cdot 10^5$ км²) территория лесов составляет $6,68 \cdot 10^5$ км², т. е. почти 87 %. На территории России ежегодно возникают до 30 тыс. лесных пожаров, из которых на Иркутскую область приходится иногда до 10 тыс. (площадью около 5 тыс. км²) [1].

Лесной пожар – многофакторное явление: сухой подстил, подсохшие эпигейные лишайники, мхи, деревья и пр., но основная причина, конечно, в любой искре. Метеорологические факторы способны лишь заметно повлиять на распространение пожаров. Поэтому в мире предпринимаются различные попытки оценки влияния метеорологических условий на пожароопасность.

Дискуссия

В настоящее время на территории России используют индекс В. Г. Нестерова, который был предложен для оценки потенциала пожароопасности лесов. Согласно [4], индекс рассчитывается по формуле:

$$G = \sum_{i=1}^n T_i (T_i - \tau_i)_i, \quad (1)$$

где T_i и τ_i – соответственно температура воздуха и точка росы в °С на 12 час местного времени i -го дня; n – число дней после последнего дождя. Суммирование начинается в первый сухой день после дождя и продолжается до дня с выпадением осадков в 2,5 мм и более за сутки. В настоящее время, согласно ГОСТ Р 22.1.09-99.2000, индекс Нестерова – комплексный показатель пожароопасности (КПО) рассчитывается до дня с осадками не менее 3 мм в сутки. Размерность КПО °С².

Индекс Нестерова подвергается различным модификациям. Так в работе [5] предложен модифицированный индекс, который основан не только с условиями погоды, но и с учетом поясов атмосферной засушливости и сезонов года. Метод оценки состояния пожарной безопасности в лесах по условиям погоды предусматривает расчет комплексного показателя (КП), по значениям которого определяется класс пожарной опасности в лесах. В данном модифицированном индексе также есть ряд недостатков, один из основных – это необоснованная размерность. Положительным моментом данного метода является попытка дополнить расчёт индекса учетом скорости ветра добавочным коэффициентом.

В работе [6] предложен достаточно простой вид поправки к выпавшим атмосферным осадкам. Вводимый показатель не устраняет и в достаточной мере не усовершенствует индекс пожароопасности предложенный В. Г. Нестеровым. Поэтому приводимые показатели могут исказить или оказаться недостаточно точными в определении пожарной опасности

Лесные службы США при расчете пожарной опасности используют модель, объединяющую промежуточные и основные группы выходных параметров. К промежуточным относят индексы влагосодержания лесных горючих материалов ЛГМ [8].

В Канаде основой рейтинговой системы лесной пожарной опасности служит расчет влагосодержания ЛГМ, зависящий от метеорологических условий. ЛГМ различаются по глубине залегания и весу на единицу площади [7].

Предлагаемая методика исследования

В России возможная пожароопасность [3] ориентируется на показатели табл. 1, рассчитанные по формуле (1).

Таблица 1

Общероссийская шкала пожарной опасности по условиям погоды

КПО	Класс пожарной опасности по условиям погоды	Степень пожарной опасности
<300	I	Нет опасности
301–1000	II	Малая
1001–4000	III	Низкая
4001–10 000	IV	Высокая
>10 000	V	Чрезвычайная

В отдельных регионах или районах шкала может отличаться в связи с местными особенностями.

Индекс пожарной опасности Нестерова имеет размерность $^{\circ}\text{C}^2$, что физически необоснованно и бессмысленно. Естественное стремление потребовать, чтобы индекс был, во-первых, безразмерным, а, во-вторых, иметь возможность сравнивать его с единицей, а не с величинами порядков 10^2 – 10^4 (см. табл. 1).

Авторами статьи предлагается формула безразмерного индекса пожарной опасности (ИПО):

$$\text{ИПО} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{T_{\max_i} - \tau_i}{R_i}, \quad (2)$$

где n и τ_i – то же, что и в (1), $R_i = T_{\max} - T_{\min}$ – размах между максимальной и минимальной температурами i -го дня.

Материалы и расчёты

Использованы метеорологические показатели 45 метеорологических станций Иркутской области за современный период наблюдений с 2009 по 2018 г. Для сравнения расчёты проведены по формулам (1) и (2). Фрагмент результатов расчётов представлен на рисунке.

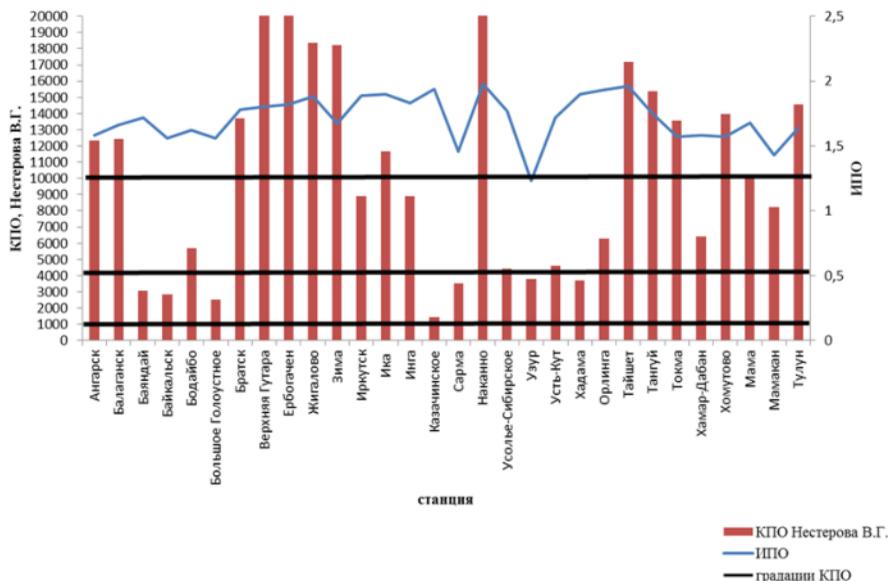


Рис. Сравнительный анализ комплексных показателей пожарной опасности: по Нестерову КПО) и авторской методике (ИПО)

Как видим, имеется неплохое согласование. Согласно КПО, из 30 приведённых пунктов 50 % имеют чрезвычайную пожароопасность (см. табл. 1). Это позволило предварительно предложить авторскую шкалу (табл. 2).

Таблица 2

Шкала ИПО

ИПО	Класс пожарной опасности по метеорологическим условиям	Степень пожарной опасности
<1	1	Низкая
1–1,5	2	Средняя
>1,5	3	Высокая

Выводы

Предложенный индекс пожароопасности (ИПО) позволил:

1. Перейти к безразмерной характеристике оценки степени опасности возгорания.
2. Построить новую шкалу риска возникновения лесных пожаров в зависимости от метеорологических условий.
3. Оценить дефицит влажности по отношению к амплитуде температур.

Список литературы

1. Иллюстрированный атлас России. М. : Дайджест, 2005. 352 с.
2. Барановский Н. В. Модель прогноза и мониторинга лесной пожарной опасности // Экология и промышленность России. 2008. № 9. С. 59–61.
3. Кац А. Л., Гусев В. Л., Шабунина Т. А. Методические указания по прогнозированию пожарной опасности в лесах по условиям погоды. М. : Гидрометеоздат, 1975. 16 с.
4. Нестеров В. Г. Горимость леса и методы ее определения. М. : Гослесбумага, 1949. 76 с.
5. Сверлова Л. И. Метод оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды с учетом поясов атмосферной засушливости и сезонов года. Хабаровск : ДВ УГМС, 2000. 46 с.
6. Шешуков М. А., Громыко С. А., Шведов А. Г. К оценке комплексного показателя пожарной опасности в лесу по условиям погоды // Охрана лесов от пожаров в современных условиях. Хабаровск : Изд. КПБ, 2002. С. 122–126.
7. Dowdy A. J., Mills G. A., Finkele K., de Groot W. Australian fire weather as represented by the McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire Weather Index / A. J. Dowdy, G. A. Mills, K. Finkele, W. de Groot // CAWCR Technical Report, 2009. N 10. 91 p.
8. Wotton M. B. Interpreting and using outputs from the Canadian Forest Fire Danger Rating System in research applications, Springer Science + Business Media, LLC, 2008. 25 p.

УДК 556.5

Обзор потенциально прорывоопасных озёр и последствия прохождения их паводков в районах холмов Тала и Ларсеманн (Восточная Антарктида)

А. С. Боронина (al.b.s@yandex.ru)¹

А. А. Четверова (a.chetverova@gmail.com)^{1,3}

С. В. Попов (sporov@yandex.ru)^{2,1}

Г. В. Пряхина (g65@mail.ru)¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

² Полярная морская геологоразведочная экспедиция, г. Санкт-Петербург

³ Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Представлены исторические и современные данные и описания прорывов наледниковых и подрпудных озёр, расположенных в непосредственной близости от российской антарктической полевой базы Молодёжная, белорусской антарктической полевой базы Гора Вечерняя (холмы Тала) и российской антарктической станции Прогресс (холмы Ларсеманн). Описания нестабильности водных объектов основаны на обобщении изданных и неопубликованных материалов, таких как: фондовые материалы Федерального государственного бюджетного учреждения Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (г. Санкт-Петербург), научно-технических отчётах Советской антарктической экспедиции (сейчас Российская антарктическая экспедиция), информационных бюллетенях САЭ. Кроме того, представлены результаты наблюдений собственных полевых исследований, выполненных в 2017–2019 гг. в районах холмов Тала и Ларсеманн. Основной предпосылкой к обобщению данных послужил

тот факт, что прорывы озёр наносят значительный ущерб объектам инфраструктуры и логистическим операциям Российской антарктической экспедиции.

Ключевые слова: Восточная Антарктида, холмы Тала, холмы Ларсеманн, озёра антарктических оазисов, прорывные паводки.

Введение

Согласно современным представлениям, Антарктида перекрыта ледником более чем на 95 % [12]. Немногочисленные свободные участки отводятся под нунатаки, одинокими вершинами, возвышающимися над ледником, и оазисы, сравнительно пологие участки обнажений, занимающие территорию от нескольких десятков до нескольких тысяч квадратных километров. Всего в Антарктиде насчитывается 24 оазиса [7], однако, несмотря на свои относительно малые размеры, именно они всегда привлекали исследователей различных научных направлений. В силу удобства в плане логистического обеспечения и капитального строительства основная часть прибрежных станций, полевых баз и лагерей располагается именно в этих районах, что является дополнительным поводом и мотивацией для детального изучения природных процессов, присущих этим территориям.

Характерной особенностью оазисов является довольно развитая гидрографическая сеть, включающая в себя водоёмы, а также постоянные и временные водотоки. Именно по этой причине первое название, которое дали немецкие исследователи участкам свободным от льда, звучало как *Seenplatte*, что в переводе означает «озёрное плато» [7]. Таким образом, водоёмы являются характерными элементами ландшафта антарктических оазисов и прилегающих частей ледниковых покровов, а по генезису озёрных котловин подразделяются на тектонико-экзарационные, экзарационные, подпрудные, лагунные и наледниковые [6]. Водные объекты каждого из перечисленных типов обладают особым, характерным только для него, гидрологическим режимом. Однако с позиций обеспечения безопасности наиболее актуальными для изучения являются подпрудные и наледниковые озёра, т. е. те, которые имеют особенность периодически прорываться.

Первые упоминания о прорывных паводках на территориях антарктических оазисов упомянуты в фондовых материалах Федерального государственного бюджетного учреждения Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (г. Санкт-Петербург), научно-технических отчётах Советской антарктической экспедиции (сейчас Российская антарктическая экспедиция), инфор-

мационных бюллетенях САЭ, хотя носят разрозненный характер. Насколько известно авторам, обобщений в виде описаний исторических и современных прорывов озёр, а также типизации их по характерным особенностям и генезису отсутствуют. Поскольку прорывные паводки всегда наносили и продолжают наносить значительный ущерб объектам инфраструктуры, предлагаемая работа является первым шагом к обобщению потенциально прорывоопасных водных объектов, расположенных в непосредственной близости от российских и зарубежных станций и полевых баз. Ввиду ограниченного объёма публикации, предлагается уделить повышенное внимание районам Земли Эндерби и холмов Ларсеманн в силу того, что именно здесь осуществляются основные, наиболее значимые, логистические операции РАЭ.

Земля Эндерби (район полевых баз Молодёжная и Гора Вечерняя)

В западной прибрежной зоне Земли Эндерби (Enderby Land) имеются многочисленные небольшие области суши, свободные от ледяного покрова. На одном из таких участков, относящихся к холмам Тала, в феврале 1962 г. был открыт Антарктический метеорологический центр (АМЦ) Молодёжная (ныне полевая база) Молодёжная. Небольшие хребты этого района разделены долинами, частично занятыми неподвижным льдом и озёрными котловинами. Наиболее крупными и глубокими водоёмами холмов Тала являются озёра Глубокое и Лагерное (рис. 1, *a, б*), которые по причине их формирования и преобладающего типа питания относятся к категории прорывоопасных. К одному из первых задокументированных прорывных паводков в районе АМЦ Молодёжная можно отнести резкое падение уровня на озере Лагерном. Поскольку его основным источником питания являются талые воды снежников и ледника, относительно тёплая погода в период антарктического лета отрицательно влияет на стабильность водоёмов. При установившихся положительных температурах сезонный снег начинает интенсивно таять, образуя водные потоки, стремительно наполняющие озёрную котловину. В отдельные годы стекавшая вода разливается по льду и образует новый водоём с ледяным дном аналогично обширной снежнице. Сформировавшаяся наледь в последующем служила в качестве естественной запруды вод озера Лагерное. Критическое значение уровня достигнуто 18 декабря 1963 г. в результате чего вода начала переливаться через ледяную плотину. На момент прорыва глубина озера составляла 10 м, однако уже через три

дня его величина упала до 3 м. В результате прохождения прорывного паводка в запрудной плотине образовался тоннель, напоминающий ледяное ущелье [3]. Руководством АМЦ Молодёжная было решено создать сливной канал между озёрами Лагерное и Глубокое, чтобы обеспечить бесперебойный отток излишней воды и предотвратить наполнение водоёма до критического уровня. Работы были выполнены, однако, на настоящий момент расчистка канала от сезонного снега не осуществляется и прорывы продолжаются.

Позднее остатки подобных тоннелей в снежно-ледовых перемычках были выявлены и на водосборной территории озера Глубокое. Основываясь на этом факте, было установлено, что прорывы плотин не редки в данном регионе. Подобные события происходили на вышеупомянутом водоёме в феврале 1962 г. и в июле 1966 г, однако не были столь масштабны [9]. Тем не менее, буквально через семь лет после открытия оборудованная на тот момент новейшими средствами научных исследований станция понесла значительный ущерб, ввиду прорыва вод озера Глубокое. Катастрофическое переполнение водоёма произошло 18 января 1969 г., что вызвало значительные изменения в ландшафте оазиса. В связи со случившимся событием в том же году были организованы гидрологические наблюдения, основная цель которых заключалась в изучении водного, ледового и термического режима водоёмов, а также в составлении прогноза последующих прорывов [9]. За многолетний период, начиная с 1969 г. и по настоящее время, прорывы озера Глубокое фиксируются один раз в 7–10 лет. При этом уровень озера в среднем понижается на величину около 6 м за 2–3 суток [14]. Опираясь на наблюдениях сотрудников зимовочного состава станции Молодёжная и научных сезонных отрядов, можно заключить, что последующие прорывы происходили в 1988, 1997 и 2006 гг. Исследуя картографические материалы, также можно заметить, что на ранних схемах, в непосредственной близости от озера Глубокое, водные объекты отсутствуют. На других, более поздних снимках и картах (рис. 1, а, б), рядом с ним появляется либо зона затопления, либо обособленное озеро Разливное, а на отдельных указанных водоёмы представлялись в виде единого водного объекта [1; 8]. Последний вариант можно расценивать в качестве маркера к скорому прорыву озёрных вод. Подтверждение выдвинутого предположения не заставило себя долго ждать. В конце января 2018 г. произошёл прорыв водных масс предположительно уже из системы озёр Разливное – Глубокое. Согласно оперативной сводке об основных экспедиционных событиях и операциях Российской антарктической экспе-

диции (РАЭ) за период с 18 по 25 января 2018 г., опорожнение водоёмов началось утром 19 января и продолжалось вплоть до 23 января. Мощным потоком, ширина которого составляла около 10 м, было снесено несколько железных опор эстакады. На следующий год, во время летнего полевого сезона 64-ой РАЭ, было выполнено первое рекогносцировочное обследование последствий прохождения прорывного паводка. В результате случившегося прорыва озеро Разливное вновь перестало существовать. На момент выполнения работ (декабрь 2018 г.) котловина бывшего водоёма была заполнена сезонным снегом. Уровень озера Глубокое, соответственно, тоже понизился. На момент исследования его абсолютная высота составляла 15,5 м над уровнем моря. Примерное положение уровня высоких вод было установлено по поверхности озёрного льда, покрывающего акваторию водоёма до прорыва. Его высота оценена величиной около 25 м. Однако, предполагается, что уровень воды в озере на момент прорыва в январе 2018 г. не достигал отметки 25 м.

К ещё одной прорывоопасной системе водных объектов АМЦ Молодёжная относятся озеро Стоковое и несколько маленьких водоёмов, расположенных ниже по склону (рис. 3, в). Последовательное разрушение снежных перемычек происходит, как правило, в период антарктического лета, в результате чего на пути от озёр до бухты Опасной образуется ручей «Авиационный» [А. Долгих, частотное сообщение]. Водоток постепенно прорезает себе русло в снежно-ледовой толще и на время выводит из функционирования взлётно-посадочную полосу для самолётов на лыжном шасси.

Также, говоря о Земле Эндерби, нельзя не упомянуть о так называемом оазисе Вечерний, который расположен вблизи от полевой базы Молодёжная. Возобновление интереса к этом району связано со строительством Белорусской антарктической экспедицией полевой базы Гора Вечерняя, которая в скором времени станет полноценной зимовочной станцией. В некоторой близости от новых строений располагаются два небольших водоёма – Верхнее и Нижнее. Согласно информации сотрудников Белорусской антарктической экспедиции, первое из озёр неглубокое (до 2 м) и довольно часто опорожняется [Ю. Г. Гигиняк, частное сообщение]. Озеро Нижнее имеет большие размеры, глубину порядка 5–6 м, а его потенциальные прорывы могут значительно повлиять на инфраструктуру новой полевой базы, учитывая тот факт, что именно из этого водоёма осуществляется водозабор воды для хозяйственно-питьевого обеспечения п/б.

Подводя итог, хочется отметить, что большинство озёр холмов Тала и оазиса Вечерний гидравлически связаны между собой и являются динамичной системой. Прорывы водных объектов происходят, как правило, через снежники, либо наледи, с образованием тоннелей, напоминающих глубокие ущелья, или поверхностных временных неглубоких водотоков, перемещающихся в ледяном русле. Сбросы озёрных вод случаются в основном во второй половине января. Несомненно, после опорожнения озёр опасность новых прорывов значительно снижается, однако, судя по тенденции за последние полвека, исключать повторение опасных гидрологических явлений нельзя.

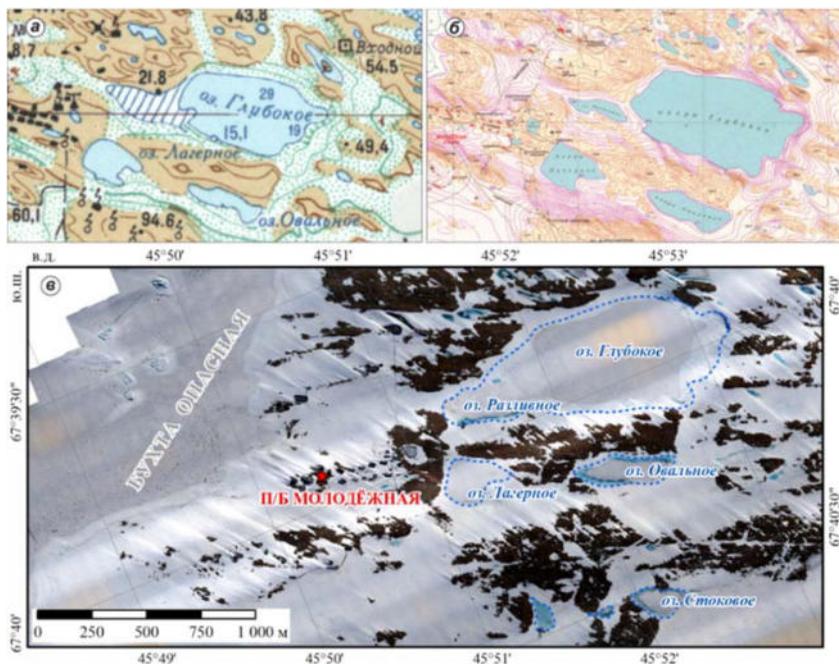


Рис. 1. Район АМЦ Молодёжная (а) на топографической карте 1972 г. в масштабе 1:50 000; (б) в Атласе океанов, 2005 г. в масштабе 1:10 000, (в) на ортофотоснимке Д. В. Фёдорова, январь 2017 г.

Холмы Ларсеманн (район станции Прогресс)

Оазис Ларсеманн (Larsemann Hills) располагается между холмами Вестфоль (Vestfold Hills) и шельфовым ледником Эймери (Amery Ice Shelf) на юго-восточном берегу залива Прудс (Prydz Bay), Земля Принцессы Елизаветы (Princess Elizabeth Land). Он представляет со-

бой район, большей частью свободный от ледникового покрова и состоящий из множества мелких и двух наиболее крупных полуостровов Сторнес (Stornes) и Брокнес (Broknes). Общая площадь озиса оценивается величиной около 50 км². Ввиду активного развития инфраструктуры, на территории полуострова Брокнес предлагаемый обзор будет посвящён описанию опасных гидрологических явлений именно на его территории (рис. 2).

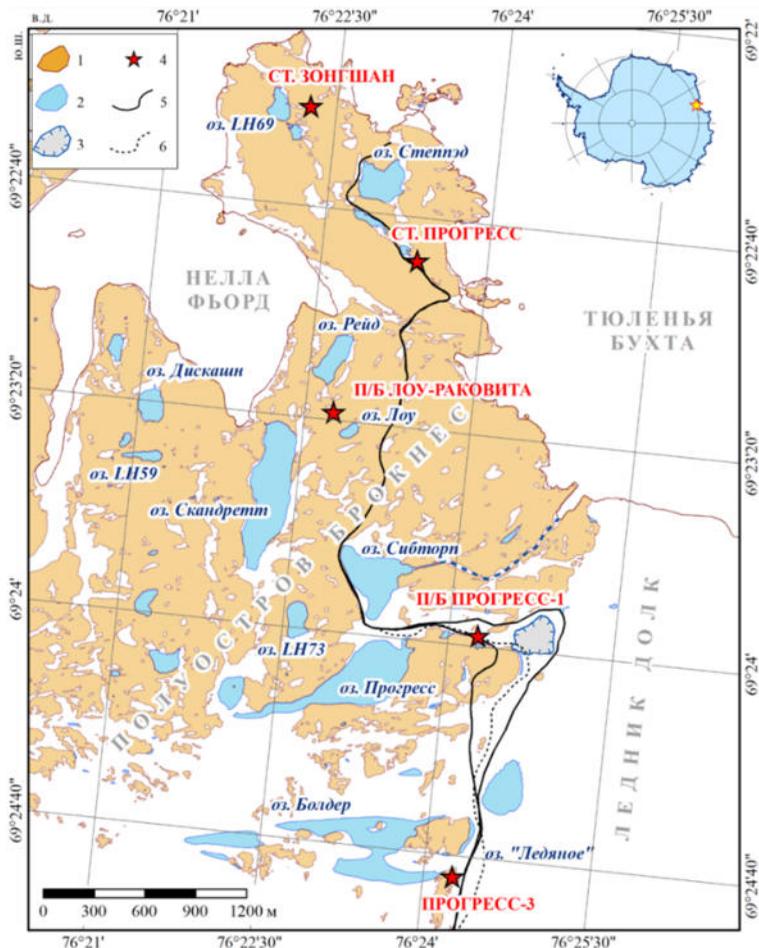


Рис. 2. Район полуострова Брокнес (холмы Ларсеманн):

1 – выходы горных пород; 2 – озёра; 3 – провал в леднике Долк; 4 – отечественные и зарубежные станции и полевые базы; 5 – используемые трассы; 6 – участок дороги, разрушенной провалом. Синей пунктирной линией отображён временный ручей Каньонный из озера Сибторп

Ландшафт оазиса представляет собой цепь холмов абсолютной высотой от 60 м до 162 м относительно уровня моря. Рельеф сильно расчленён; перепад высот порой достигает сотни метров при значительных уклонах. Как и в предыдущем случае, характерная особенность холмов Ларсеманн заключается в обилии озёр, что объясняется наличием молодого экзарационно структурного рельефа и неразвитой дренажной сетью [13]. Большинство водоёмов полуострова Брокнес мелководны (глубина до 5 м) и характеризуются небольшой площадью водной поверхности (от 5 до 30 тыс. км²). Ближайшими к станции являются озера Прогресс, Болдер, Скандретт, Сибторп, Степед, Рейд, Дискашн, LH73 и LH69 (рис. 2). Первые три оцениваются как самые глубокие на полуострове (45 м, 46 м, и 18 м, соответственно).

Также на территории оазиса имеется множество снежников и малых ледников. Первые имеют сезонный характер и постепенно исчезают или значительно меняют свои очертания в течение антарктического лета. Их мощность незначительна и обычно не превышает первых десятков метров. К юго-востоку от полуострова располагается выводной ледник Долк (Dålk Glacier). Часть водных объектов образовалась в результате подпруживания тектонических долинных понижений ледниками и снежниками [6]. По этой причине на озёрах оазиса периодически происходят резкие падения уровня воды.

В техническом отчёте [10] отмечается, что озера Прогресс и Сибторп связаны между собой и образуют единую гидрологическую систему. Талая вода с ледника и окружающих снежников сначала поступает в озеро Прогресс, а затем под уклоном перетекает в озеро Сибторп. Последнее, через ручей Каньонный, разгружается в Тюленью бухту (рис. 2). Порой, подобные перетекания носят катастрофический характер. Так, например, в ходе зимовки 48-й РАЭ, 10 ноября 2003 г. из-за разрушения снежно-ледовой перемычки произошёл прорыв вод из озера Прогресс в озеро Сибторп, в результате чего в снежнике, расположенном между водоёмами, образовались провалы глубиной до 8 м и протяжённостью до 100 м [10].

Причины, вызвавшие резкий сброс воды и образование провалов, по всей вероятности, следующие. Рядом с системой озёр Прогресс-Сибторп имеется озеро LH73, уровень которого располагается примерно на 50–60 м выше уровня озера Прогресс. С южной стороны водоёма в течение всего года имеется снежно-ледовая плотина. В случае переполнения котловины водой, напряжение, оказываемое на перемычку, возрастает и происходит прорыв. В результате залпового сброса поток устремляется к озеру Прогресс. Уровень воды в нем начинает

резко повышаться. Это приводит к тому, что давление на снежник постепенно увеличивается и достигает той величины, при которой перемишка не выдерживает нагрузки и разрушается. После этого вода из озера Прогресс перетекает в озеро Сибторп откуда впоследствии разгружается в залив Прюдс. Вероятно, весной 2003 г. были разрушены сразу обе плотины. Это привело к образованию глубоких провалов в снежнике между названными озёрами. Ввиду того, что до обрушения по снежнику проходила дорога, соединяющая станцию Прогресс и аэродром, это представляло опасность для транспортных операций РАЭ (рис. 2). Подобное событие повторилось в ходе летнего полевого сезона 59-й РАЭ, когда 1 января 2014 г. произошло резкое падение уровня воды в озере Прогресс за счёт разрушения ледяной перемишки. Сброс продолжался около полутора суток, а уменьшение уровня составило 0,72 м [4]. В сезон 62-й РАЭ залповый перелив воды из озера Прогресс в озеро Сибторп произошёл 4 января 2017 г. [4]. После этого в обоих водоёмах установился устойчивый водный режим, характеризующийся плавным понижением уровня за счёт поверхностного стока, испарения и потерь воды на ледообразование. Согласно оперативной сводке об основных экспедиционных событиях и операциях РАЭ за период с 22 февраля по 1 марта 2018 г., в конце февраля 2018 г. произошёл ещё один резкий сброс вод озера Прогресс. Поток воды достигал ширины 4 м и глубины до 1,5 м. Однако на следующий год в середине января 2019 г. случился прорыв не одного озера, а всей системы. Формирование прорывного потока со стороны озера Прогресс началось в приповерхностной части снежника, и уже на следующий день поток выработал русло, достигшее скального основания. Вновь прорывным потоком затронута часть трассы в районе п/б Прогресс-1. В результате уровень в озере Прогресс упал на 0,47 м, а амплитуда колебания уровня на оз. Сибторп составила 0,22 м. Измеренный расход прорывного паводка из первого озера составил 2 м³/с, а расход на ручье из озера Сибторп оценён величиной 2,64 м³/с.

Ещё одной гидрологической системой являются озёра Болдер, «Ледяное» и внутриледниковый водоём, находящийся у полевой базы Прогресс-1. Внутриледниковое озеро существовало вплоть до начала 2017 г., однако 30 января на его месте образовалась обширная депрессия [2; 5]. По мнению авторов, одной из основных причин образования провала является прорыв озера Болдер. Ход развития событий можно представить следующим образом. В результате поступления талых ледниковых вод в котловину озера Болдер происходило постепенное повышение уровня его водной поверхности. При достижении

некоторой критической отметки, в результате гидростатического давления, оказываемого на перемычку и термического расширения каналов стока, в наиболее слабом месте, сформировался прорыв. Бурный поток воды начал перетекать из озера в сторону полевой базы Прогресс-1. Ранее стабильный внутриледниковый водоём начал переполняться поступающим водным потоком. Аналогично предыдущему случаю, уровень воды возрастал в нём до тех пор, пока не было достигнуто критическое напряжение на ледовые стенки. Это, в свою очередь, вызвало прорыв внутриледникового водоёма и истечение по внутриледниковым каналам в сторону океана. Первая просадка ледника произошла 30 января 2017 г. Однако ввиду того, что сток из Болдер, а также из других близлежащих озёр, не имеющих наименований, не прекратился, 31 января провал увеличился до катастрофических размеров. Согласно первым предварительным оценкам, объём подледникового водоёма, существовавшего до прорыва, составлял около 708,7 тыс. м³ при средней глубине около 32 м. Расчёт различных сценариев прорыва более подробно представлен в работе [2].

Кроме того, в центральной части полуострова Брокнес, у западного берега Нелла Фьорд располагается система из относительно небольших водоёмов: озера LN59 и Дискашн. При анализе космических снимков [11; 15], а также во время проведения рекогносцировочного обследования в сезон 63-й РАЭ (2017/18 гг.) авторами были обнаружены следы его частых прорывов. Озеро Дискашн прорвалось 22 января 2018 г. Уровень водной поверхности понизился примерно на 0,95 м. При этом при прохождении паводка, потоком воды в снежнике выработался тоннель, увеличивающий свои размеры по мере удаления от места входа в него. Вся вода, пошедшая на его формирование, перетекла в Нелла Фьорд. В ходе рекогносцировочного обследования было установлено, что сток озёрных вод по указанному пути происходит довольно часто. На стенках тоннеля отчётливо прослеживаются метки высоких вод, оставленные при протекании потоков различной мощности. Максимальный расход прорыва 2018 г. оценён величиной 1,8 м³/с. Общее время прохождения прорывного паводка составляет около 10 часов.

Разрушение запрудных снежников на озёрах Скандретт и Рейд происходят практически ежегодно, однако это не приносит значительного ущерба, поскольку поток буквально сразу попадает в Нелла Фьорд.

Обобщая вышеизложенное, можно заключить, что гидрологические объекты полуострова Брокнес отличаются не только своими частыми прорывами, но и специфическими водоёмами, аналогичными

существовавшему внутриледниковому озеру. Подобные резкие опорожнения можно рассматривать в качестве аналогов прорыва подледниковых водоёмов, что сейчас является приоритетным направлением фундаментальных научных исследований в Полярных регионах нашей планеты.

Заключение

Подводя итог, отметим, что периодичность прорывов озёр рассмотренных антарктических оазисов определяется в основном колебаниями климата. По всей вероятности, они будут происходить в наиболее тёплые годы после накопления значительных объёмов водных масс в озёрных котловинах. Холмы Тала, а именно район, расположенный в непосредственной близости от полевой базы Молодёжная, характеризуется развитой озёрно-речной гидрографической сетью. Прорывы водных объектов происходят в основном во второй половине антарктического лета и осуществляются через снежные или ледовые естественные плотины. Падение уровня воды при этом может достигать 7 м. Изучение этих процессов имеет важное прикладное значение для функционирования полевой базы Молодёжная, поскольку способно надолго прервать транспортное сообщение между различными объектами инфраструктуры РАЭ.

Аналогичная ситуация складывается и на холмах Ларсеманн. Отдельные мелкие озёра, такие как Рейд, Дискашн, LH59 прорываются, как правило, ежегодно. Резкие падения уровня на более крупных водных объектах происходят главным образом в аномально тёплые летние периоды. Чаще всего разрушаются естественные плотины, состоящие из сезонного снега. Другой особенностью этого региона является наличие внутриледниковых водных объектов, прорывающихся через ледник. Следует отметить, что именно эти прорывные паводки наиболее катастрофичны.

Авторы выражают благодарность своим коллегам С. Д. Григорьевой, Г. А. Дешевых и Е. В. Рыжовой за предоставленные данные полевых исследований 64-ой РАЭ (2018-19 гг). Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-00421 «Особенности формирования и развития паводков подледниковых водоёмов Антарктиды»).

Список литературы

1. Атлас Океанов. Антарктида / ред. В. И. Куроедов. СПб. : Гл. упр. навигации и океанографии М-ва Оборона РФ, 2005. 280 с.

2. Боронина А. С., Попов С. В., Пряхина Г. В. Моделирование подледниковых паводков на примере катастрофического прорыва водоёма в леднике Долк (полуостров Брокнес, Восточная Антарктида) // Третьи Виноградовские Чтения : сб. докл. Междунар. науч. конф. СПб., 2018. С. 854–859.
3. Вайгачев А. З. Прорыв ледяной «плотины» озера Лагерного // Информ. бюл. Сов. антаркт. эксп. 1965. № 54. С. 58–59.
4. Дворников Ю. А., Евдокимов А. А. Научно-технический отчёт по программе гидроэкологических исследований на станции Прогресс в сезонный период 62-й РАЭ. СПб. : Фонды ААНИИ, 2017. 50 с.
5. Прорывы ледниковых и подледниковых озёр в районе холмов Ларсеманн (Восточная Антарктида) в 2017–2018 гг. / С. В. Попов, А. С. Боронина, Г. В. Пряхина, С. Д. Григорьева, А. А. Суханова, С. В. Тюрин // Геориск. 2018. Т. 12, № 3. С. 56–67.
6. Симонов И. М. Оазисы Восточной Антарктиды. Л. : Гидрометеиздат, 1971. 176 с.
7. Сократова И. Н. Антарктические оазисы. СПб. : ААНИИ, 2010. 274 с.
8. Топографическая карта района станции Молодёжная, масштаб 1:50 000. Союзморнии-проект, 1972.
9. Фонды ААНИИ, № О-1790: 15-я Советская антарктическая экспедиция. Отчёт о гляцио-гидрологических работах в районе ст. Молодёжная в сезон 1969–1970 гг. 34 с.
10. Фонды ААНИИ, № О-3553: Отчёт о работе станции Прогресс, 48 РАЭ. СПб., 2004. 204 с.
11. Antarctic Xiehe Peninsula orthophoto. Scale 1:4000, 2006, Heilongjiang Polar Engineering Center of Surveying & Mapping and Heilongjiang Institute of Geomatics Engineering, China.
12. Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica / P. Fretwell [et al.] // The Cryosphere. 2013. Vol. 7. P. 375–393. doi:10.5194/tc-7-375-2013.
13. Gillieson D. An environmental history of two freshwater lakes in the Larsemann Hills, Antarctica / Hydrobiologia. 1991. Vol. 214, N 1. P. 327–331.
14. Kaup E. Trophic status of lakes in Thala Hills – records from the years 1967 and 1988 / Proc. NIPR Symp. Polar Biol. 1998. N 11. P. 82–91.
15. Larsemann Hills. Princess Elizabeth Land. Antarctica. Satellite image map. Edition 3. Map number 14241, Scale 1:25 000, 2015, Australian Antarctic Division.

УДК 556.5.06

Мониторинг и прогнозирование неблагоприятных и опасных гидрологических явлений на территории Иркутской области

Н. А. Котова (natalyakotova9292@mail.ru)

Иркутское УГМС, г. Иркутск

Аннотация. Описаны характерные для водных объектов Иркутской области гидрологические неблагоприятные и опасные явления, особенности их формирования и происхождения.

Ключевые слова: половодье, паводки, межень, маловодье, максимальные уровни воды, водные ресурсы, неблагоприятное явление, опасное явление, мониторинг гидрологической обстановки.

Иркутская область в пределах своей территории имеет колоссальные объёмы водных ресурсов – оз. Байкал, каскад водохранилищ на р. Ангара, речная сеть таких крупных рек как Ангара, Лена, Нижняя Тунгуска и их многочисленные притоки.

Всего на территории области расположено 228 озер и более 65 тыс. рек и ручьев и все они имеют свои особенности и условия формирования неблагоприятных и опасных гидрологических явлений [5].

Опасное явление (ОЯ) – это гидрометеорологическое явление, которое по интенсивности развития, продолжительности или моменту возникновения может представлять угрозу жизни или здоровью граждан, а также может нанести значительный материальный ущерб [4].

Неблагоприятное явление (НЯ) – это гидрометеорологическое явление, не достигшее критериев опасного явления, затрудняющее деятельность отдельных отраслей, наносящих ущерб экономике и населению, но в меньшей степени [4].

Различают несколько видов гидрологических явлений, которые при достижении определенных критериев относят к неблагоприятным или опасным явлениям:

- половодье;
- затор льда;
- зажор льда;
- паводок;
- низкая межень;
- раннее ледообразование;
- маловодный период.

В зависимости от географических особенностей, расположения, типа питания и времени года для каждого водного объекта характерно возникновение тех или иных явлений.

Отличительной чертой рек Лена, Киренга, Нижняя Тунгуска, Бирюса является то, что русло ориентировано с юга на север, поэтому вскрытие сначала происходит в верхнем течении, а затем в нижнем. Вследствие чего на этих реках ОЯ и НЯ возникают в период прохождения половодья – наблюдается образование мощных заторов и зажоров льда, резкое повышение уровней воды и затопление близкорасположенных участков и населенных пунктов в пойме реки [3].

Анализ условий формирования катастрофических заторных наводнений на этих реках показал, что они являются сочетанием таких факторов как значительная увлажненность водосбора реки осенью, большая толщина ледяного покрова, интенсивное снеготаяние

весной, осадки в период формирования половодья и резкий контраст температур воздуха в месте образования заторов [1].

В летний период на реках Ленского бассейна и р. Нижняя Тунгуска наблюдается постепенный спад уровня воды, при выпадении осадков – незначительные его повышения. Разница максимальных уровней воды весеннего половодья и максимальных уровней воды в летний период в основном составляет 150–350 см, при формировании заторных уровней весной может достигать 400–500 см (рис. 1).

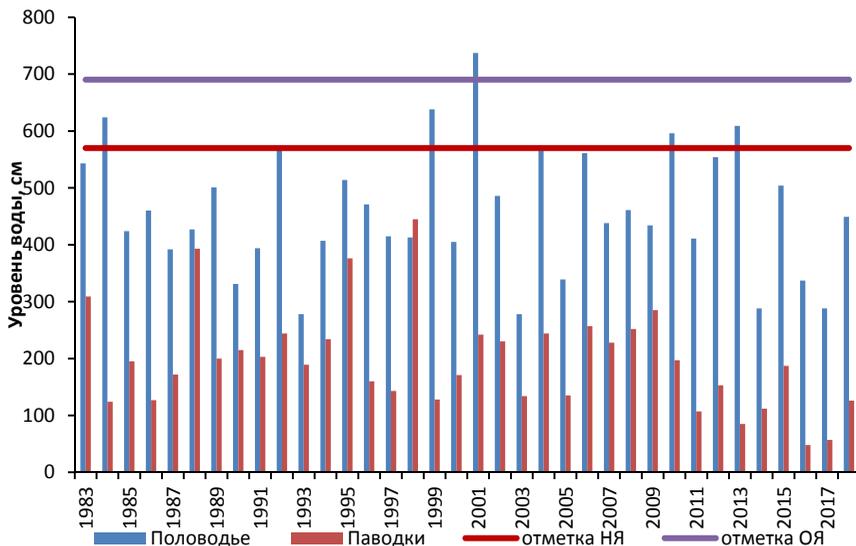


Рис. 1. Максимальные уровни воды весеннего половодья и дождевых паводков на р. Лена в районе г. Киренск за период 1983–2018 гг.

В последние годы из-за дефицита осадков и высоких температур воздуха в летний период на судоходных участках р. Лена наблюдается низкая межень, которая может достигать как критериев НЯ, так и ОЯ (рис. 2).

Река Витим обладает теми же особенностями расположения, но имеет снегодождевое питание, поэтому там повышение уровня воды до критериев НЯ и ОЯ может происходить как весной, так и летом (рис. 3).

Бассейны левобережных притоков р. Ангара Иркут, Китой, Белая, Ока, Ия, Уда характеризуются резко континентальным климатом, малоснежной зимой и дождливым летом (в период ноябрь – апрель вы-

падет 5–20 % годовой суммы осадков). Поэтому вскрытие и половодье на этих реках проходит спокойно – не образуются заторы и не наблюдается резкое повышение уровней воды, но в летних период при выпадении интенсивных и продолжительных осадков могут формироваться разрушительные дождевые паводки [2].

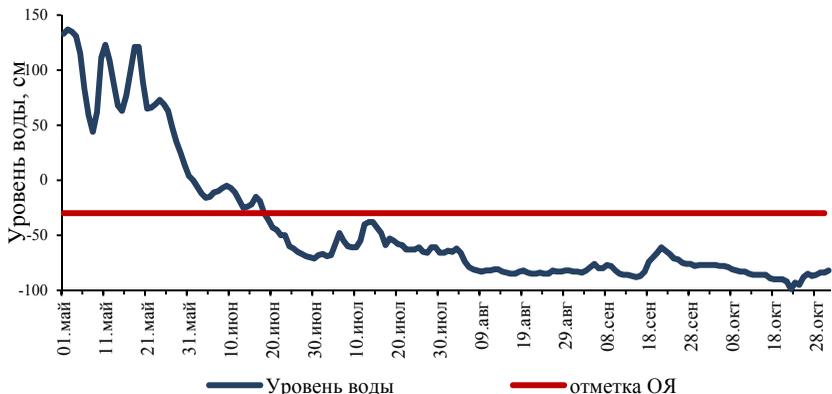


Рис. 2. Ход уровня воды в период межени в 2017 г. на р. Лена в районе с. Подымахино

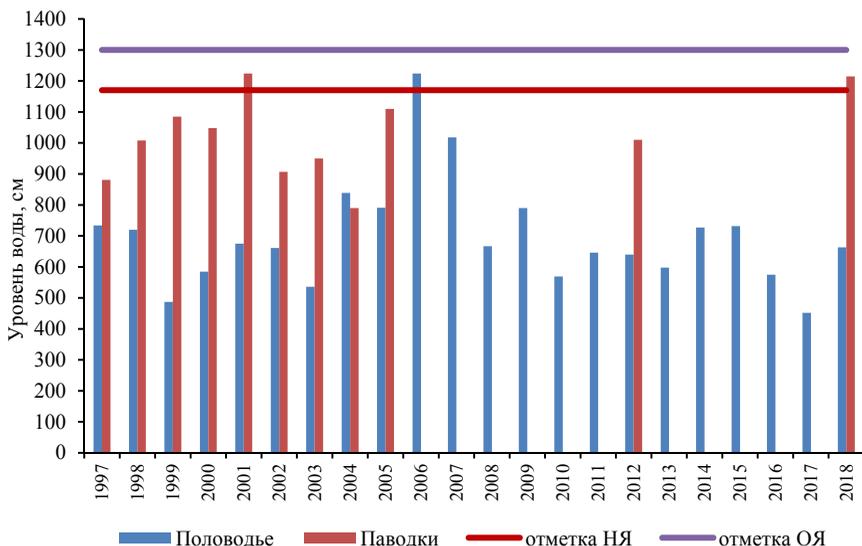


Рис. 3. Максимальные уровни воды весеннего половодья и дождевых паводков на р. Витим в районе г. Бодайбо за период 1997–2018 гг.

Разница максимальных уровней весеннего половодья и дождевых паводков на этих реках может изменяться от 10–60 см, при выпадении интенсивных осадков до 400–600 см (рис. 4), для формирования паводков, достигающих критериев НЯ и ОЯ необходимо количество осадков 50–120 мм и более, обычно это происходит при обложных многодневных дождях.

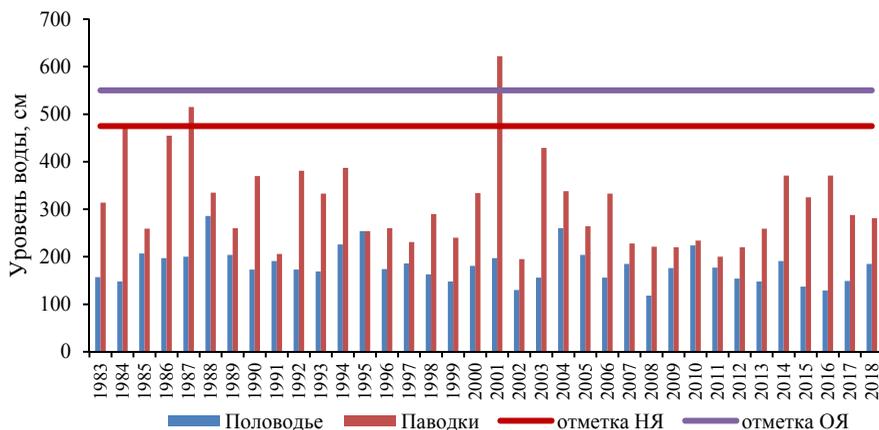


Рис. 4. Максимальные уровни воды весеннего половодья и дождевых паводков на р. Китой в районе пос. Китой за период 1975–2018 гг.

В зимний период так же могут возникать НЯ и ОЯ, это происходит при продвижении кромки льда на р. Ангара. При низких температурах воздуха кромка льда продвигается вверх по течению, при этом могут образовываться зажоры льда, происходить резкое повышение уровня воды и выход воды из берегов, так же это неблагоприятно отражается на работе Иркутского гидроузла.

НЯ и ОЯ могут так же возникать при уменьшении водного потенциала на территории области. Так низкая водность в бассейне р. Ангара и оз. Байкал в 2017 г. (рис. 5) привела к снижению притока в водохранилища Ангарского каскада, что в свою очередь негативно отразилось на работе ГЭС и навигации.

Из вышеперечисленного следует, что мониторинг гидрологической обстановки необходимо проводить круглый год на всей территории области. Отдел гидрологических прогнозов проводит ежедневный сбор и обработку информации, поступающей с гидрологических постов и станций, всесторонний анализ гидрологической обстановки, составляются прогнозы различной заблаговременности:

- уровней воды в летний период;
- максимальных уровней весеннего половодья;
- сроков вскрытия и ледообразования на реках;
- сроков вскрытия, очищения и установления ледостава на водохранилищах;
- притока воды в водохранилища;
- минимальных уровней воды на судоходных реках.

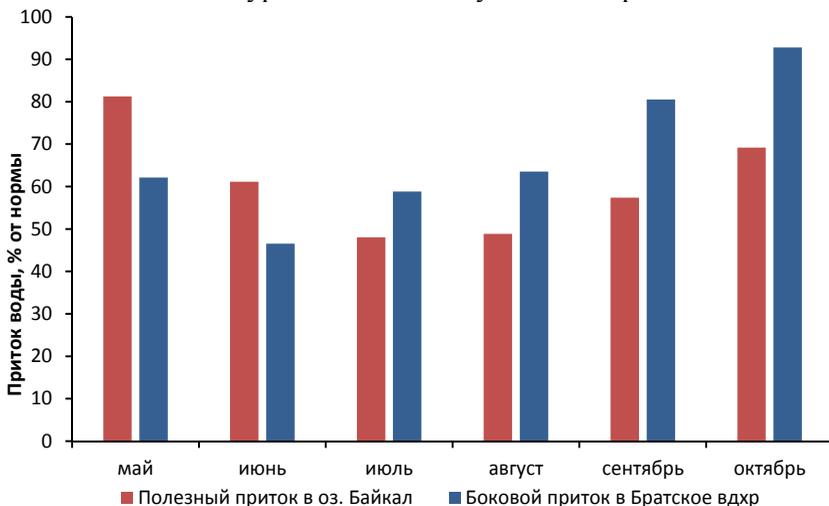


Рис. 5. Распределение притока воды в оз. Байкал и Братское водохранилище за период май – октябрь в 2017 г.

При угрозе и возникновении НЯ и ОЯ на основе прогностических методик, текущих гидрологических условий и прогноза погоды составляется и рассылается штормовое предупреждение, содержащее описание фактической обстановки и прогноз развития явления.

Основной проблемой является невозможность составления прогнозов НЯ и ОЯ с большой заблаговременностью. Возникновение этих явлений напрямую зависит от локальных погодных условий (температура воздуха, осадки в конкретных районах), а более точный прогноз этих характеристик дается с заблаговременностью 1–3 суток.

Для повышения точности и заблаговременности прогнозов необходимо увеличение плотности как гидрологической, так и метеорологической наблюдательных сетей. С этой целью в определенные периоды года к оперативной работе привлекаются дополнительные гидрологические посты, организуются выездные работы специалистов, про-

водится мониторинг обстановки с помощью космоснимков, сотрудничество с МЧС и администрациями Иркутской области.

Каждый год в отделе гидрологических прогнозов проводится всесторонний анализ наблюдавшихся гидрологических явлений, для улучшения качества будущих прогнозов обновляются ряды наблюдений и зависимости, разрабатываются новые методы прогноза, учитывающие особенности рек Иркутской области и условия формирования весеннего половодья.

Список литературы

1. Бужин В. А. Зажоры и заторы льда на реках России. М. : Гос. гидрол. ин-т, 2015. 240 с.
2. Горбань К. Ф. Методика краткосрочного прогноза времени вскрытия на реках Иркут, Китой, Белая. Иркутск : Иркут. упр. гидрометслужбы, 1963. 50 с.
3. Кусатов К. И. Исследование элементов весеннего половодья рек Верхней Лены с целью их прогноза. Якутск : Якут. упр. гидрометслужбы, 1970. 56 с.
4. ФГБУ «Иркутское УГМС». Инструкция действий дежурной смены ФГБУ «Иркутское УГМС» при угрозе возникновения и возникновении опасных природных (гидрометеорологических) явлений. Иркутск, 2018. 24 с.
5. Министерство природных ресурсов и экологии Иркутской области. URL: <http://irkobl.ru> (28.02.2019).

УДК 911

Осадки экстремального характера в Северном Алтае. Наблюдения, последствия и значение для природных и природно-антропогенных комплексов

Н. А. Кочеева (nina_kocheewa@mail.ru)

М. Х. Шанкибаева (Shankibaeva77@mail.ru)

Горно-Алтайский государственный университет, г. Горно-Алтайск

Аннотация. Исследуется динамика дождливых периодов, которые представляют как теоретический, так практический интерес. Так как количество и продолжительность определяют характер климата местности и, в то же время, оказывают значительное влияние на хозяйственную деятельность.

Ключевые слова: экстремальные осадки, динамика, барические образования, неблагоприятные явления, природные условия, горы, Алтай.

Введение

Интерес общества к проблеме климата очень велик, так за последние несколько десятилетий, благодаря улучшению средств наблюдений, возрастающему научному пониманию и более современным и сложным численным моделям, а также прогностическим меха-

низмам, качество авиационных и сельско-хозяйственных прогнозов погоды значительно улучшилось. Для решения задач метеорологического обеспечения авиации и сельского-хозяйства необходимо располагать более полной информацией о наблюдаемом состоянии атмосферы и о его ожидаемых изменениях.

В процессе общей циркуляции в зоне наблюдения, основными воздушными массами, определяющими погоду в данном районе являются Арктические, Атлантические, воздушные массы с Центральной и Средней Азии, Европы и Восточной Сибири и других регионов [1; 2]. Во все сезоны года большую часть в формировании погодных условий связаны с прохождением циклона и атмосферных фронтов. Фронтальные системы довольно быстро проходят по равнине и тормозятся горными хребтами на юге края, тем самым оказывая влияние на формирование погодных условий.

Лимитирующим фактором эколого-экономического развития региона и условий безопасности населения является отдельное и комплексное проявление опасных и неблагоприятных явлений природного характера. Среди которых весеннее половодье, сильные дожди и снегопады, природные пожары, сильные ветра, экстремальные значения температур воздуха [5].

В связи с этим становится актуальным вопрос выявления закономерностей проявления опасных и неблагоприятных природных явлений и оценки их влияния на окружающую среду исследуемого региона и жизнедеятельности населения.

Цель работы состояла в комплексном анализе проявления природных явлений (на примере осадков экстремального характера) в физико-географических условиях Севера Алтая.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных материалов использованы результаты регулярных и специальных наблюдений за погодой на АМСГ аэропорта Горно-Алтайска. Период исследования составил 10 лет. В частности использовался ряд метеорологических данных с электронного журнала АВ-6, за период с 2006 по 2015 г.

Для оценки влияния атмосферных фронтов и барических образований на характер выпадения осадков, а также влияние осадков на состояние взлетно-посадочной полосы из дневников погоды АВ-6 в те дни, когда отмечались неблагоприятные и опасные явления погоды, были выписаны данные о повторяемости прохождения фронтальных систем и барических образований, и интенсивности выпадения осад-

ков. Выборка производилась в соответствии с требованиями Руководства по краткосрочным прогнозам (Гидрометиздат Л., 1986). Были обработаны более 5000 значений. Выборка за десятилетний период приведена в таблице.

Таблица

Повторяемость барических образований, атмосферных фронтов и связанных с ними комплексом метеорологических явлений (КМЯ)

Год	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Общее число
	Дни										
Барические образования	30	25	22	32	8	6	41	16	46	32	258
Атмосферные фронты	69	33	44	54	18	23	36	18	21	31	347
Град	1	-	-	-	-	-	2	2	5	3	13
Сильный ливневый дождь	30	-	-	-	-	-	2	-	19	12	63
Ливневый дождь	38	54	48	50	8	16	67	37	67	60	385
Сильный ливневой снег	3	-	-	-	-	-	4	3	9	12	19
Ливневый снег	33	27	44	55	23	16	26	15	44	52	283

Расчеты производились в программах Excel STATISTICA.

Обсуждение результатов

Предварительный анализ исходных данных позволил выделить два временных отрезка. Первый, период наблюдений с 2006 по 2010 г. сбор и обработка комплекса метеорологических явлений до установки оборудования АМИС (рис. 1). Второй, это период с 2011 по 2015 г., сбор и обработка комплекса метеорологических явлений с новейшей системой оборудования АМИС.

На графике распределения во времени осадков ливневого характера и фронтальных систем, барических образований (рис. 1) видно, что кривая распределения ливневых осадков, в первой половине периода, выходят за пределы зависимости фронтальных систем и барических образований. Этот факт, можно объяснить тем что выпадение ливневых осадков связано с внутримассовыми грозами. Однако во второй период исследования (рис. 2) прослеживается четкая закономерность распределения во времени осадков ливневого

характера и барических образований, и в меньшей степени от прохождения атмосферных фронтов.



Рис. 1. Распределение во времени осадков ливневого характера и фронтальных систем, период наблюдений с 2005–2010 гг.



Рис. 2. Распределение во времени осадков ливневого характера и фронтальных систем, период наблюдений с 2011–2015 гг.

Проведенный анализ показал, что на исследуемой территории прослеживаются закономерности повторяемости комплекса метеорологических явлений при прохождении атмосферных фронтов и барических образований. Статистический анализ позволил выделить две группы временных отрезков, где число опасных явлений и неблагоприятных явлений погоды в зависимости от прохождения фронтальных систем и влияния барических образований различно. Также нужно отметить, что максимальное количество выпавших осадков ливневого характера отмечается при меньшей временной продолжительности выпадения дождя за период исследования. И наоборот, при максимальной временной продолжительности отмечается меньшее количество выпавших обложных осадков.

В связи с особенностями циркуляции атмосферы на исследуемой территории, опасные и неблагоприятные явления погоды, как выпадение и продолжительность выпадения осадков, ухудшающие видимость, возникновение сильных ветров, метелей, гроз, гололедных явлений оказывают воздействие на взлет и посадку воздушных судов и на работу служб аэропорта.

Весь этот комплекс метеорологических явлений привёл к нарушению работы аэропорта, были отменены плановые рейсы на посадку, а также на взлет. Аэродромная служба аэропорта не успевала производить очистку снега на полосе. Сочетание неблагоприятных атмосферных явлений привели к отключениям электроэнергии, сильный ветер привел к короткому замыканию проводов, в черте города были повалены столбы линии электропередач, в ряде населенных пунктов отмечались повреждения кровли домов.

Список литературы

1. Анисимова В. В., Кочеева Н. А. К вопросу о распределении опасных и неблагоприятных явлений на различных территориях России. Горно-Алтайск, 2011. С. 12.
2. Андреева Е. С. Концепция вероятностно-географического прогнозирования опасных явлений погоды юга России : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. СПб., 2008. 22 с.
3. Дмитриев А. Н., Кречетова С. Ю., Кочеева Н. А. Грозы и лесные пожары от гроз на территории Республики Алтай : монография. Горно-Алтайск : РИО ГАГУ, 2011. 154 с.
4. Закономерности и прогнозирование природных явлений / отв. ред.: С. И. Агаарков, И. П. Дружинин, А. В. Резникова. М. : Наука, 1980. 271 с.
5. Опасные явления погоды на территории Сибири и Урала. Л. : Гидрометеиздат, 1979. 284 с.
6. Шакина Н. П., Иванова А. Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М. : Триада лтд, 2016. 306 с.
7. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. III. Аэропорт Одесса / Н. П. Шакина, Е. Н. Скриптунова, А. Р. Иванова, И. А. Хоменко, Г. В. Хоменко // Метеорология и гидрология. 2005. № 9. С. 5–18.
8. An extratropical cyclone atlas: a tool for illustrating cyclone structure and evolution / H. F. Dacre [et al.] // Bull. Amer. Met. Soc. 2012. Vol. 93, N 10. P. 1497–1502.

9. Kryjov V. N. Seasonal climate prediction for North Eurasia // *Env. Res. Let.* 2012. Vol. 7. P. 015203.

10. Occurrences on the Border of the Western Siberia Plains and Altai Mountains is accepted for publication / N. A. Kocheeva, M. H. Chankibaeva, A. I. Minaev, M. G. Sukhova, A. A. Modorov // *Journal of Environmental Management and Tourism.* 2017. Vol. 8, Is. 5(21). P. 15–25. ISSN 2068-7729 Journal DOI.

11. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.08.001>.

12. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.08.002>.

13. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2017.02.001>.

14. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2017.01.001>.

УДК 556.5 (470)

Гидрологические ограничения водопотребления в Российской Арктике

Д. В. Магрицкий (magdima@yandex.ru)

Московский государственный университета им. М. В. Ломоносова, г. Москва

Аннотация. Приводятся количественные показатели водопотребления в бассейнах рек, впадающих в арктические моря РФ, и отдельно для территории Арктической зоны России. Оценки получены для 1980-х гг. (периода максимальной антропогенной нагрузки) и современного периода 2006–2017 г. Оценено возможное влияние суммарного водозабора и безвозвратного водопотребления на водные ресурсы арктических рек. Рассмотрена отраслевая структура водопользования. Впервые обозначены и подробно рассмотрены локальные гидрологические ограничения в арктическом водопотреблении. Обоснованы три большие группы таких ограничений; приведены примеры, результаты анализа гидрографической и отраслевой структуры, территориальных закономерностей ограничений для арктических территорий Красноярского края, Республики Саха и Чукотского АО.

Ключевые слова: российская Арктика, реки, водопотребление, гидрологические ограничения водопользования.

Анализ данных по изъятию речных и подземных вод на водосборах рек Российской Арктики за период с 1980 по 2016 г., объему сбрасываемых обратно в водные объекты сточных вод позволил не только оценить величины забора природной воды, водоотведения на водосборах арктических рек, их многолетнюю динамику, но и ряд важных и новых выводов в отношении влияния этого антропогенного фактора на сток рек, на приток речных вод в арктические моря России в целом, в отношении существующих гидрологических ограничений водопотребления в Арктической зоне России, т. е. со стороны самих водисточников. Этот результат представлен впервые. Источниками исходных данных послужили, во-первых, материалы государственного

статистического наблюдения Федеральных Агентства водных ресурсов и Службы государственной статистики, ежегодно публикуемые в «Водном кадастре РФ. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество», «Водах России. Состояние, использование охрана», «Водных ресурсах и водном хозяйстве России. Статистический сборник», издаваемом с 2006 г. [1; 3; 4], а также «Доклады о состоянии и об охране окружающей среды», составляемые с конца 1990-х – начала 2000-х гг. Вторым источником данных стали материалы из обновленных к 2015 г. «Схем комплексного использования и охраны водных объектов» (СКИОВО). Они размещены в открытом доступе, в частности на сайтах Амурского, Енисейского, Нижне-Обского и Двинско-Печорского бассейновых водных управлений [13]. Третьим и необычным источником исходных данных стали открытые документы муниципальных образований, в первую очередь, «Схемы водоснабжения и водоотведения, теплоснабжения», «Программы комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры» населенных пунктов, а также годовые отчеты предприятий. Благодаря им впервые удалось создать «Электронный каталог водопотребителей Арктической зоны России» (ЭКВ АЗР), правда пока лишь по участникам водохозяйственного комплекса на территории Чукотского АО, арктических районов (улусов) Республики Саха (Якутия) и Красноярского края, с разнообразными водохозяйственными данными за последние 5–10 лет.

1. Общие сведения по водопотреблению на водосборах арктических рек и в Арктической зоне России

Установлено, что своих максимальных показателей *водопотребление* на водосборах арктических рек России достигло в конце 1970-х гг. и, конечно же, в 1980-х гг. Тогда суммарное потребление воды и *водоотведение* обратно в реки и др. водные объекты, а также просто на местность составляло примерно 28,9 и 20,7 км³/год. В бассейнах таких рек, как Северная Двина, Обь и Енисей, в 1981–1990 гг. изымалось 1,26, 17,85 (из них 33 % в Казахстане) и 5,36 км³/год, или 1,2; 4,3 и 0,8 % их стока в моря с учетом данных из [12]. Из рек Мурманской области, наиболее промышленно развитого субъекта Арктической зоны России (АЗР), забиралось ~2,5 км³/год, или 3,6 %. То есть можно говорить об отсутствии статистически значимого антропогенного влияния на водные ресурсы рек. Не наблюдалось и так называемого водного стресса, который появляется при отношении водозабора к общим, или оставшимся водным ресурсам в 10 % и больше [2]. Кроме того, исходя из величины суммарного водоотведения следует, что ос-

новная часть изъятной воды возвращалась обратно в водные объекты. А именно разность объемов водозабора и водоотведения характеризует так называемое *безвозвратное водопотребление*, которое приводит, в том числе к систематическому антропогенному снижению стока воды рек. У Печоры, Северной Двины, Енисея и Лены безвозвратное водопотребление составило в 1980-х гг. 0,15, 0,12, 1,0 и 0,07 км³/год. Тогда как прямое антропогенное уменьшение годового стока, как разность забора речных плюс подземных (с ущербом для речного стока) вод и сбросов сточных вод обратно в реки, было меньше: 0 км³/год у р. Онеги, 0,09 – у р. Северной Двины, ~0 – р. Мезени, 0,025 – р. Печоры, 0,67 – р. Енисея, 0,043 – р. Лены, 0,03 км³/год – р. Колымы, т. е. <0,1 % величины годовых водных ресурсов этих рек. Наибольших величин безвозвратное водопотребление достигало в 1980-е гг. в Обь-Иртышском бассейне (6,4 км³/год). А с потерями на испарение с водохранилищ в бассейне р. Оби, на заполнение Шульбинского водохранилища в 1980-х гг. безвозвратные потери достигали уже 12 км³/год (3,1 % стока Оби в эти годы) или до 13 км³/год (3,4 %), если брать в расчет только сбросы в реки. А это уже весомо, поскольку превышают погрешность расчета нормы стока (2,5 %). В КНР в эти годы серьезных изъятий стока из Черного Иртыша не было. По другим арктическим рекам данных за 1980-е и 1990-е гг. найти не удалось.

К настоящему времени забор воды заметно сократился, в том числе благодаря переходу на водосберегающие технологии. Показательный пример – Норильский комбинат и его подразделения. Он вырос лишь в Ненецком и Ямало-Ненецком АО, благодаря интенсивному развитию местного нефтегазового комплекса. Тем не менее, многие районы и реки, по сути, не охвачены водохозяйственной деятельностью.

Наибольший забор воды по-прежнему осуществляется в Мурманской обл. (1,72 км³/год), в бассейнах рек Северная Двина (0,64), Обь (14,7 км³/год, причем ~8,9 км³/год забирается на территории РФ, 2,8 – Казахстана, 3,0 – Китая) и Енисей (2,77 км³/год). Всего из арктических рек и подземных водоисточников на их водосборах изымалось в 2006–2017 гг. в среднем ~21,28 км³/год. Из них около 2,58 км³/год изымалось в пределах АЗР, которая определена Указом Президента РФ от 2 мая 2014 г. № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации» от 12 мая 2014 г.

Объемы современного отведения сточных вод в арктические реки сопоставимы с объемами их изъятия – 15,19 км³/год, или 71,4 % водозабора. Еще меньше разница между водозабором и водоотведением в

пределах АЗР. Следовательно, безвозвратные антропогенные потери стока здесь, как нигде в стране и мире [2], невероятно малы.

Основными водопотребителями выступают промышленность (с высокой долей добывающих предприятий), теплоэлектроэнергетика и коммунальное хозяйство. Их вклад изменяется по территории АЗР, от речного бассейна к бассейну. Водозабор на производственные нужды доминирует (от 78 до 93 %) в Мурманской обл. и Чукотском АО, в бассейнах рр. Северная Двина, Печора, Енисей, Нижняя Таймыра, Пясины, Индигирка и Колыма. Доля забора воды на коммунальные нужды большая на территориях с отсутствием или незначительным развитием промышленного производства (в бассейне р. Мезени – 63 %, в бассейне р. Хатанги – 53 %). Она также сравнительно высока в бассейнах рр. Северной Двины (18–25 %), Оби (16–22 %), Лены (25–27 %), Яны (34 %), Анадыря (41 %), в целом, в арктической части Республики Саха. В бассейнах Оби, Енисея и Лены несколько процентов приходится на забор воды на орошение – 1, 2 и 7 %.

2. Гидрологические ограничения водопотребления в АЗР

Материалы предыдущего раздела убедительно показывают, что общего дефицита водных ресурсов в Арктической зоне России нет. Это следствие, с одной стороны, обилия здесь водных объектов и огромного стока рек, с другой, ничтожно малых объемов водозабора, особенно безвозвратного по причине невероятно малой заселенности и хозяйственной освоенности рассматриваемой территории.

Однако на муниципальном уровне и для отдельных водопотребителей (т. е. локальные) гидрологические ограничения водопользования, как удалось выяснить, существуют (рис. 1). Характер и серьезность гидрологических ограничений зависят от множества факторов, в частности от типа и размера водопотребителя, его локализации, вида используемых природных вод, дебита и гидрологического режима водоисточника (рис. 2–4). Многие факторы изменяются по территории, в течение года, в многолетнем разрезе.

Уникальные результаты получены благодаря данным «Электронного каталога водопотребителей Арктической зоны России» (ЭКВ АЗР), созданного и наполненного соответствующими сведениями, но пока лишь по участникам водохозяйственного комплекса на территории Чукотского АО, арктических районов Республики Саха (Якутия) и Красноярского края. Таких участников насчитывается около 229: 70,7 % приходится на предприятия жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), по сути, населенные пункты, 18,8 % – на предприятия

добывающей промышленности, 6,6 % – на объекты теплоэнергетики, 3,9 % – на остальное. Поэтому приводимые в разделе сведения и результаты их обработки и анализа, в основном относятся лишь к водохозяйственному комплексу и водным объектам именно Чукотского АО, арктических районов (улусов) Республики Саха (Якутия) и Красноярского края.



Рис. 1. Характер и география гидрологических ограничений водопотреблению в Туруханском, Таймырском Долгано-Ненецком районах, городском округе г. Норильска Красноярского края, в арктических улусах Республики Саха (Якутия), в Чукотском АО

Локальные гидрологические ограничения в АЗР можно выделить в 3 большие группы. Первая группа связана с ограничениями при обеспечении водопотребителя необходимым количеством свежей воды. Это 30,5 % водопотребителей из рассмотренных в арктической части Чукотского АО, Республики Саха (Якутия) и Красноярского края. Вторая группа – с ограничениями из-за несоответствия качества воды в водоисточнике нормативным показателям (12 % не соответствует, 37 % не соответствует по небольшому количеству показателей). Третья группа – по причине затопления, повреждения, разрушения или занесения водозаборных и сбросных сооружений, систем тепло-, водоснабжения и распределения во время ледохода, больших расходов и уровней воды (в период половодья, паводков), а также из-за замерзания воды в трубах. Ниже приводится их расшифровка.

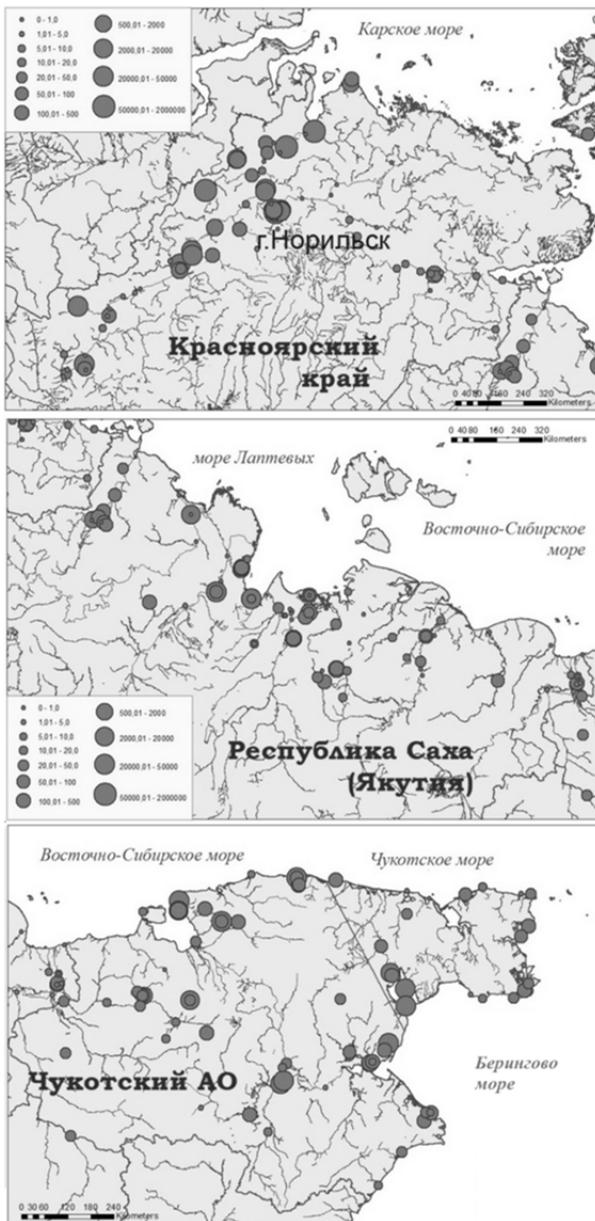


Рис. 2. География водопотребителей и объемы водопотребления (тыс. м³/год) в Туруханском, Таймырском Долгано-Ненецком районах, городском округе г. Норильска Красноярского края, в арктических улусах Республики Саха (Якутия), в Чукотском АО

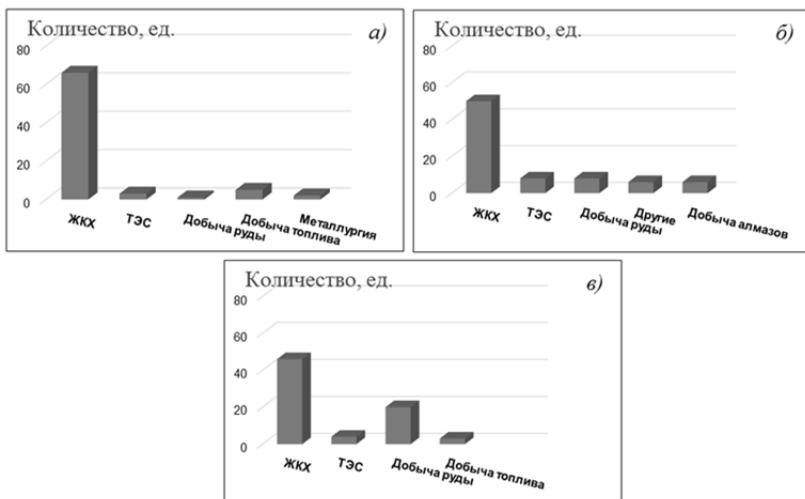


Рис. 3. Отраслевая структура основных водопотребителей в арктических районах Красноярского края (а), Республики Саха (Якутия) (б) и Чукотского АО (в)

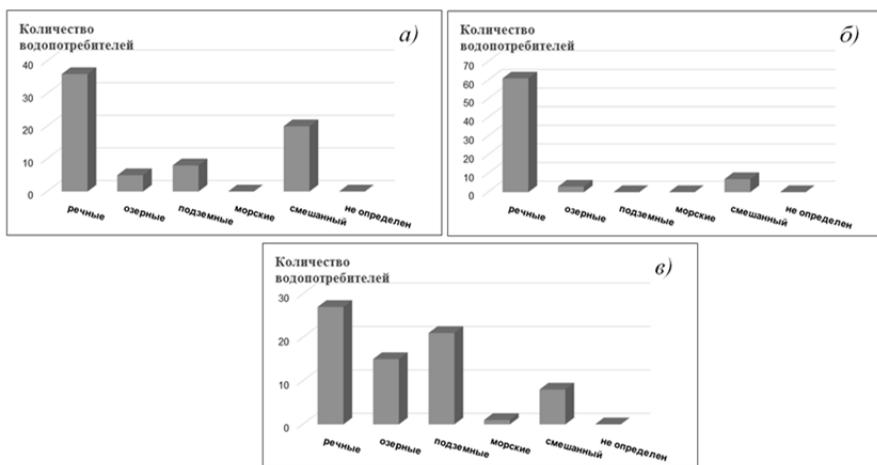


Рис. 4. Тип используемых природных вод (по количеству водопотребителей) в арктических районах Красноярского края (а), Республики Саха (б) и Чукотского АО (в)

Ограничения 1-го типа образуются из-за постоянного, периодического или эпизодического несоответствия водоносности (запасов, дебита) водоисточника потребностям предприятия или населенного пункта в свежей воде вследствие гидролого-морфологического «отмирания», или просто сезонного обмеления, замерзания или полного

промерзания водного объекта. Дефицит воды может возникнуть и по причине возросших (со стороны водопотребителя) потребностей в воде. Решения этих проблем разные. Это: 1) переброска, подвоз воды; 2) зимой – перевод водоснабжения на речной и озерный лед (рис. 5), на другие водоисточники, в том числе удаленные и даже на морские воды (как в случае с Чаунской ТЭЦ в г. Певек); 3) создание накопителей воды – прудов и водохранилищ (особенно вблизи крупных населенных пунктов, объектов теплоэлектроэнергетики, предприятий по добыче рудных полезных ископаемых); 4) переход на более рациональное водопользование, например увеличивая долю оборотного водоснабжения.



Рис. 5. Заготовка речного льда в Республике Саха (Якутия) для водоснабжения одного из арктических поселков зимой [<http://kolizej.at.ua/forum/26-416-1>]

Наиболее распространенная в сибирской части АЗР ситуация – замерзание и даже промерзание поверхностного водоисточника, отсутствие пригодных подземных вод (на территориях с мощной и сплошной толщей многолетнемерзлых пород – в частности на равнинах арктической Якутии) и вынужденный переход зимой на тепло- и водоснабжение (даже в населенных пунктах с централизованной системой водоснабжения) за счет заготовленного и растопленного речного и озерного льда. Распространенная в южных районах страны ситуация нехватки воды и низких уровней в летне-осенний период здесь

гипотетически возможна и даже случалась в гор. округе г. Норильск (в 2013 и 2016 гг.), в восточной части Таймырского Долгано-Ненецкого района. Но пока незначительное водопотребление и достаточное по эффективности мероприятие – оперативное сооружение подпорной дамбы на реке – не позволяют считать это ограничение пока серьезным и распространенным.

Ограничения 2-го типа присущи территориям и водным объектам с высокими фоновыми концентрациями в воде лимитирующих водопользование химических элементов и веществ, подвергающимся антропогенному загрязнению, с сезонным или кратковременным естественным ухудшением качества воды, например во время половодья (паводков) (рис. 6), в условиях малой водности, а также из-за проникновения морских вод к водозабору в устьях рек и на морских побережьях. Установлено, что в 6 сельских поселениях (с общим количеством жителей в 3200 чел.) водоснабжение периодически нарушается из-за достижения морскими водами (во время штормовых нагонов и на фоне малой водности рек) участка с водоотбором.

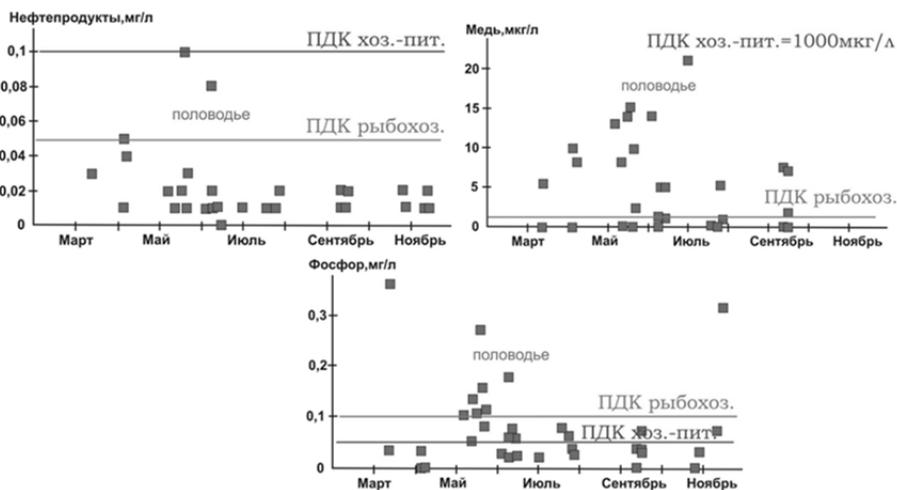


Рис. 6. Пример ухудшения качества воды (по некоторым химическим показателям) в водоисточнике хозяйственно-питьевого назначения во время прохождения весенне-летнего половодья на р. Индигирке (пос. Чокурдах)

Наибольший же ущерб зафиксирован в г. Архангельске, где морские воды в дельте р. Северной Двины способны нарушать водоснабжение Архангельского гидролизного завода (АГЗ, ~28 км от моря),

Соломбальского целлюлозно-бумажного комбината (СЦБК, ~35–37 км), даже Архангельской ТЭС (~35–37 км) и городской водопроводной станции (АГВС, ~45 км) (рис. 7) [11]. Для АГЗ частота таких событий 3,3–4,1 раз в год максимальной продолжительностью 25–30 сут., для СЦБК и АТЭС – ~0,9 раз в год (при 3-х катастрофических с 1969 по 2018 г.) средней продолжительностью 3 сут., максимальной – 9 сут., АГВС – менее 0,1 раз в год. Дальность проникновения максимальная в зимний период, когда перебои в работе АТЭС чреваты не только перебоями в производстве электроэнергии, но и в теплоснабжении. Ежегодный среднесезонный ущерб от этих событий (в долл. США), по очень приблизительным расчетам, в 1,5–2 раза выше ущерба от нагонных наводнений.

Ограничения по причине несоответствия требованиям по качеству воды снимаются посредством предварительной водоподготовки, временного или постоянного перехода на другой источник, например подземные воды. Однако население большинства населенных пунктов Красноярского края и Республики Саха, снабжающихся водой из рек и не имеющих станций водоподготовки, такой возможности не имеет. Причем каждый из гидрологических сезонов имеет свои особенности в плане ухудшения качества воды в реке.

Ограничения 3-го типа – по причине прямого воздействия паводковых вод на инфраструктуру, обеспечивающую забор свежей воды, ее очистку, распределение и водоотведение, – обнаружены в 26 населенных пунктах, находящихся полностью или частично в зоне затопления, и в 4 – на участках рек с размываемыми берегами. В них проживает около 42 тыс. чел. Последнее такое резонансное событие произошло в пос. Усть-Янск (Якутия) в начале июня 2018 г.

В целом, в АЗР около 80 населенных пунктов подвержены затоплениям речными водами и требуют защитных мероприятий. Затопления на морских побережьях и в устьях рек могут вызываться также штормовыми нагонами. Так, нагон в ноябре 2011 г., длившийся менее 2 сут., затопил до 50 км суши в устье Северной Двины, максимальной глубиной 1–1,5 м и нанес ущерб городам Северодвинску и Архангельску в размере 1,5–2 млн долл. США [11].

Безусловно, для некоторых водопотребителей и муниципальных образований могут действовать несколько видов гидрологических ограничений.

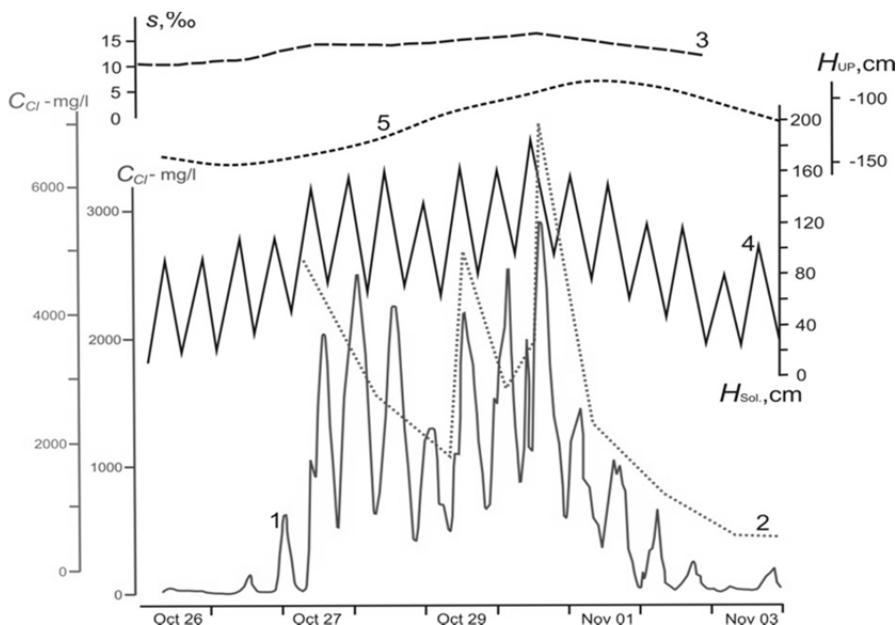


Рис. 7. Пример ухудшения качества воды (по минерализации и содержанию ионов хлора) в основном водоисточнике при проникновении морских вод на устьевой участок рек: комплексный график изменения гидрологических характеристик в устье Сев. Двины во время проникновения морских вод в октябре – ноябре 2014 г. [11]. 1, 2 – концентрация ионов хлора в створе Архангельской ТЭС и Соломбальского ЦБК, 3 – соленость воды на посту Мудьюг, 4, 5 – уровни воды на постах Соломбала и Усть-Пинега

3. Прогнозные оценки по изменению величины и условий водопользования

Через 10–15 лет выше приводимые показатели, согласно оценкам из СКИОВО, могут вырасти для РФ в 1,5 раза. Это не приведет к негативным изменениям величины стока воды арктических рек, поскольку уже сейчас компенсируется его климатическим увеличением [6; 12]. Так, в 1976–2015 гг. среднее увеличение годового притока речных вод в моря Российской Арктики составило, по сравнению с 1936–1975 гг., примерно $150 \text{ км}^3/\text{год}$. В дальнейшем, водный сток арктических, вероятнее всего, продолжит расти. К середине XXI в. относительное увеличение водных ресурсов Северной Двины, Печоры, Енисея и Лены может составить в среднем от 4 до 14 % и больше (относительно нормы 1961–1990 гг.) [2; 5; 7; 9]. В отношении будущего стока Оби оценки неоднозначны и не все со знаком плюс. Кроме того, на ее водосборе реализуется крупное межбассейновое перераспределение речного

стока (на китайской части водосбора – вод Черного Иртыша в направлении г. Карамай (от 0,5–1 до 2–4 км³/год), на казахстанской – иртышских вод в направлении столицы – г. Нур-Султан – а также других территорий и городов [10]), существенно растет водозабор. Безусловно, продолжится рост зимнего стока, особенно значительный у северо-европейских рек. К середине XXI в. прогнозируется увеличение водности и летне-осенней межени.

Тем не менее некоторые риски для водопользования есть, в первую очередь, из-за интенсификации русловых процессов (механической и термоэрозионной), деградации мерзлоты и спуска термокарстовых озер, усиления проникновения морских вод в устья рек (по причине роста уровня морей и синоптической неустойчивости), изменения ситуации с наводнениями, ухудшения качества воды, в том числе по содержанию взвесей. Так, сток взвешенных наносов и мутность вод Северной Двины, Оби, Оленека, Лены, Яны и Индигирки может вырасти соответственно (при увеличении водности этих рек на 5 и 10 %) на 8%/17%, 6,8/13,7, 2,7/5,3, 12/25, 12/24 и 5,8%/11,5%. Кроме того, ожидается значительное увеличение горной добычи в бассейнах арктических рек, что также способствует повышению количества поступающих в реки взвесей. Смягчение ледовых условий также ожидается, но значимое лишь в европейской части АЗР. По [8], в 1991–2014 гг. здесь продолжительность ледостава сократилась (в сравнении с 1961–1990 гг.) на 10–14 сут., тогда как на севере Средней и Восточной Сибири, где обнаружены серьезные проблемы с зимним водоснабжением, – всего на 3–8 сут.

Исследования выполнены в рамках гранта РНФ № 14-37-00038 (разделы № № 2, 3) и РФФИ № 18-05-60021 (разделы № № 1, 3).

Список литературы

1. Водные ресурсы и водное хозяйство России : стат. сб. М. : НИА-Природа, 2006–2018.
2. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И. А. Шикломанова. СПб. : ГТИ, 2008. 598 с.
3. Воды России. Состояние, использование, охрана. 1986–2000. Свердловск ; Екатеринбург, 1991–2002.
4. Водный кадастр РФ. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество : ежегод. изд. Л. ; СПб. ; М., 1981–2018.
5. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / под ред. Н. И. Алексеевского. М. : ГЕОС, 2007. 585 с.
6. Магрицкий Д. В. Климатические обусловленные и антропогенные изменения стока воды основных рек Российской Федерации в их низовьях и морских устьях // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2018. С. 285–294.
7. Чон В. Ч., Мохов И. И. Гидрологический режим бассейнов крупнейших рек Северной Евразии в XX–XXI в. // Вод. ресурсы. 2012. Т. 39, № 1. С. 3–12.

8. Антропогенные и климатически обусловленные изменения стока воды и ледовых явлений рек Российской Арктики / Н. Л. Фролова, Д. В. Магрицкий, М. Б. Киреева, С. А. Агафонова, Е. С. Повалишника // *Вопр. географии / Рус. геогр. о-во. Вып. 145. М. : Кодекс, 2018. С. 233–251.*

9. Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI в. на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири / под ред. Н. С. Касимова, А. В. Кислова. М. : МАКС Пресс, 2011. 496 с.

10. *Magritskii D. V. Anthropogenic Impact on the Runoff of Russian Rivers Emptying into the Arctic Ocean // Water Resources. 2008. Vol. 35, Is. 1. P. 1–14.*

11. *Magritsky D., Lebedeva S., Skripnik E. Hydrological hazards at mouths of the Northern Dvina and the Pechora rivers, Russian Federation // Nat Hazards. 2017. Vol. 88(1). P.149-171. doi: 10.1007/s11069-016-2673-6*

12. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector / D. V. Magritsky, N. L. Frolova, V. M. Evstigneev, E. S. Povalishnikova, M. B. Kireeva, O. M. Pakhomova // *Polarforschung. 2018. N 87 (2). P. 177–194.*

13. <http://www.amurbvu.ru/deyatelnost/skiovo/>, <http://skiovo.enbv.ru>, <http://nobwu.ru/index.php/ndvskiovo>, <http://www.dpbvu.ru/deyatelnost/skiovo-vklyuchaya-ndv> – сайты размещения Схем комплексного использования и охраны водных объектов в бассейнах арктических рек. (дата обращения: 28.11.2018).

УДК 551.515

Роль циркуляции атмосферы в повторяемости наводнений в России в 2012–2018 гг.

Самохина О. Ф. (samoxinao@yandex.ru)¹

Кононова Н. К. (NinaKononova@yandex.ru)²

¹ *Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, г. Москва*

² *Институт географии РАН, г. Москва*

Аннотация. Рассмотрены катастрофические наводнения на территории России за последние 7 лет. Выявлены типы циркуляции атмосферы, ответственные за каждое наводнение. Отмечен новый рост повторяемости южных циклонов, приносящих экстремальные осадки в разные регионы России.

Ключевые слова: типы циркуляции атмосферы, наводнения.

Введение

В настоящее время на Северном полушарии растёт повторяемость одновременных выходов южных циклонов в тёплое полугодие по четырём направлениям, 2–3 из которых непременно приходится на Россию [3]. Это ведёт к выпадению обильных осадков в разных, далеко отстоящих друг от друга регионах и формированию в них наводнений. Наиболее сильные наводнения рассмотрены в этой работе.

Методы и материалы

Для анализа циркуляции атмосферы использована типизация элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) Северного полушария [2]. Для каждого ЭЦМ построена динамическая схема, показывающая географическое положение циклонов и антициклонов и направление их перемещения [5]. Это даёт возможность определить, как смена одних макроциркуляционных процессов другими отражается на циркуляции атмосферы в конкретных регионах. Все расчёты изменения характера циркуляции атмосферы за 1899-2017 гг. размещены в открытом доступе на сайте [3]. Даты метеорологических экстремумов и вызываемых ими наводнений взяты с сайта [4]. Среднемесячные карты давления и аномалий давления построены по данным сайта <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.nmc.reanalysis.html>.

В ночь на 7 июля 2012 г. при ЭЦМ 9а произошло катастрофическое наводнение в Крымске. Наибольшее количество осадков выпало в ту ночь в Геленджике, но катастрофа произошла в Крымске из-за бессистемного поселения вблизи реки. В 2013 г. наводнение в Сочи произошло 13 марта при ЭЦМ 12бз и 24 сентября при ЭЦМ 13з. На Дальнем Востоке оно постепенно шло с юга на север с весны до конца сентября. В Москве экстремальные осадки выпали в третьей декаде сентября. В 2014 г. 23 июля при ЭЦМ 13л началось наводнение в Магаданской области, за ночь выпала трёхмесячная норма осадков. 29 июля при ЭЦМ 9б из-за обильных осадков был второй пик наводнения на Алтае, начавшегося ещё в мае. 27 июня при ЭЦМ 4б из-за сильных дождей на фронтах циклона монгольской ветви полярного фронта началось наводнение в Бурятии. 4–8 июля при последовательной смене ЭЦМ 2в, 4б и 3, когда этот циклон достиг Якутии, началось наводнение и там. В мае 2015 г. при большой суммарной продолжительности ЭЦМ 12а (16 дней за месяц) в Москве выпало 234 % нормы осадков, в Крыму – 360 % нормы. Осадки принесли средиземноморские циклоны. 1 июля 2016 г. при ЭЦМ 13л прошёл пик паводка в Амурской области, вызванного сильными ливнями на фронтах южных циклонов. В ночь на 1 июля сильные дожди (до 74 мм за ночь) прошли и на Черноморском побережье Кавказа тоже по вине южного (средиземноморского) циклона (рис. 1). В июне – июле 2017 г. при преобладании ЭЦМ 13л (41 день за 2 месяца) в Ставропольском и Краснодарском краях от бесконечных ливней вышли из берегов реки, были размыты дороги, пострадали поселковые дома. Такая же ситуация сложилась на юге Дальнего Востока. 6–8 июля 2018 г. при очередном вы-

ходе циклона из Монголии (ЭЦМ 12а и 13л) в Чите выпало 106 мм осадков при месячной норме 90 мм. Началось сильнейшее наводнение в Забайкальском крае и в Бурятии. Дожливая погода была в эти дни и на юге Дальнего востока.

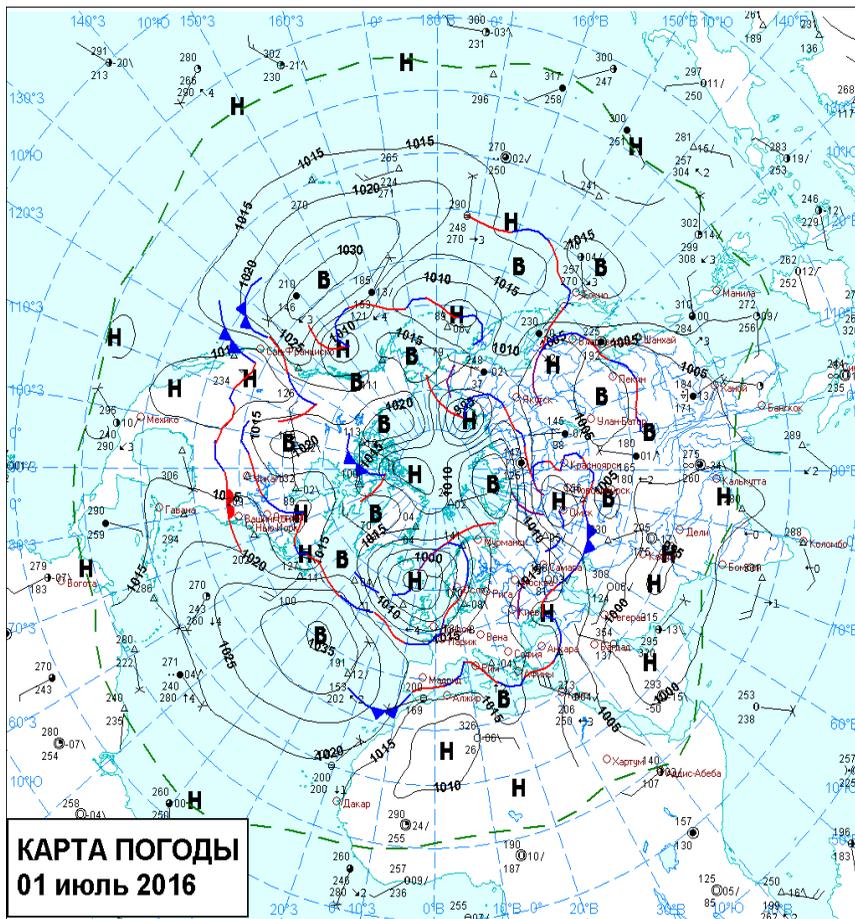


Рис. 1. Карта погоды Северного полушария за 1 июля 2016 г.

Полученные результаты

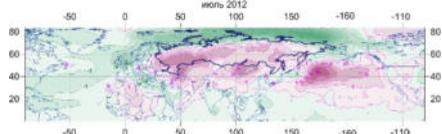
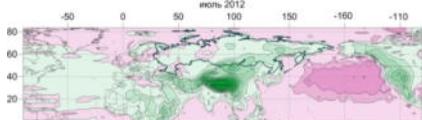
Все описанные явления не были кратковременными, а были «растянуты» по времени на 2–3 недели, а значит на картах давления месячного разрешения описанные процессы должны быть видны. Приводим карты приземного давления в месяцы наиболее сильного их проявления (данные по приземному давлению взяты из **реанализа**

NCEP/NCAR месячного разрешения в сетке $2,5 \times 2,5^\circ$). По картам давления видно, что все отмеченные ливни и наводнения вызваны южными циклонами: средиземноморскими, монгольской ветви полярного фронта и дальневосточными. Как видно из карт аномалий давления, в ряде случаев наблюдалось увеличение интенсивности полярного антициклона (март 2013, июнь 2014, июль 2014, июнь 2016, июль 2016). В большинстве случаев наблюдалось увеличение интенсивности тихоокеанского антициклона (июль 2012, март 2013, июнь 2014, июль 2014, июнь 2016, июль 2016, июль 2017). Кроме того, всюду происходило углубление циклонов над Европой (особенно, в марте 2013, в мае 2015, в июне 2017). Углубление циклонов в Японском и Охотском морях также происходило во всех описываемых случаях (кроме июня и июля 2016) – это обеспечивало выходы глубоких южных циклонов далеко на север.

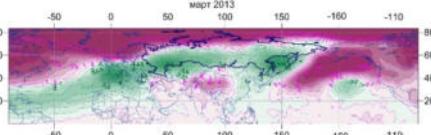
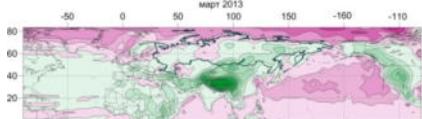
Давление

Аномалии давления (базовый период для расчета средних: 1961-1990 гг.)

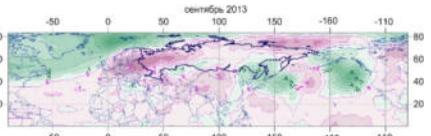
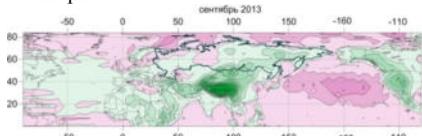
Июль 2012. Наводнение в Крымске.



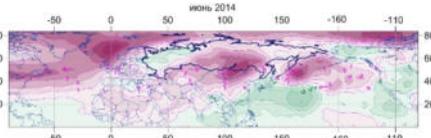
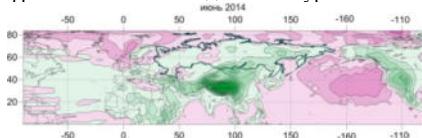
Март 2013. Наводнение в Сочи произошло 13 марта



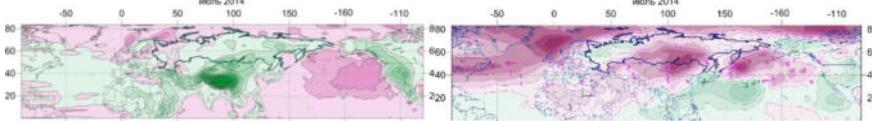
Сентябрь 2013. Наводнение в Сочи. В Москве экстремальные осадки выпали в третьей декаде сентября



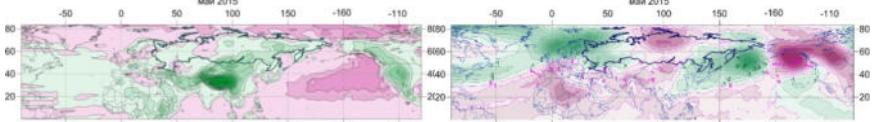
Июнь 2014. 27 июня из-за сильных дождей на фронтах циклона монгольской ветви полярного фронта началось наводнение в Бурятии



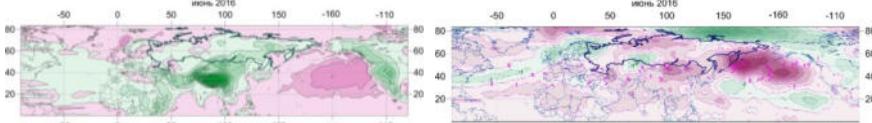
Июль 2014. 4–8 июля, когда этот циклон достиг Якутии, началось наводнение и там



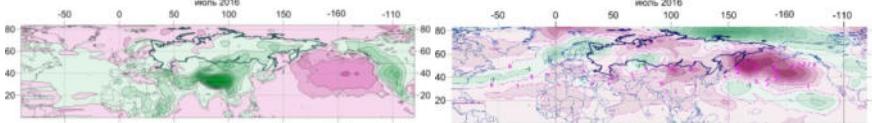
Май 2015. В мае 2015 г. в Москве выпало 234 % нормы осадков, в Крыму – 360 % нормы



Июнь 2016

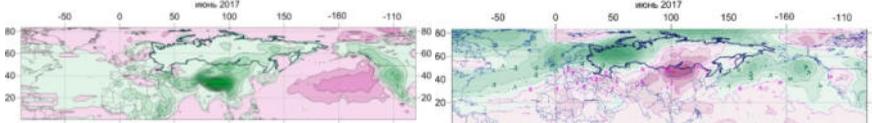


Июль 2016. 1 июля 2016 г. прошёл пик паводка в Амурской области, вызванного сильными ливнями на фронтах южных циклонов. В ночь на 1 июля сильные дожди (до 74 мм за ночь) прошли на Черноморском побережье Кавказа



В июне – июле 2017 г. в Ставропольском и Краснодарском краях от бесконечных ливней вышли из берегов реки, были размыты дороги, пострадали поселковые дома

Июнь 2017



Июль 2017

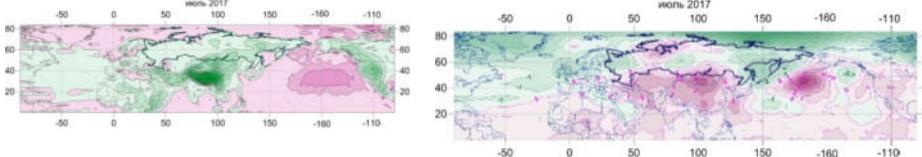
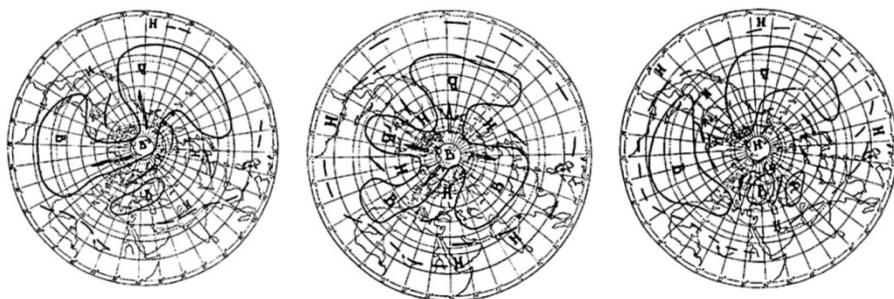


Рис. 1. Карты среднего приземного атмосферного давления (левый столбец) и аномалий давления (правый столбец) в месяцы с катастрофическими наводнениями

Как показал проведенный анализ, наибольшая интенсивность ливней и наибольшее количество одновременных наводнений в России происходит при ЭЦМ 9а, 12а и 13л (рис. 3).



ЭЦМ 9а

ЭЦМ 12а

ЭЦМ 13л

Рис. 3. Динамические схемы ЭЦМ 9а, 12а и 13л [5]

Наибольшая суммарная продолжительность ЭЦМ 9а в среднем отмечается с апреля по сентябрь (рис. 4). При нём южные циклоны выходят со Средиземного моря на Черноморское побережье, Западную Сибирь и Дальний Восток, принося в эти регионы обильные осадки и вызывая там наводнения. Суммарная годовая продолжительность ЭЦМ 9а превышает среднюю с 1981 г. (рис. 5).

При ЭЦМ 12а в России происходит три выхода южных циклонов (средиземноморских, с Монгольской ветви полярного фронта и дальневосточных), а в их тылу три арктических вторжения. На границе циклона и антициклона, в зоне наибольших контрастов температур, происходит обострение холодного фронта, на котором выпадают обильные осадки сразу в трёх регионах. Его суммарная месячная продолжительность повышается в марте – мае (особенно в апреле – мае) и в сентябре – ноябре (рис. 6). В отмеченные периоды его годовая суммарная продолжительность превосходит среднюю, а в последний период достигает максимума за весь период наблюдения (рис.7).

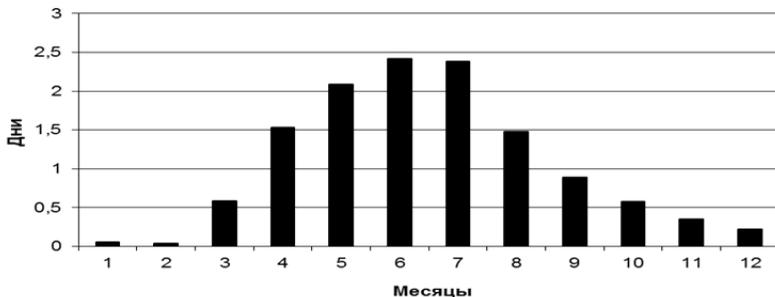


Рис. 4. Средняя суммарная продолжительность ЭЦМ 9а по месяцам [3]

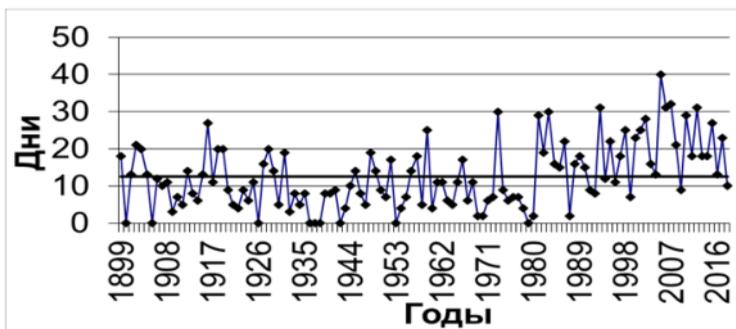


Рис. 5. Суммарная годовая продолжительность ЭЦМ 9а за 1899–2018 гг. [3]

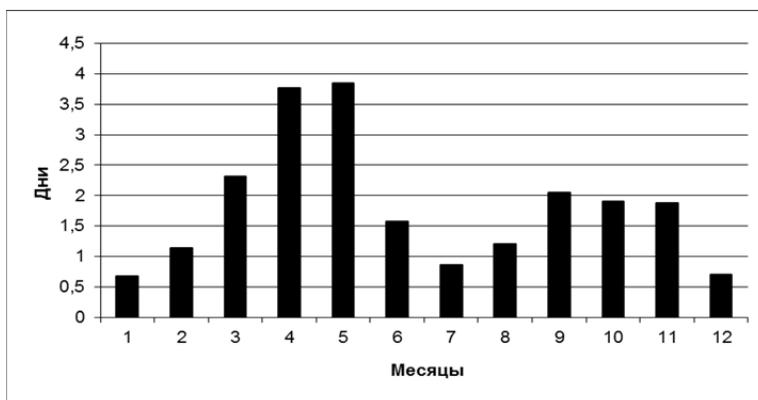


Рис. 6. Средняя суммарная продолжительность ЭЦМ 12а по месяцам [3]

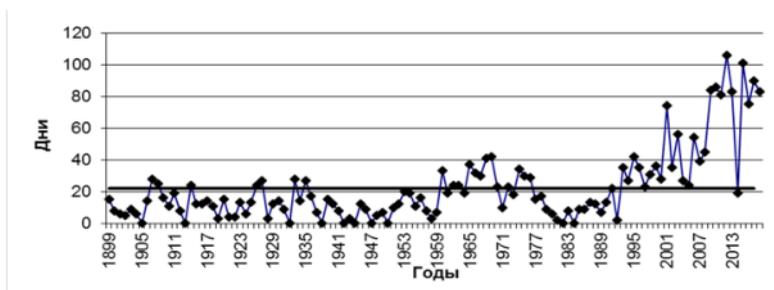


Рис. 7. Суммарная годовая продолжительность ЭЦМ 12а за 1899–2018 гг. [3]

Обильные осадки в разных регионах России выпадают также при ЭЦМ 13л (наибольшая средняя суммарная продолжительность приходится на май – август (рис. 8).

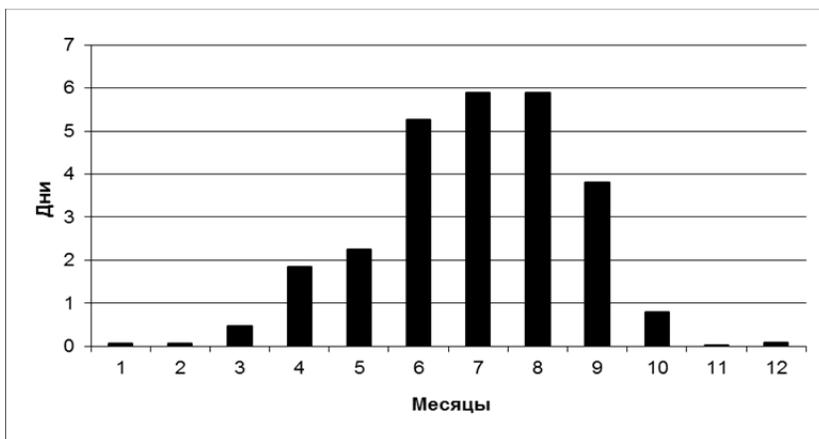


Рис. 8. Средняя суммарная продолжительность ЭЦМ 13л по месяцам [3]

При нём при циклонической циркуляции на полюсе южные циклоны в России выходят по тем же трём направлениям, что и при ЭЦМ 12а, вызывая ливневые осадки и сильные наводнения. Его продолжительность сильно выросла после 1963 г. (рис. 9), сильно снизилась в период 2005–2013 гг. и снова выросла в 2016–2018 гг., в наводнениях которых этот ЭЦМ и проявился.

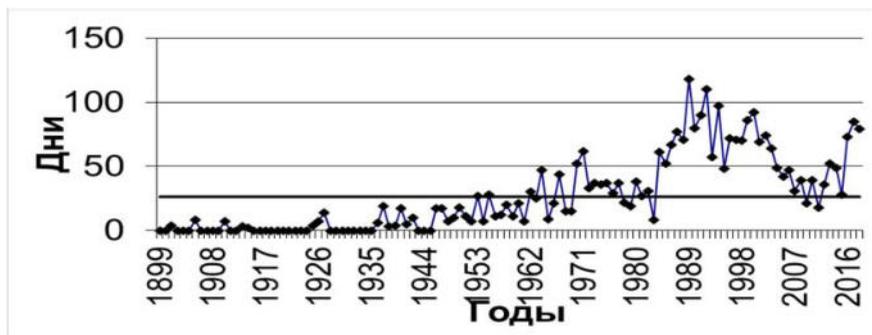


Рис. 9. Суммарная годовая продолжительность ЭЦМ 13л за 1899–2018 гг. [3]

Выводы

В результате проведенного анализа выявлено, что наибольшее количество катастрофических наводнений в России происходит при ЭЦМ тёплого полугодия 9а, 12а и 13л. Рост их суммарной продолжительности привёл к росту повторяемости южных циклонов в разных

регионах России. Это в свою очередь приводит к росту опасности наводнений на территории России. На картах среднемесячного атмосферного давления и картах аномалий давления видны области понижения давления в местах частых выходов южных циклонов в соответствующие месяцы. Если учесть, что наводнениям подвержено 70 % [1] территории России, то это серьёзная опасность для населения.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Института географии РАН, проект № . 0148-2019-0009.

Список литературы

1. Воробьев Ю. Л. Акимов В. А. Соколов Ю. И. Катастрофические наводнения начала XXI в. Уроки и выводы. М. : Дзекс-пресс, 2003. 352 с.
2. Дзержевский Б. Л., Курганская В. М., Витвицкая З. М. Типизация циркуляционных механизмов в северном полушарии и характеристика синоптических сезонов // Тр. науч.-исслед. учреждений Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Сер. 2: Синоптическая метеорология ; вып. 21: Центральный институт прогнозов. М. ; Л. : Гидрометиздат, 1946. 80 с.
3. Кононова Н. К. Колебания циркуляции атмосферы в XX – начале XXI в. [Электронный ресурс]. URL: www.atmospheric-circulation.ru (15.03.2019).
4. Новости погоды. URL: <http://www.meteonovosti.ru> (20.03.2019).
5. Савина С. С., Хмелевская Л. В. Динамика атмосферных процессов северного полушария в XX столетии // Междудементственный Геофизический комитет при Президиуме Академии наук СССР : материалы метеорол. исслед. М., 1984. № 9. 146 с.

УДК 911.2

Влияние опасных гидрометеорологических явлений и процессов на хозяйственную деятельность человека на прибрежных рекреационных территориях России

А. Ю. Санин (eather86@mail.ru)

Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова, г. Москва

Аннотация. Для прибрежных рекреационных территорий России, под которыми здесь понимаются участки берегов морей и крупных внутренних водоемов, для которых характерна массовая рекреация, выявлены и коротко охарактеризованы свойственные им неблагоприятные и опасные явления природы (НОЯ), как гидрометеорологические, так и связанные с ними геолого-геоморфологические. Особое внимание уделялось тем из них, которые приводят к наибольшему материальному ущербу и человеческим жертвам. Для большинства НОЯ предложены меры борьбы с ними или рекомендации по минимизации их негативных последствий.

Ключевые слова: неблагоприятные и опасные явления природы, рекреация, побережье морей, побережье внутренних водоемов, рекреационный потенциал, склоновые процессы, абразия берегов, шторма, сгонно-нагонные явления.

Эффективное управление природопользованием на прибрежных рекреационных территориях Российской Федерации невозможно без учета неблагоприятных и опасных явлений и процессов природы (НОЯ), в частности, гидрометеорологических. Они затрудняют и удорожают хозяйственное освоение таких территорий, заметно снижают их рекреационный потенциал, а во многих случаях приводят к существенному материальному ущербу и даже к человеческим жертвам.

Разумеется, неблагоприятные и опасные явления природы имеют место на всей территории Российской Федерации, однако наибольший ущерб они приносят, как правило, в густонаселенных районах с интенсивной хозяйственной деятельностью. С интенсификацией хозяйственного освоения территории растет и ущерб от типичных для нее НОЯ как для инженерных сооружений, так и для здоровья и жизни рекреантов и местных жителей даже при отсутствии тенденции к активизации НОЯ. К районам с интенсивной хозяйственной деятельностью относятся и прибрежные рекреационные территории на морях и некоторых внутренних водных объектах, которые в силу природной ценности, в частности, благоприятного климата и высокой эстетической ценности, являются весьма привлекательными для проживания и для хозяйственной деятельности, поэтому и НОЯ здесь наносят особенно заметный ущерб.

К прибрежным рекреационным территориям, на которых в наибольшей степени развит купально-пляжный туризм, в Российской Федерации относятся:

1. Черноморское побережье Кавказа, особенно на участке Туапсе – Адлер.
2. Крым, в особенности его южный берег.
3. Восточное побережье Азовского моря в пределах РФ.
4. Балтийское побережье в пределах Калининградской и Ленинградской областей.
5. Каспийское побережье (Лагань и окрестности в Астраханской области, побережье Дагестана).
6. Побережье Японского моря в пределах южной части Приморского края в окрестностях Владивостока.
7. Берега рек, озер, водохранилищ, особенно в пределах крупных городов и их окрестностей (примеры: Волга, особенно в нижнем течении, и, как минимум, часть побережий большинства созданных на них водохранилищ, Дон, особенно в окрестностях Ростова, участки рек в пределах крупных городов, особенно в южной части страны и т. д.)

По происхождению неблагоприятные и опасные природные явления (НОЯ) разделяются на:

- геолого-геоморфологические;
- климатические (связанные с ними гидрологические);
- биогеохимические;
- биологические;
- космические [1].

При использовании этой классификации гидрометеорологические явления можно считать синонимом климатических. Однако они в большей или меньшей степени связаны с остальными группами опасных природных явлений по происхождению, за исключением космических, и являются причиной или одной из причин многих из них. Так, к геолого-геоморфологическим относятся процессы абразии и размыва берегов, оползни, лавины, водная и ветровая эрозия, обвалы и камнепады, обрушение и подвижки ледников, карстовые просадки, сели и землетрясения, цунами, извержения вулканов и др. Из них лишь землетрясения и вызываемые ими цунами, а также извержения вулканов (не свойственные прибрежным рекреационным территориям, на Камчатке и Курильских островах, для которых они характерны, массовая рекреация в настоящее время отсутствует) не связаны с климатом территории. Даже частота обвалов и камнепадов во многом зависит от скоростей физического выветривания, которые, в свою очередь, во многом определяются частотой перехода от отрицательных температур к положительным, и амплитудой суточных температур. В случае активного физического выветривания на склонах быстро накапливается значительное количество незакрепленного обломочного материала, который сползает вниз. Не случайно Щукиным И. С. были выделены даже пояса денудации (выветривания), исходя из особенностей климата [15]. Для оползней и селей гидрометеорологические явления (дожди, особенно ливневые, затяжные и тем более затяжные ливневые одновременно) являются «спусковым крючком», без них они невозможны, так же соотносятся лавины и обильные снегопады. Так, в феврале 1952 г. выпало вдвое больше обычного количества осадков, особенно интенсивно они выпадали в конце месяца, и только за один день, 24 февраля, возникло 58 новых оползней и активизировалось 66 уже существующих. Для районов Туапсе и Новороссийска отмечена активизация селей после выпадения 100 мм и более осадков за сутки [10]. Даже названия процессов водной (и линейной, и плоскостной) и ветровой эрозии указывают на гидрометеорологические явления, их вызывающие. Наконец, абразионные процессы невозмож-

ны без волнового воздействия, а волны генерируются еще одним гидрометеорологическим явлением – ветром. Часто их даже относят к климатическим НОЯ, хотя исходя из их воздействия на рельеф и результатов такого воздействия их следует все же считать геолого-геоморфологическими.

Ниже, в табл. 1, приводятся основные неблагоприятные и опасные явления, в наибольшей степени свойственные прибрежным рекреационным территориям Российской Федерации.

Таблица 1

НОЯ, наиболее характерные для прибрежных рекреационных районов Российской Федерации

Прибрежный регион России	Наиболее типичные гидрометеорологические неблагоприятные и опасные явления, свойственные региону	Наиболее типичные геолого-геоморфологические неблагоприятные и опасные явления, свойственные региону	Возможные меры по борьбе с НОЯ и минимизации ущерба от них
Южный берег Крыма	Апвеллинг холодных вод в береговой зоне, грозы, штормы, резкие скачки атмосферного давления и влажности, засухи, грады	Обвалы, камнепады, оползни (в том числе техногенные) и оплывины, сели (особенно в Юго-Восточном Крыму) абразионные процессы (0,1–0,3 м в год [7; 9]) землетрясения (которые, в свою очередь, являются «спусковым крючком» для обвалов и оползней [4; 9]), карстовые процессы (как правило, на смежных с береговой зоной участках)	Минимизация хозяйственного использования участков берега с наиболее активным проявлением перечисленных процессов (в частности, отсутствие капитального строительства на нем), создание берегоукрепительных сооружений (и обеспечение функционирования уже имеющихся). Учет сейсмической опасности при строительстве любых инженерных сооружений. Запрет капитального строительства в зоне пляжей и в долинах рек с повышенной селеопасностью
Западный берег и все остальное побережье Крыма	Штормовые явления, экстремальная жара, засухи и пыльные бури	Оползни и оплывины, абразионные процессы (скорости отступления берега на некоторых участках достигают 1 м в год и более [7]), водная эрозия	Минимизация хозяйственного использования участков берега с наиболее активным проявлением перечисленных процессов, создание искусственных пляжей, запрет капитального строительства в пределах пляжей
Черноморское побережье Кавказа	Ливневые осадки и грозы, смерчи, наводнения, нагоны в устьях крупных рек, экстремально высокие температуры, засухи, резкие скачки атмосферного давления и влажности, морские штормы, в окрест-	Сели, снежные лавины, обвалы и камнепады, оползни (в том числе техногенные) и оплывины абразионные процессы, сейсмическая угроза. Оползневые процессы особенно активно проявляются в южной части Большого Сочи, где пораженность склонов	Ограничение строительства в долинах балок, для которых сели свойственны в наибольшей мере, информирование населения о мерах безопасности при лавинах и борьба с ними на тех участках, на которых они угрожают жизни и здоровью людей, зданиям и сооружениям. Укрепления участков берегов, на которых склоновые процес-

	ностях Новороссийска – бора	оползнями достигает 50–80 % [10]. Сели встречаются сравнительно нечасто, но наносят заметный материальный ущерб, вплоть до прекращения на некоторое время движения пассажирских поездов, как это было в Широкой Балке около Новороссийска в 2002 г. [3], а также приводят к человеческим жертвам. Мощность селей достигает 100 тыс. м ³ и более [10]. Оползни и сели провоцируются и техногенным фактором, в частности, сведением лесов и подрезкой склонов при строительстве дорог	сы и абразия угрожают здоровью и жизни рекреантов. Мониторинг железных и автомобильных дорог на участках, подверженных оползневым процессам. Запрет капитального строительства в зоне пляжей
Азовское побережье в пределах территории РФ (в том числе Таганрогский залив)	Штормы, сильные ветра (в том числе и, так как называемый отжимной, который может приводить к смертям среди рекреантам, плохо умеющим плавать) экстремальные температуры, засухи, суховеи, грозы, ледовые торосы	Сгонно-нагонные явления, абразийные процессы. Скорость отступления берегов на некоторых участках здесь имеет большие значения, чем на берегах всех стальных рекреационных приморских территорий, до нескольких метров в год. Оползни в пределах берегового уступа	Соблюдение мер безопасности для избегания человеческих жертв во время штормов. Избегания размещения инженерных сооружений вблизи уреза моря на абразийных участках берегов и вблизи них (с учетом значительных скоростей абразии). Берегоукрепительные работы, в частности, создание искусственных пляжей на тех участках, где это необходимо
Каспийское побережье	Сильные ветра, шторма, пыльные бури, суховеи, экстремально жаркие температуры, засухи	Изменение уровня моря, абразия, склоновые процессы на берегах и в горных районах, примыкающих к берегам. Сгонно-нагонные явления, штормовые явления, заметные колебания уровня моря (только за 1975–1995 гг. он поднялся на 2 м [14])	Хозяйственное освоение с учетом значительной амплитуды как краткосрочных (сгонно-нагонных), так и долгосрочных (изменение уровня моря за десятки лет) колебаний уровня моря, защита от изменения уровня моря наиболее важных участков (строительство дамб и т. д.). Позиционирование региона как «осеннего» курорта для избегания рекреантами жарких температур
Балтийское побережье в Калининградской и Ленинградской области	Шторма, метели, снегопады, туманы, обледенение, ледовые торосы. Особенно опасными являются сгон-	Абразийные процессы, склоновые процессы на береговом уступе, водная эрозия	Создание защитных дамб для наиболее важных участков берега за защиты от сгонно-нагонных явлений, берегоукрепление на отдельных участках, избегание использо-

	но-нагонные явления, которые накладываются на шторма, приводят к подъему уровня на 3–4 м и более [5]		вания участков с наибольшим проявлением НОЯ
Побережье Японского моря в районе Владивостока	Шторма, грозы, ливни, ледовые торосы, цунами. Высота цунами, которые неоднократно регистрировались за последние 100 лет, достигала нескольких метров, теоретически возможны и более высокие цунами [8]	Абразионные процессы, сели, склоновые процессы на берегах и на смежной территории, водная эрозия	Поддержание в рабочем состоянии системы предупреждения населения о приближении цунами и информирование о порядке действий в этом случае, берегоукрепительные работы, при необходимости, избегания хозяйственного освоения участков с наиболее выраженными НОЯ
Побережья внутренних водоемов – рек, озер и водохранилищ, активно используемые для рекреации	Зависит от региона: могут проявляться все вышеперечисленные неблагоприятные и опасные явления природы	Оползневые процессы на берегах, абразия и размыв берегов, затопление и подтопление, заболачивание и зарастание прибрежных вод гидрофильной растительностью	Избегание использования участков с наиболее хорошо выраженными оползневыми процессами, недопущение сооружения инженерных сооружений в непосредственной близости от уреза воды на участках с сильными процессами абразии и размыва берегов, мониторинг НОЯ там, где они в наибольшей степени угрожают рекреантам и местным жителям

Гидрометеорологические НОЯ часто напрямую не воздействуют на жизнь и здоровье местных жителей и рекреантов, но могут существенно снижать качества отдыха. В пример можно привести экстремально высокие температуры, характерные для всех побережий Черного моря, а также Азовского и особенно Каспийского (они являются одной из причин, замедляющих его рекреационное освоение), имеющие место повсеместно, но особенно на Европейском юге РФ сильные ветра и следующие за ним шторма (которые препятствуют купанию, впрочем они же ежегодно приводят и к смертным случаям среди рекреантов), апвеллинг холодных вод на южном берегу Крыма, которые затрудняет на несколько дней купание в море. Все это учитывается при оценке рекреационного потенциала регионов, ведь они могут существенно снизить качество отдыха либо вовсе отпугнуть рекреантов.

Несмотря на то что воздействие НОЯ на рекреантов – преимущественно отрицательное явление, здесь можно выделить и одно поло-

жительное следствие. На текущий момент туристические потоки в пределах многих рекреационных территорий вследствие их внутренних различий, как природных, так и в уровне развития инфраструктуры, а также сложившейся репутации их отдельных частей распределены крайне неравномерно. Так в Крыму значительная часть рекреантов ориентируется на Южный берег полуострова, особенно на окрестности Ялты, а это всего несколько процентов от береговой линии. На Северокавказском побережье многие рекреанты предпочитают останавливаться не дальше, чем в нескольких десятках километров от центра Сочи, в Ленинградской области – недалеко от Санкт-Петербурга и т. д. Но часто именно для этих регионов воздействие НОЯ также наибольшее. Если избегать территорий с наибольшим развитием НОЯ, это может стимулировать к освоению новых участков берега и более равномерному перераспределению туристического потока внутри рекреационных территорий, что благоприятно как для сохранения их природных ландшафтов, так и местной экономики, на которую рекреация воздействует благоприятно. Так, несколько раз за лето на Южном берегу Крыма имеет место апвеллинг – подъем глубинных холодных вод, в результате которого температура воды снижается до 12–15 °. Несколько дней для рекреантов купания в морской воде становятся невозможными или затруднительными, однако если в это время обеспечить их трансфер и пребывание на Западном берегу Крыма, на котором такое явление не наблюдается, они бы смогли продолжить отдых сравнительно комфортно. Возможен также вариант с временным трансфером на Керченский полуостров. В настоящее время и Западный Крым, и Керченский полуостров по своей популярности среди рекреантов заметно уступают Южному берегу Крыма.

Наибольшую угрозу для прибрежной рекреации, по всей видимости, представляют совокупность неблагоприятных и опасных явлений природы, свойственных Черноморскому побережью Кавказа и Крыма. Во-первых, Крым и Краснодарский край посещается в последние годы в совокупности как минимум 15–17 млн организованных и неорганизованных туристов, из которых большинство посещают именно морское побережье. Во-вторых, для региона характер разнообразный рельеф, значительная часть побережья относится к горным территориям, и это единственная из всех приморских рекреационных территорий, для которых имеет место сейсмическая угроза (для авкаторий большинства внутренних водоемов сейсмическая угроза тоже отсутствует). Сильные землетрясения случаются достаточно редко, но даже слабые, едва ощутимые подземные толчки могут спровоцировать об-

валы, оползни и лавины, тем самым причиняя материальный ущерб, а также представляя угрозу здоровью и жизни рекреантам. Интенсивность НОЯ на Северокавказском побережье увеличивает и значительное количество осадков, до 3000 мм [10], не характерное для любой другой прибрежно-рекреационной территории, а также неравномерный характер их выпадения – в какие-то дни может выпасть до несколько сот миллиметров осадков в сутки. В некоторых случаях осадки проходят в виде гроз и сопровождаются смерчами, в том числе и на пляжной зоне отдыха, что представляет непосредственную угрозу для здоровья и жизни отдыхающих и местных жителей. Вследствие обильных осадков возникают наводнения, которые затапливают жилые здания и сооружения, дороги, серьезно повреждая их, приводят как к человеческим жертвам, так и материальному ущербу. Сильные наводнения, как правило, бывают на реках каждые два-три года, раз в 7 лет они приобретают катастрофический характер. Так, в результате сильного наводнения (по некоторым данным, самого масштабного в регионе за 30 лет) 25 октября 2018 г. в Туапсе несколько южнее города, на участке Шепси-Водопадный были повреждены железнодорожная и автомобильная дорога, вследствие чего г. Сочи и Большой Сочи на достаточно длительное время оказались отрезанными от остальной территории Краснодарского края. Наводнение было обусловлено выпадением 100–200 мм и более осадков (в зависимости от места) в регионе за сутки.

Из таблицы видно, что перечень неблагоприятных и опасных явлений природы, как гидрометеорологических, так и геолого-геоморфологических для перечисленных территорий во многом схож. Различие во многом обусловлены рельефом, если общий характер рельефа горный, к имеющимся НОЯ добавляется еще склоновые процессы, сели, в некоторых случаях-угроза землетрясения. На перечень НОЯ оказывают влияние климатические особенности, а также морфометрия морских бассейнов, обуславливающая сильные сгонно-нагонные явления в Финском заливе и Азовском море, особенно в его Таганрогском заливе. Так, для побережья Азовского моря они достигают 4 м и более [12]. Сгонно-нагонные явления также характерны для Каспийского моря. Другая особенность Азовского моря – высокие скорости абразионных процессов, на некоторых участках – до 5–8 м, в среднем – 2–4 м и менее в год [12; 13]. Особенностью дальневосточного региона является опасности цунами. На интенсивность склоновых процессов оказывает влияние крутизна склонов, интенсивность и

частота выпадения осадков (особенно для оползней, активизация которых часто является следствием сильных ливней).

Есть два принципиально различных подхода в борьбе с НОЯ, угрожающим жизни и здоровью людей и нанесением материального ущерба. Первый состоит в том, чтоб, несмотря на воздействие НОЯ, продолжать хозяйственную деятельность, при этом различными техническими методами и средствами бороться с проявлением НОЯ и минимизировать риски от них. Этот подход сравнительно хорошо согласуется с так называемым географическим нигилизмом, который в системы общество-природа ставит общество на первое место. Его преимуществом является сохранение возможности использования привлекательных для человека участков прибрежной территории, которые подвержены воздействию НОЯ, недостатками: высокие затраты на борьбу с НОЯ, и сохранением рисков и для жизни и здоровья человека, и для инфраструктурных объектов, при нынешнем уровне технического развития их можно снизить, но нельзя исключить полностью. Второй принципиальный подход борьбы с НОЯ предполагает минимизацию хозяйственной деятельности на участках, в наибольшей степени подверженных НОЯ, вплоть до переноса имеющихся инфраструктурных объектов за их пределы (в частности, построенных около уреза моря на абразионных берегах, или на оползнях на склонах), особенно если их ценность незначительна. Во многих случаях это позволяет сэкономить определенные средства, а главное – сохранить жизни и здоровье людей. Однако во всех случаях такой подход также не применим – иначе, например, так бы и не были бы построены автомобильные и железные дороги на Крымском и Кавказском побережье, ведь они постоянно подвержены воздействию склоновых процессов на ряде участков, а железная дорога на участке Туапсе-Адлер (и далее до грузинско-турецкой границы) – еще и абразии. Но важность этих путей сообщения для организации рекреации и иных видов деятельности в регионах и стратегическая важность для страны в целом (что показал, в частности, конфликт в Северной Осетии в 2008 г., которому сопутствовало обострение обстановки и в Абхазии – именно по прибрежным дорогам туда перебрасывались войска и военная техника) обуславливает необходимость поддержания их нормального функционирования даже несмотря на сложности, связанные с воздействием НОЯ.

Для осуществления управления природопользованием в прибрежных рекреационных территориях, подверженных НОЯ, необходимо комбинировать и первый, и второй подход для минимизации затрат и угрозы для жизни и здоровья человека. При этом соотношение

мер и действий, относящихся к первому и ко второму подходу, индивидуально для каждого участка берега.

Как следует из табл. 1, для большинства рекреационных приморских районов меры противодействия неблагоприятным и опасным явлениям также схожи. Можно выделить такие общие для всех перечисленных районов меры:

1. Минимизация (по возможности) хозяйственного использования участков побережья, на которых неблагоприятные и опасные явления природы проявляются наиболее остро. К ним относятся, в частности, днища балок, особенно их устьевые части, выходящие к морскому побережью (именно в такой части Широкой балки случилась катастрофа в 2002 г., но в силу равнинного характера рельефа и близости к морю такие участки являются привлекательными для хозяйственного освоения), участки берега с активными абразионными процессами, оползневые склоны (активность оползней в прибрежной зоне даже получила отражение в топонимике, так в Крыму есть село Оползневое на Южном берегу) и т. д.

2. Информирование рекреантов и местных жителей (последние, впрочем, как правило, имеют намного лучшее представление об угрозах со стороны НОЯ, чем рекреанты) о рисках и опасностях, обусловленных неблагоприятными и опасными явлениями природы. Так, перед приближением цунами вода отступает, что привлекает рекреантов исследовать обнажившееся дно вместо необходимой поспешной эвакуации на возвышенную территорию, подходящие к берегу смерчи могут стать объектом фотосъемки, а штормовые волны побуждают некоторых рекреантов купаться в море, несмотря на риск.

3. Борьба за самые привлекательные для хозяйственной деятельности участки берега с НОЯ: осуществление берегоукрепительных работ (могут быть применены методы так называемого мягкого и жесткого берегоукрепления), противооползневые меры и т. д.

4. Запрет капитального строительства в зоне пляжей в связи с угрозой со стороны штормовых волн, а в некоторых случаях и сгонно-нагонных явлений для таких инженерных сооружений на морских побережьях и на берегах крупных внутренних водоемов.

5. Мониторинг НОЯ на тех участках, на которых они в наибольшей степени угрожают рекреантам и местным жителям.

Климатические изменения приводят к активизации многих неблагоприятных и опасных склоновых процессов, особенно это проявляется на Черном и Балтийском морях. Ожидается усиление штормовой активности как минимум для Черноморского бассейна, а также

некоторое увеличение количества выпадающих осадков [6]. Для Северокавказского побережья ожидается увеличение количества осадков в зимнее время, что неизбежно повлечет за собой активизация оползневых и селевых процессов [10]. Негативные последствия климатических изменений (например, повышение экстремальных температур летом, которое ожидается для Каспийского и, возможно, для Черноморского и Азовского побережья, для Нижнего Дона и Нижней Волги и др.) ожидаются и для других прибрежных рекреационных регионов, что усложняет управления природопользованием на них и повышает уровень рисков как для рекреационной, так и для иных видов хозяйственной деятельности, равно как и для здоровья как местных жителей, так и в особенности рекреантов, в подавляющем большинстве привычных к более низким температурам.

Увеличение активности НОЯ может быть обусловлено не только климатическими изменениями, но и антропогенной деятельностью. И по миру, и по России имеются множество примеров активизации наводнений и склоновых процессов в результате сведения лесной растительности на склонах. Строительство на склонах дорог и прочих инженерных сооружений приводит к подрезке склонов, что обуславливает активизации оползневых процессов (для Черноморского побережья это было отмечено, в частности, для Южного берега Крыма [7]. Изъятие материала со дна в пределах береговой зоны и строительство на берегах активизирует абразионные процессы, что было отмечено, в частности, для Черноморского побережья Крыма и Кавказа [11]. Ввод в эксплуатацию Комплекса защитных сооружений (КЗС) для предотвращения негативных воздействия сгонно-нагонных и штормовых явлений в Санкт-Петербурге в 2011 г. активизировал воздействие этих НОЯ на побережье Финского залива западнее КЗС, на котором расположены рекреационные поселки и города (Сестрорецк, Комарово, Ушково и т. д.) [5]. Примеров, подтверждающих антропогенное влияние на активизацию НОЯ в прибрежных рекреационных территориях множество, выше приведены лишь несколько из них. Необходимо также заметить, что активное хозяйственное освоение прибрежных территорий даже при сохранении интенсивности НОЯ на текущем уровне неизбежно приведет к увеличению числа и человеческих жертв, и объему материального ущерба, так как НОЯ затронут больше инженерных сооружений, рекреантов и местного населения в связи с увеличением их количества. Так, на побережьях Восточно-Сибирского и Японского моря также имеют место НОЯ, однако приносимый ими

ущерб сравнительно незначительный в связи со слабой освоенностью побережий этих морей.

Список литературы

1. *Акимов В. А., Лесных В. В., Радаев Н. Н.* Риски в природе, техносфере, обществе и экономике. МЧС России. М. : Делов. экспресс, 2004. 352 с.
2. *Архипова О. Е., Черногубова Е. А., Тарасова Т. Т.* Природные опасные явления в морской прибрежной зоне: обзор методов и подходов // Экология, экономика и информатика. Сер. Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2018. Т. 1, № 3. С. 128–134.
3. *Баринев А. Ю.* Геоморфологический анализ ливневой селеопасности Черноморского побережья Кавказа в пределах береговых морфосистем. // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита : тр. Междунар. конф. Пятигорск : Ин-т Севкавгипроводхоз, 2008. С. 59–61.
4. *Благоволин Н. С.* Сейсмоструктурные и сейсмогравитационные процессы в Горном Крыму // Геоморфология. 1993. № 2. С. 49–56.
5. *Гордеева С. М., Малинин В. Н.* Изменчивость морского уровня Финского залива. СПб. : Изд. РГГМУ, 2014. 179 с.
6. *Горячкин Ю. Н., Иванов В. А.* Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 210 с.
7. *Игнатов Е. И., Орлова М. С., Санин А. Ю.* Береговые морфосистемы Крыма. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. 267 с.
8. Геоморфологические проблемы цунамиопасности / Е. И. Игнатов, В. В. Фроль, М. Ю. Лохин, А. В. Никифоров. Смоленск : Маджента, 2008. 128 с.
9. *Клюкин А. А.* Экзогеодинамика Крыма. Симферополь : Таврия, 2007. 320 с.
10. *Мальнева И. В.* Активность селей и оползней на Черноморском побережье Кавказа и прилегающих горных районах в начале XXI в. URL: <https://docplayer.ru/31661558-Aktivnost-seley-i-opolzney-na-chernomorskom-poberezhe-kavkaza-i-prilegayushchih-gornyh-rayonah-v-nachale-xxi-veka.html> (дата обращения: 14.03.2019).
11. *Пешков В. М.* Береговая зона моря. Краснодар : Лаконт, 2003. 360 с.
12. Природные опасности России : в 6 т. / под ред. В. М. Кутелова, А. И. Шеко. М. : Крук, 2002. 348 с.
13. *Разумов В. В., Глушко А. Я.* Деградация земель прибрежной территории субъектов юга России под воздействием абразионных процессов. URL: <https://www.vestnik-mgou.ru/Articles/Doc/192>. (дата обращения: 24.03.2019).
14. *Сафьянов Г. А.* Геоморфология морских берегов. М., 1996. 400 с.
15. *Щукин И. С.* Общая геоморфология. М. : Изд-во МГУ, 1960. Т. 1. 616 с.

УДК 551.578.482

Оценка лавинной и селевой опасности небольших горных бассейнов Узбекистана на основе численного моделирования в программе RAMMS

Э. Р. Семакова (ella9sem@gmail.com)¹А. С. Попов²В. Сафронов²Д. Г. Семаков¹У. Bühler³¹ *Астрономический институт им. Улугбека Академии наук РУз,**г. Ташкент, Узбекистан*² *Центр гидрометеорологической службы при МЧС РУз, г. Ташкент, Узбекистан*³ *Швейцарский институт снеголавинных исследований SLF/WSL, г. Давос, Швейцария*

Аннотация. Приведены подходы к моделированию снежных лавин и селевых потоков с использованием программы RAMMS для оценки природной опасности в горных районах РУз.

Ключевые слова: снежные лавины, селевые потоки, RAMMS, моделирование, Узбекистан.

Как показывают многолетние наблюдения за селевыми потоками и снежными лавинами [1; 8], все горно-предгорные реки в Узбекистане, включая временные водотоки и сухие лога (саи), являются селеопасными. Эта же территория является лавиноопасной. Лавинная деятельность проявляется практически повсеместно там, где есть крутые горные склоны, и залегает снежный покров достаточной мощности. Таким образом, к потенциально опасным зонам следует отнести всю горную и предгорную зоны РУз. Для оценки природного риска и обеспечения соответствующих защитных мер на определенных небольших территориях, необходимо знать такие параметры движущегося потока, как область его поражения, дальность выброса заданной обеспеченности, толщина отложений, максимальная скорость, высота потока и сила удара при заданных снежных и метеорологических условиях. Основываясь на специализированных наблюдениях, в мировой практике используют различные подходы для определения этих параметров, с применением технологий геоинформационных систем, эмпирических и теоретических моделей. В частности, гидравлическая модель плотных лавинных и селевых потоков реализована в программе RAMMS (Rapid Mass Movements Simulations), разработанной Швейцарским институтом снеголавинных исследований, в виде двух

модулей AVALANCHE и DEBRIS FLOW [10]. Также имеются модули для моделирования движения оползней и камнепадов, HILLSLOPE и ROCKFALL, соответственно. Программа предусматривает калибровку коэффициентов сухого и турбулентного жидкостного трения для селевых и лавинных потоков, использует теорию взаимодействия двухкомпонентных систем, с вычислением трехточечного или четырехточечного входного гидрографа; механику твердого тела в исследованиях опасных геологических процессов. Исходной информацией служат данные из зоны формирования опасных процессов, это количество и тип осадков, толщина ступени отрыва, состав горных пород, растительности и почв, данные расходов воды, физико-механических свойств снега, показателей режима (например, объем и повторяемость схода лавин), и др. В процессе анализа топографических данных (угла наклона, высоты местности, кривизны), необходима цифровая модель рельефа (ЦМР) достаточной точности и экстенда, чтобы адекватно описать движение потока (потоков) от начала движения до его остановки на заданном участке. Кроме того, ЦМР должна быть проверена на наличие аномалий и артефактов, прежде чем будет использована в численном моделировании [9]. Программа позволяет получать продольные и поперечные профили рассчитанных параметров, провести оценку их изменения в зависимости от наличия дамбы или другого препятствия, интегрировать результаты, в том числе в виде анимации, в любые ГИС-системы и рабочие документы.

Районами исследования являлись хорошо изученные лавиносборы в зонах обслуживания действующих снеговалинных станций (СЛС) Чимган и Камчик, а также водосборы с известными случаями схода паводков и гляциальных селей.

Зона отдыха урочища Чимган, расположенного в отрогах Чаткальского хребта горной системы Западного Тянь-Шаня, хорошо известна любителям горного туризма и альпинизма, горнолыжникам и сноубордистам. В зоне действия лавин редкой повторяемости, сходящих с горы Большой Чимган, находятся автодорога Ташкент-Бричмулла с мостом через реку Аксай, нижние станции канатных дорог, часть горнолыжных трасс и здание проката. Используемая версия RAMMS рассматривает, в основном, такие случаи лавин, с частотой схода 1 раз в 10 лет, в 30, 100 и 300 лет, с различными категориями объемов, включая до 5 тыс., 5–25 тыс., 25–60 тыс. и более 60 тыс. м³. Таким образом, можно дать оценку безопасности этих объектов и выявить условия, при которых этим объектам будет угрожать опасность. Рассматривались случаи схода катастрофических лавин, которые при-

водили к ущербу строений или жертвам, начиная с 1980-х гг., периода создания снеголавинной станции (категории: 1 раз в 10 и 30 лет), а также исторические данные, собранные по рассказам старожилов (1 раз в 30–50 лет). Согласно периоду схода, это были сухие лавины свежеснежавшего снега. Критерием оценки результатов моделирования служила длина пробега лавины, зона ее поражения и факт попадания в эту зону дороги, ручья, моста, построек, опоры канатной дороги. Для построения ЦМР с разрешением 10 м использовалась условная топографическая карта-схема М 1 : 25 000. Эта же ЦМР служила основой для создания карт высоты снега различной обеспеченности [3] и частоты поражения лавинами [2]. В результате соответствия рассчитанной дальности пробега лавины фактической было допущено, что рекомендованные в программе коэффициенты трения, определяемые в зависимости от морфометрических характеристик рельефа, растительности, категории лавин по частоте схода и объему, могут быть использованы и для данных местных условий, и также, для моделирования других категорий лавин, например, влажных лавин небольшого объема, наиболее часто встречающихся с февраля по апрель в последние годы, когда горожане предпочитают «поймать еще зиму» в горах. Во время экспедиционных наблюдений нами проводились замеры параметров отложений (длины, высоты, толщины) адвекционных лавин, сошедших 15.02.2017 и 22.03.2017, в лавиносборе площадью 0,5 км², объемом 8 000 и 4 000 м³, оценивалась площадь зоны зарождения, высота и форма отрыва (2100 м, линия и 2300 м, точка, переходящая в линию), толщина ступени отрыва (60 и 30 см), ширина зоны транзита, высота остановки (1750 и 1850 м), длина пробега лавины (1250 и 1040 м), форма конуса отложений, принимались во внимание сопутствующие метеорологические условия и высота свежеснежавшего снега в зоне отрыва. Очевидно, что точность определения многих параметров зависит от экспертной оценки, однако, учитывая многолетний опыт наблюдателей и неизменные приборы измерений, можно утверждать об однородности ряда наблюдений и минимальной ошибке за фактор субъективности. Анализируя среднюю температуру января на метеоплощадке (-3 °С), февраля – (-2°С), а также эти величины в многолетии, получено, что потепление или похолодание всего на 2–3 ° кардинально меняет лавинную ситуацию до высот 2000–2500 м. В итоге, в зимние месяцы могут сходить адвекционные (влажные) лавины, в весенние – сухие, в высотной зоне до 3300 м. За период 14.02–15.02.2017, по данным метеоплощадки, установленной на высоте 1670 м, выпадали смешанные осадки, преобладающие в твердом виде,

средняя температура воздуха составляла (+1,2 °C), максимальная температура поднималась до (+4 °C), а средняя за 11–13.02.2017 – (-3,5 °C). Прирост высоты снега за 11–13.02.2017 составлял 20 см, а за 14–16.02.2017 – (-10 см). Во время схода второй лавины, 22.03.2017 г., сумма жидких осадков оказалась равной 45 мм, средняя температура за два дня – (+5,5 °C), высота снега за 21–22.03 уменьшилась на 15 см.

Зона поражения и толщина отложений смоделированных лавин совпадала с фактической, которая, очевидно, несколько меньше зоны поражения сухих лавин, сошедших в условиях устойчивых отрицательных температур, в силу сцепления снега и температуры снежной толщи. Основным фактором, влияющим на площадь охвата и дальность выброса, как сухих, так и мокрых лавин свежевыпавшего снега, являлись положение и толщина ступени зоны отрыва. Изменение плотности снега в лавине почти не влияло на результаты моделирования, и была принятой 300 кг/м³. Дальнейшие исследования могут быть связаны с использованием новой версии программы RAMMS, EXTENDED, с возможностью использования параметров влажности, температуры снега и других свойств снега, определение которых, вероятно, возможно в случае установки автоматической метеостанции в верхней части лавиносбора, использования программы SNOWPACK, позволяющей наблюдать за развитием стратиграфии снежной толщи в зависимости от метеопараметров и прогнозировать наступление лавинной опасности, и осуществления поиска связей исследуемых величин в зоне отрыва и на метеорологической площадке снеголавинной станции.

Второй район лавинных исследований, район перевала Камчик (бассейн реки Ахангаран, система Западного Тянь-Шаня), характеризуется широким антропогенным воздействием в связи со строительством новых автомобильных и железных дорог между двумя густонаселенными административными областями республики, прокладкой газопроводов и размещением соответствующей инфраструктуры. В целях защиты от лавин здесь предусмотрено лавинное прогнозирование, профилактический спуск лавин и различные инженерные сооружения: лавинные навесы, галереи и туннели, снегоудерживающие щиты на склонах, задерживающие насыпи, отводящие и лавиноостанавливающие дамбы и лавинорезы [7]. По данным наблюдений СЛС Камчик, обслуживающей безопасность района с 1965 г., получены индикаторные показатели климата, определяющие снеголавинный режим данного района [5]. Лавины сходят здесь почти ежегодно, с ноября по апрель, в период залегания устойчивого снежного покрова [1]. По генетическому типу это, в основном, лавины свежевыпавшего и

метелевого снега. Ветровая деятельность оказывает существенное влияние на перераспределение снега во время и после снегопадов. Поскольку защитные сооружения препятствуют выходу лавин на дорогу, то максимальная дальность выброса лавин не может служить критерием сравнения рассчитанной величины с фактической. Здесь также отсутствуют наблюдения за скоростью, давлением и высотой лавинных потоков, чтобы можно было надежно калибровать коэффициенты трения. Кроме того, топографическая карта-схема, используемая в работе СЛС, не отражала изменений в рельефе, произошедших в последние годы, поэтому в качестве ЦМР необходимо было использовать обновленные высотные данные. Было решено использовать несколько видов спутниковых данных различного разрешения и периода съемки для построения ЦМР, чтобы выбрать ту, которая при заданных коэффициентах трения наилучшим бы образом описывала движение лавины. В итоге, мы использовали данные радиолокационной интерферометрической съемки TerraSAR-X/ TanDEM-X, оптической съемки ALOS/PRISM, готовую ЦМР ALOS PALSAR [11] на разные периоды съемки, а также ЦМР Торо, построенную по оцифрованным горизонталям и речной сети топокарты. Методика построения ЦМР и их совмещения относительно данных лазерной альтиметрии GLAS/ ICESat с рассчитанной оценкой точности приведена в работах [6; 12]. На примере лавиносбора площадью 40 га, где установлена лавиноостанавливающая дамба для защиты новой автодороги, выбран случай естественного схода сухой лавины свежевывающего снега в безветренных условиях по старой поверхности снега. Толщина ступени отрыва составляла 25 см при общей высоте снега 50 см, на высоте 2400 м, с ориентацией склона 22°. Длина пробега лавины составляла 470 м. Местоположением зоны отложений являлась дамба, при этом участок старой дороги длиной 0,048 км оказался засыпан лавиной. Формой конуса отложений являлась трапеция; примерная длина, ширина, толщина и объем отложений составляли 50, 20, 3 м и 3000 м³.

Частота схода таких лавин – в среднем 2–3 раза в год из 3 камер зарождения, в максимальные по снежности годы – до 15 лавин в год. Задавая одинаковые входные параметры модели из зоны отрыва лавин, категорий лавин, плотности снега, численных расчетных схем и эрозионных типов рельефа, мы для всех сценариев расчета меняли только цифровую модель рельефа. Результаты моделирования показали, что наилучшим соответствием фактическим наблюдениям является сценарий расчета с использованием ЦМР с разрешением 10 м, построенной по данным TerraSAR-X/ TanDEM-X. Длина пробега лавины

оказалась равной 470 м, лавина остановилась перед дамбой, засыпав участок старой дороги на 45 м. В других случаях параметры моделируемой лавины оказались несколько больше, либо по ширине в зоне транзита, либо по дальности пробега. Сравнивая ЦМР ALOS PALSAR за различные даты съемки [13], было получено совпадение результатов моделирования по форме зоны поражения и длине пробега, и небольшое различие в значениях скорости потока, высоты потока и силы удара вдоль движения потока при использовании ЦМР зимних периодов съемки, и заметное различие формы пробега лавины, и соответственно других динамических показателей при использовании ЦМР летней даты съемки. Это вызвано тем, что предыдущий сход лавин или перераспределение снега в результате ветровой деятельности могут значительно менять поверхность местности. При возможности, в дальнейшем, предпочтительнее использовать ЦМР зимнего периода съемки для моделирования лавинных процессов. Также рассматривались случаи схода лавин в соседних лавиноборах, где установлены галерея, обеспечивающая защиту дороги на въезде в тоннель, лавинорезы, или снегоудерживающие щиты в зонах отрыва. Среди них были лавины лотковые, в редких случаях небольшие осовы. Моделировались случаи ежегодного схода небольших лавин с толщиной ступени отрыва от 20 до 40 см и редких лавин (раз в 30 лет) с толщиной отрыва в 1,6 м при высоте снега более 2,5 м на подветренных склонах. В крупном лавиноборе, с несколькими зонами зарождения, все используемые ЦМР практически одинаково отображали конус выноса лавин, когда они достигали ручья. В целом, рассчитываемые параметры динамики лавин наилучшим образом соответствовали фактическим при использовании ЦМР, построенной по данным TerraSAR-X/ TanDEM-X зимней даты съемки. Таким образом, рекомендованные в программе RAMMS коэффициенты трения (вариабельный режим их вычислений) пригодны для моделирования любого типа и размера лавин на основе использования данной цифровой модели рельефа, и в дальнейшем, работу можно продолжить для оценки эффективности защитных сооружений в других лавиноборах района, что послужит повышению безопасности важнейшей горной дороги Узбекистана.

Численное моделирование селевых потоков проводилось для случая селя, сформированного ливневыми осадками 28.06.2015 г. на водотоке Ирташсай в бассейне реки Ахангаран и для потенциально возможных гляциальных селей в случае прорыва ледниковых озер [4; 12]. Коэффициенты трения в модуле DEBRIS FLOW могут быть откалиброваны также по визуальным признакам прошедших селей: высо-

ты потока, примерной его скорости, составе обломочного материала, параметров эрозии, наносов. Для селя Ирташсай, первый случай, и для случая возможного прорыва ледниковых озер в долине р. Тегермеч, верховье р. Исфайрамсай, Кыргызстан, второй случай, мы приняли коэффициенты сухого и жидкостного трения, равными 0,1 и 500 м/с², соответственно. В первом случае, начальные условия заданы гидрографом (объем, равный 190000 м³, расход воды – 1000 м³/с, начальная скорость – 10 м/с, плотность – 1500 кг/м³), во втором – блочным отрывом, полагая что объемом (12 млн м³) будет являться вся вода, содержащаяся в 12 озерах долины, общей площадью 0,78 км², обнаруженных в летний период 2017 г. по снимкам Landsat и Sentinel-2A. Часть этих озер прорываются от 2–3 до 5–6 раз за 10 лет, другие озера являются нестационарными, появляются периодически, наполняются внезапно, за 1–3 месяца один раз в 5–20 лет. Очевидно, что ЦМР для моделирования селевых потоков должна быть более высокого разрешения, чем для моделирования движения снежных лавин, однако, за неимением таковой, мы выбрали ЦМР ALOS PALSAR с разрешением 12,5 м.

Длина рассматриваемого пути в первом случае составляла 11 км, во втором – 80 км. Критерием остановки моделирования являлась слабая интенсивность потока. Рассчитанная высота потока в зоне выноса селевого потока Ирташсай соответствует фактической; сел прошел под дорожным мостом и влился в мощный поток реки Ахангаран; часть селевых отложений распределилась по руслу водотока, основная часть – в принимающей реке, либо уносясь ее течением (взаимодействие с этим течением не учитывалось). Во втором случае, моделируемый поток прошел 45 км и остановился на высоте 1200 м, не достигая населенных пунктов в приграничной зоне. Вероятно, в 1960-х гг., когда было эвакуировано население, селевой поток по реке Исфайрамсай включал сели и с других боковых притоков, которые могли являться «спусковым крючком» селей, больших по порядку, водотоков.

На примере моренных озер Озерное верхнее и нижнее, расположенных в верховьях р. Ойгаинг (бассейн р. Пскем, Узбекистан), где проводились экспедиционные наблюдения за состоянием их плотин, GPS-съемки озер и концов ледников, метеорологические измерения и оценка изменения электропроводности при фильтрации воды через плотину, мы рассмотрели возможную дальность пробега селевого потока в случае их прорыва. Учитывая параметры озер и их максимальную глубину, мы задавали различные коэффициенты трения на основе ЦМР, построенной по тандемным данным. Получено, что вода из

озер, в основном, разливается по дну кара (рис. 1, а), т. е. озера можно считать неопасными. В случае же выпадения достаточно большого количества жидких осадков, значительного повышения температуры воздуха и усиленного таяния ледников, при значениях коэффициентов сухого и жидкостного трения, равными 0,05 и 500 м/с², соответственно, может возникнуть селевой поток, который захватит по пути потоки с нижележащих озер и достигнет дна водосбора (рис. 1, б). При слиянии с такими же потоками из соседних водосборов, сель может быть опасным. Очевидно, такой сценарий является маловероятным, тем не менее, своевременная и всесторонняя оценка риска таких озер должна рассматривать скорость сокращения площади и понижения поверхности ледников, скорость химического выветривания морены, отделяющей верхнее озеро от нижнего, и таяния ледяного ядра в плотине, а также шероховатость окружающей поверхности. Моделирование движения селевых потоков на основе ЦМР высокого разрешения в этом случае играет важную роль для оценки дальности их распространения и площади поражаемых территорий.

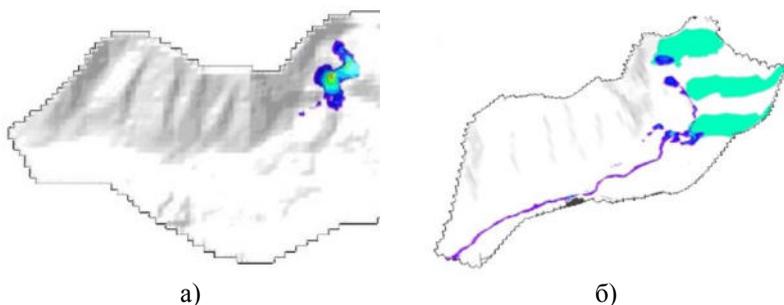


Рис. 1. Динамическое моделирование возможного селевого потока при коэффициентах сухого (μ_0) и жидкостного (турбулентного) χ_1 трения:

а) μ_0 : 0,2, χ_1 : 200 м/с², б) μ_0 : 0,05, χ_1 : 500 м/с²

Работы выполнены при поддержке Академии наук РВз, Swiss National Science Foundation и German Aerospace Center (DLR) (проекты ФА-Amex-2018-392, SNF SCOPES IZ74Z0_160463/1 и XTI_GLAC6758). Данные ALOS/PRISM предоставлены японским аэрокосмическим агентством JAXA благодаря минипроекту в GIC AIT. ЦМР ALOS PALSAR DEM является продуктом Центра архивных данных ASF DAAC.

Список литературы

1. Лавины Узбекистана / Р. С. Батыров, Е. Г. Какурина, Ф. И. Перцигер, Э. Р. Семакова, Г. Н. Старыгин, А. В. Яковлев. Ташкент : САНИГМИ, 2003. 118 с.
2. *Исаев А. А., Какурина Е. Г., Перцигер Ф. И.* Технология построения крупномасштабной карты частоты поражения лавинами // Тр. САНИГМИ. 2001. Вып. 161(242). С. 43–54.
3. *Какурина Е. Г., Перцигер Ф. И., Яковлев А. В.* Опыт построения крупномасштабной карты высоты снежного покрова // Тр. САНИГМИ. 2001. Вып. 161(242). С. 83–95.
4. Методы дистанционного зондирования и численного моделирования для изучения селевых потоков в бассейнах рек Ахангаран и Тегермеч / Э. Семакова, Ё. Алимов, Л. Сычугова, Д. Семаков, К. Граф // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита : тр. 5-й Междунар. конф. (Тбилиси, Грузия, 1–5 окт. 2018 г.). Тбилиси, 2018. С. 571–575.
5. *Семакова Э. Р., Карандаев С. В., Тарасов Ю. А.* Индикационные показатели климата и рельефа, определяющие снеголавинный режим района перевала Камчик // Тр. НИГМИ. 2010. Вып. 16(261). С. 96–102.
6. *Семакова Э. Р., Семаков Д. Г.* Примеры использования данных лазерной альтиметрии в сравнительной оценке наборов высотных данных // Сб. материалов XII Междунар. науч. конгресса Интерэкспо ГЕО-Сибирь. Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. С. 17–20.
7. *Старыгин Г. Н., Карандаев С. В., Карандаева Л. М.* Инженерная противолавинная защита автодороги Ташкент-Ош в районе перевала Камчик // Тр. НИГМИ. 2010. Вып. 16(261). С. 103–109.
8. *Чуб В. Е., Трофимов Г. Н., Имамджанов Х. А.* Селевые потоки в Узбекистане // Материалы II Всерос. конф. по селям. (Нальчик, 26–28 окт. 2005 г.). Нальчик, 2005. С. 42–44.
9. *Bühler Y., Christen M., Kowalski J. and Bartelt P.* Sensitivity of snow avalanche simulations to digital elevation model quality and resolution / *Annals of Glaciology*, 2011. 52(58), pp. 72–80.
10. Integral hazard management using a unified software environment: numerical simulation tool «RAMMS» for gravitational natural hazards / M. Christen, Y. Bühler, P. Bartelt, R. Leine, J. Glover, A. Schweizer, C. Graf, B. W. McARDell, W. Gerber, Y. Deubelbeiss, T. Feistl, A. Volkwein / Proc. of the 12th Congress INTERPRAEVENT, Grenoble, France. 2012. Vol. 1. P. 77–86.
11. *Dataset: ASF DAAC 2015, ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res*; Includes Material © JAXA/METI 2007. Accessed through ASF DAAC, 2017.
12. *Semakova E., Bühler Y.* TerraSAR-X/ TanDEM-X data for natural hazards research in mountainous regions of Uzbekistan / *Journal of Applied Remote Sensing, SPIE*, 11(3), 036024 (2017), doi: 10.1117/1.JRS.11.036024.
13. Applying numerical snow avalanche simulations for hazard assessment in the Kamchik pass area, Uzbekistan / E. Semakova, V. Safronov, A. Mamaraimov, B. Nurtaev, D. Semakov, Y. Bühler // Proceedings of ISSW. A merging of Theory and Practice (Innsbruck, Austria, 7–13 oct. 2018). Innsbruck, 2018. P. 701–705.

ПОГОДА И КЛИМАТ. МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

УДК 551.513(571.1)

Каталог атмосферных осадков и их статистические характеристики для бассейна р. Селенги (июль)

О. Ю. Антохина (olgayumarchenko@gmail.com)¹

П. Н. Антохин (apn@iao.ru)¹

Ю. В. Мартынова (foxyj13@gmail.com)^{2,3}

¹ *Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск*

² *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск*

³ *Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, г. Новосибирск*

Аннотация. На основании новых версий данных GPCC (The Global Precipitation Climatology Centre), выпущенных в июне 2018 г. каталогизирован ряд сведений относительно выпадения осадков в бассейне р. Селенги в июле. В работе приводятся сведения о суточной динамике количества осадков за каждый июль в период 1982–2018 гг. Особое внимание обращено на периоды длительной нехватки осадков, а также случаи выпадения осадков 90-го перцентиля и выше. Также приведены сведения о преобладающих режимах выпадения осадков в бассейне Селенги на основании разложения на ЕОФ (естественные ортогональные функции) полей осадков в области 96–114 в. д., 46–53 с. ш. Выявлены три преобладающих режима колебания осадков, вбирающих суммарно 56 % от суммарной изменчивости. На основе сжатия информации при помощи ЕОФ количественно описаны пространственные особенности режимов выпадения осадков в бассейне реки.

Ключевые слова: река Селенга, бассейн озера Байкал, атмосферные осадки, аномалии, GPCC, ЕОФ.

Введение

Актуальность исследования формирования стока и осадков в бассейне Селенги увеличивается с ростом водохозяйственных и экологических проблем, порожденных начавшимся в 1996 г. затяжным маловодьем в бассейне озера Байкал [1; 6; 9; 10]. Река Селенга является

ключевым источником питания озера Байкал. Ее бассейн составляет 83,4 % от всей водосборной площади озера [8] и она обеспечивает в среднем 50 % притока в Байкал [10]. Бассейн реки расположен на границе аридного пояса Азии, вдали от основных источников влаги. Снегозапасы в питании реки менее существенны, так как в зимний период на территории бассейна выпадает крайне мало осадков. Около 70 % годовых сумм осадков приходится на июнь-август и в каждый из этих месяцев может выпадать до 90–100 мм [7]. Основной сток реки формируется с июня по август [7; 10]. В этот же период наблюдаются и максимальные расходы воды, обусловленные дождевыми паводками.

Исследования [1; 7; 10] показали, что наиболее существенные изменения, связанные с осадками (уменьшение) и температурой (увеличения) происходят в середине летнего сезона. Оказалось, что на исследуемой территории эти характеристики тесно связаны, и их изменения происходят синхронно. Кроме того, есть основания полагать, что процессы, отвечающие за выпадение атмосферных осадков в середине лета, отличаются от процессов в начале и конце сезона. Основной особенностью формирования осадков в июле, начале августа является формирования фронта, разделяющего воздушные массы летнего муссона Восточной Азии и умеренных широт [1; 10]. Разумеется, нельзя утверждать, что подобные процессы не получают развития чуть ранее или позднее, но их повторяемость максимальна именно в середине летнего сезона. Таким образом, исследование формирования осадков в середине летнего сезона для бассейна Селенги очень актуально.

Представленная работа является продолжением и дополнением работ [1–3; 7]. Цель данной работы добавление сведений относительно суточной изменчивости осадков в период 1982–2018 гг., описание наиболее экстремальных случаев выпадения осадков и длительных периодов засухи для всей территории бассейна Селенги. С помощью разложения на ЕОФ (естественные ортогональные функции) численно описать особенности режимов выпадения осадков в пределах бассейна. Принципиальным отличием данной работы от [2] является использование сеточных данных, охватывающих весь бассейн Селенги, в работе [Там же] были использованы данные на нескольких станциях из архива [5], причем только на российской территории бассейна.

Данные и методика

Мы используем данные архива атмосферных осадков GPCC (The Global Precipitation Climatology Centre) [11; 13–16]. Использование этих данных обусловлено рядом объективных факторов. В первую очередь необходимо отметить, что эти данные, специально разработанные для исследований в области гидрологии, не являются продуктом моделирования в чистом виде, они основываются на анализе стационарных наблюдений, которые тщательно собираются и проверяются на наличие ошибок с помощью различных тестов. Кроме того, они уже хорошо зарекомендовали себя в исследованиях причин уменьшения стока р. Селенги, продемонстрировав высокие коэффициенты связи с рядами гидрологических данных [10]. Для анализа межсуточной динамики суммарного по бассейну количества осадков были использованы данные GPCC Full Data Daily Product Version 2018 [16] за период 1982–2016. Для анализа 2017 и 2018 гг. использованы данные GPCC First Guess Daily Product [15]. Пространственное разрешение обоих продуктов GPCC составляло $1 \times 1^\circ$, всего в пределах бассейна оказалось 81 узел регулярной сетки. Осадки суммировались в пределах бассейна р. Селенги (рис. 1). Для каждого года строились гистограммы суточной динамики суммарного по бассейну количества осадков. На основе анализа полученных гистограмм были выделены периоды с положительными и отрицательными аномалиями количества осадков.

К периодам с большим количеством осадков отнесены даты, в которые выпадали осадки выше 90-го перцентиля. К периодам с малым количеством осадков относились интервалы времени больше 7 дней, во время которых суммарное количество осадков не превышало 200 мм (P200). В один из дней этого периода осадки могли быть выше 200 мм, но не более 400 мм. В среднем, для таких периодов количество осадков составило 1000 мм за 9 дней, годы с двумя такими периодами в течение июля были отнесены к группе с осадками ниже нормы, годы с одним периодом – к группе с осадками около нормы, реже – к группе с осадками выше нормы (1994, 1998).

В работе также приводится разложение полей осадков на естественные ортогональные функции (ЕОФ) на основе данных GPCC Full Data Monthly Product Version 2018 (V_2018) 1891–2016 [14]. Значимость выделенных режимов определялась по правилу, приведенному в [12]. Согласно этой работе атмосферные и океанографические процессы обычно «красные», что означает, что большая часть дисперсии (мощности) содержится в первых нескольких режимах, с наибольшим вкладом. Разложение выполнено для периода 1979–2016 гг.

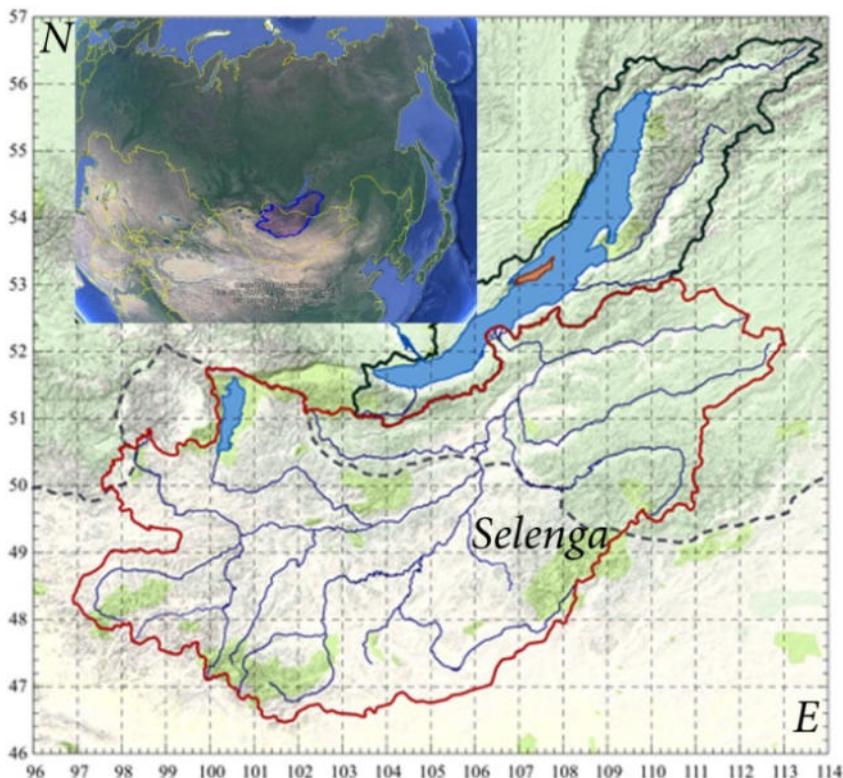


Рис. 1. Бассейн р. Селенги (красная линия) и обзорная карта на основе Google Earth (бассейн Селенги – синяя линия)

Результаты

На рисунке 2 показаны первые три ЕОФ поля осадков в области 96–114 в. д., 46–53 с. ш. Остальные режимы оказались менее значимыми. Выявлены три преобладающих режима (моды). Первый режим характеризует 28 % суммарной изменчивости осадков в исследуемой области, второй – 17 %, третий – 11 %. Первый режим характеризует две полярные ситуации.

В случае реализации отрицательной фазы первого режима на всей территории бассейна выпадают осадки, положительной – на всей территории аномалия осадков отрицательная. Преобладание второго режима приводит к перераспределению аномалий осадков на территории бассейна. В случае реализации положительной фазы второй моды

положительная аномалия осадков наблюдается на российской территории бассейна, над Монголией условия могут быть близки к средним или же наблюдаться отрицательная аномалия (особенно в юго-западных районах). В случае реализации отрицательной фазы второй моды наблюдается обратная ситуация. В случае ярко выраженной третьей моды, по сравнению со слабыми первыми двумя, также наблюдается два полюса. В случае положительных значений третьей моды осадки выпадают за пределами бассейна (в районе Читы), а на его территории может быть мало осадков. В случае отрицательной реализации второй моды – много осадков выпадает в районе Хамар-Дабана, и его окрестностях, на большей части бассейна в этом случае осадки либо около нормы, либо ниже нормы. В целом все зависит от величины вклада каждой моды для каждого июля.

На рисунке 3 приведены гистограммы изменчивости каждой моды для каждого года, а также график аномалий месячного количества осадков по данным работы [1]. Рассмотрим несколько примеров, чтобы показать, как следует интерпретировать полученные результаты. В 1990 г. наблюдалась самое большое количество осадков в рассматриваемый период. Из рассматриваемых трех режимов только первый имел достаточно большую амплитуду. Его значения были отрицательны, что говорит о том, что положительная аномалия осадков была характерна для всего бассейна. В 1993 г. втором по величине осадков, первые два режима были значимы. Их величины показывают, что осадки выпадали по всей территории бассейна, но их максимумы были существенно смещены на монгольскую часть. В 2000 г. наиболее значимым был второй режим – с положительным значением, а это значит, что осадки преимущественно выпадали на российской части бассейна.

На рисунке 4 показаны гистограммы суточной динамики количества осадков в бассейне, разными цветами обозначены июли с разными отклонениями от среднего (на основе рис. 3), синим цветом – аномалия выше нормы, зеленым цветом – около нормы, желтым цветом – ниже нормы. Синей линией, отмечен порог, выше которого находятся величины с 90-го перцентиля. Красными прямоугольниками обозначены периоды P200. Всего проанализировано 1147 дней.

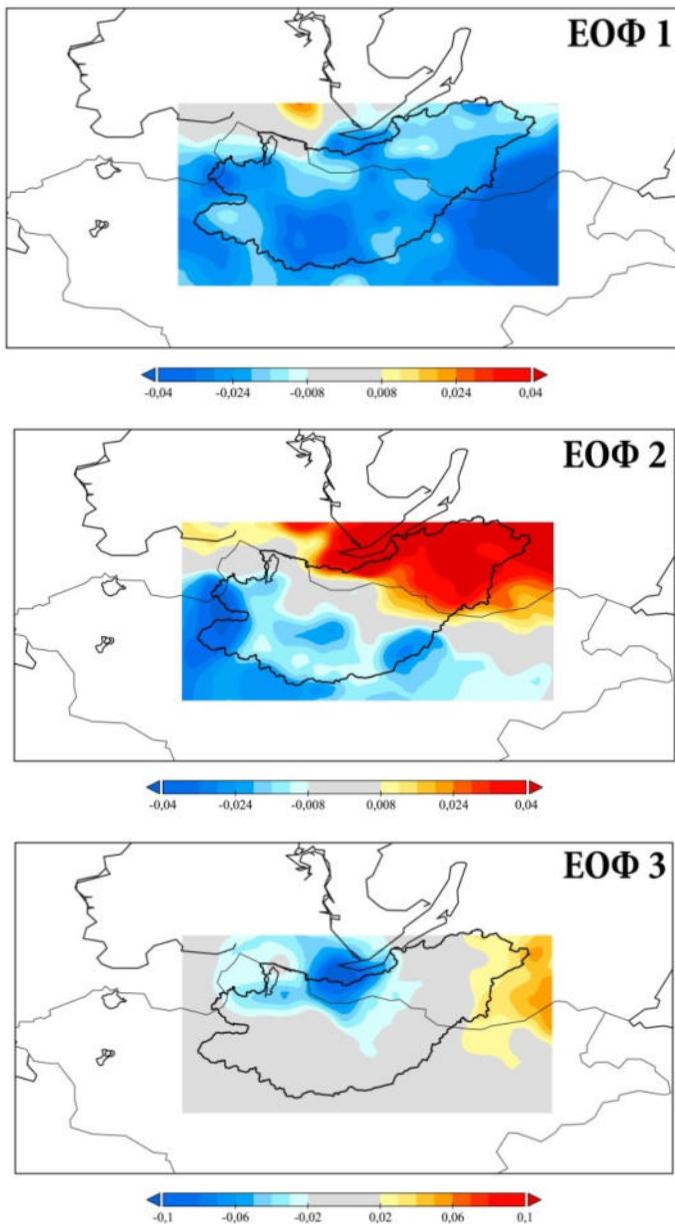


Рис. 2. Первые три ЕОФ поля осадков области в области 96–114 в. д., 46–53 с. ш.

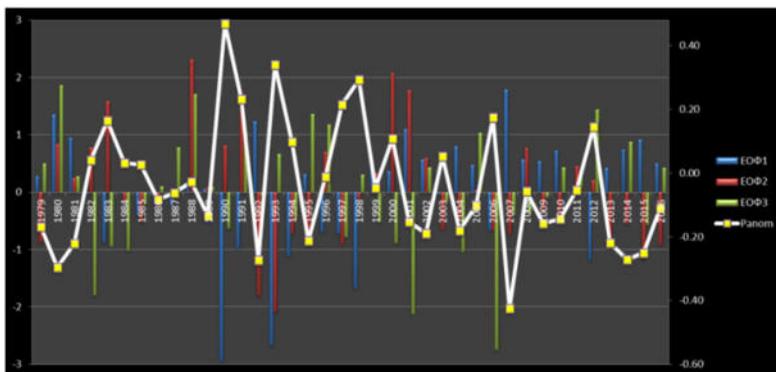
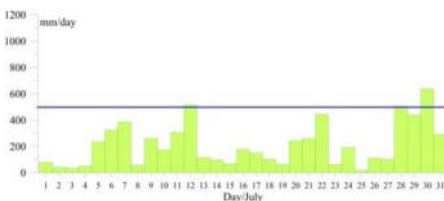
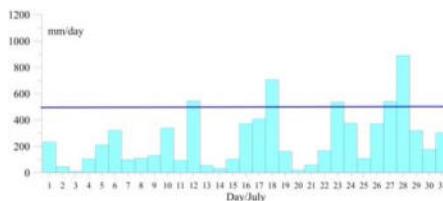


Рис. 3. Изменчивость величин первых ЕОФ в разложении поля осадков в бассейне Селенги, а также аномалий количества осадков в период 1979–2016

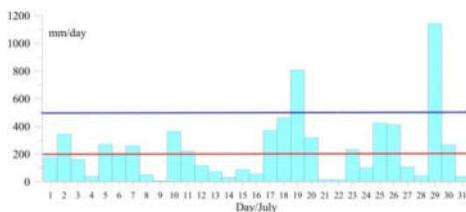
1982



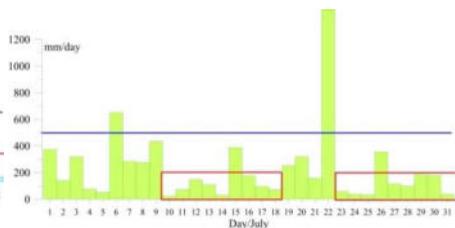
1983



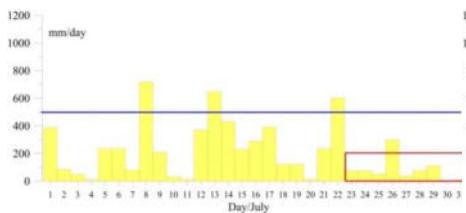
1984



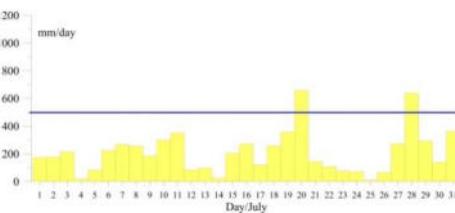
1985



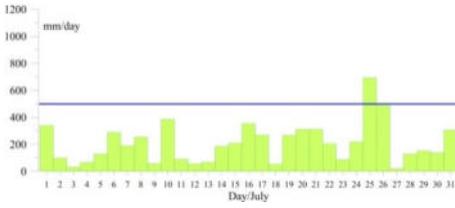
1986



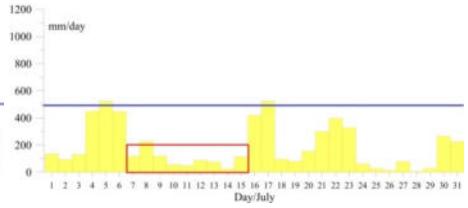
1987



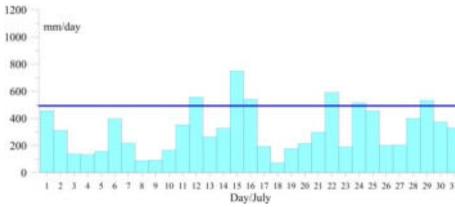
1988



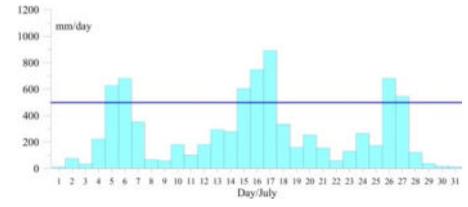
1989



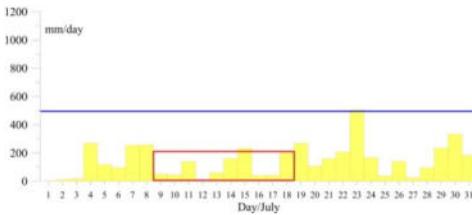
1990



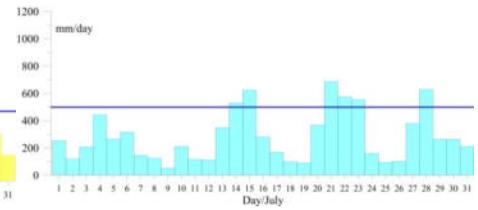
1991



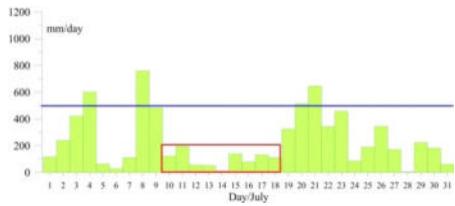
1992



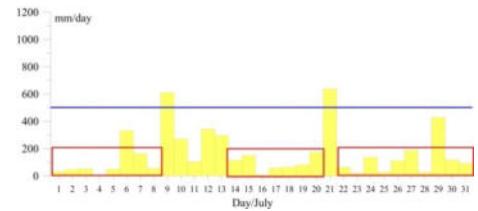
1993



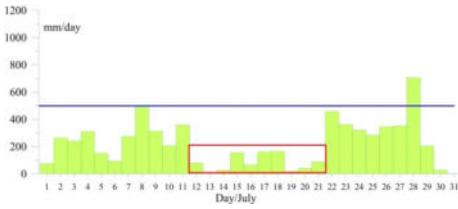
1994



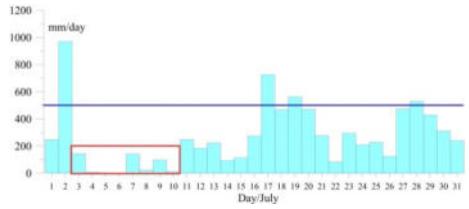
1995



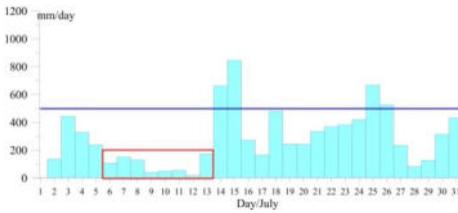
1996



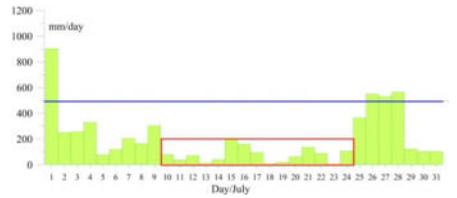
1997



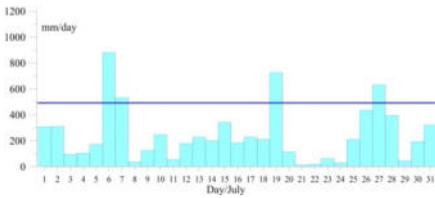
1998



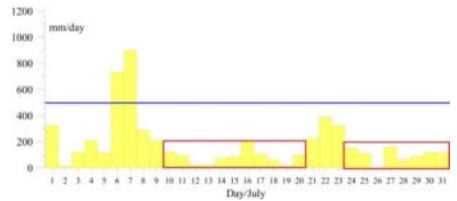
1999



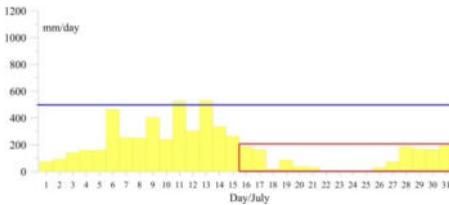
2000



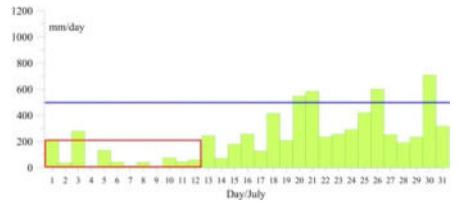
2001



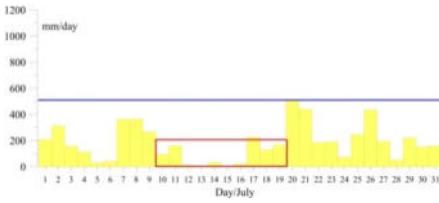
2002



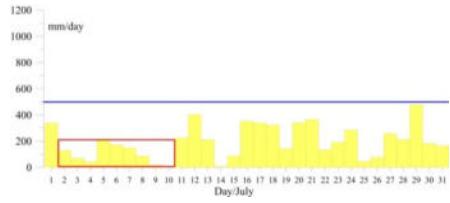
2003



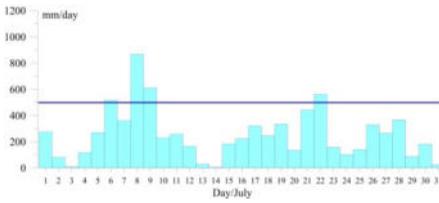
2004



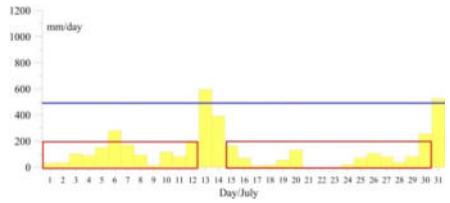
2005



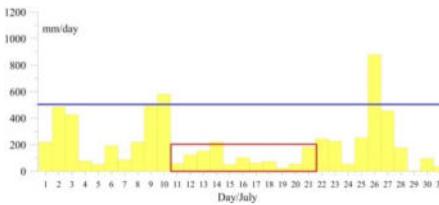
2006



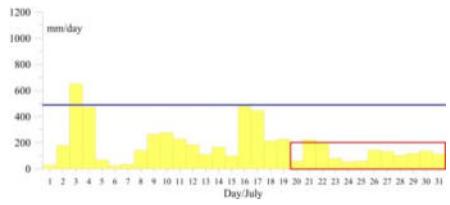
2007



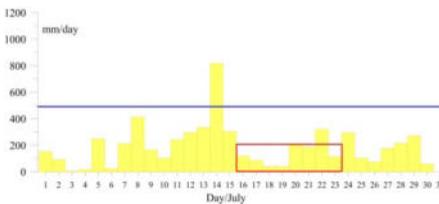
2008



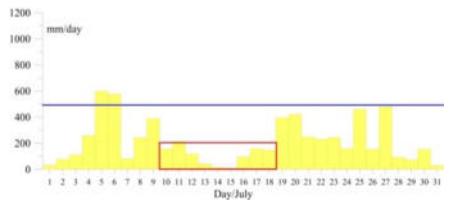
2009



2010



2011



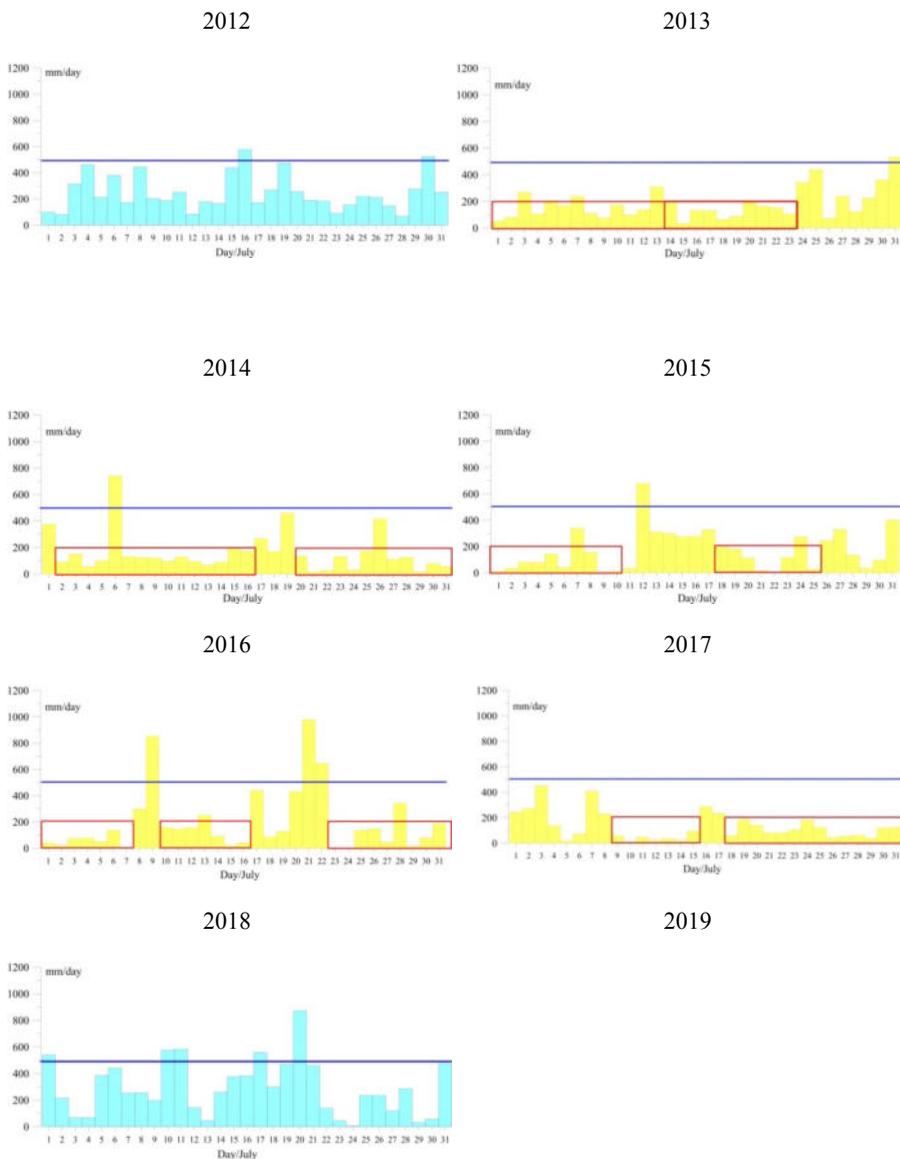


Рис. 4. Динамика выпадения осадков в бассейне Селенги.
Синяя линия 90-ый процентиль, красные прямоугольники периоды P200

Заключение

В работе проведено исследование июльских осадков в бассейне Селенги, исследование является продолжением и дополнением цикла работ [1–3; 7]. На основании новых версий данных GPCC (The Global Precipitation Climatology Centre), выпущенных в июне 2018 г. [14–16] каталогизирован ряд сведений относительно выпадения осадков в бассейне р. Селенги в июле. В работе приводятся сведения о суточной динамике количества осадков за каждый июль в период в период 1982–2018 гг. Особое внимание обращено на периоды длительной нехватки осадков, а также случаи выпадения осадков 90-го перцентиля и выше. Также приведены сведения о преобладающих режимах выпадения осадков в бассейне Селенги на основании разложения на ЕОФ (естественные ортогональные функции) полей осадков в области 96–114 в. д., 46–53 с. ш. Выявлены три преобладающих режима колебания осадков, вбирающих суммарно 56 % от суммарной изменчивости. На основе сжатия информации при помощи ЕОФ мы смогли количественно описать пространственные особенности режимов выпадения осадков в бассейне реки.

Таблица 1

События 95-го перцентиля

Дата	Р, мм	Дата	Р, мм	Дата	Р, мм
30.07.1982	637,3	17.07.1991	890,1	06.07.2001	734,2
18.07.1983	706,8	26.07.1991	680,2	07.07.2001	902,3
28.07.1983	891,9	15.07.1993	623,0	21.07.2003	583,7
19.07.1984	806,3	21.07.1993	686,4	26.07.2003	600,4
29.07.1984	1143,0	28.07.1993	628,2	30.07.2003	708,6
06.07.1985	650,4	04.07.1994	601,3	08.07.2006	868,1
22.07.1985	1426,8	08.07.1994	759,6	09.07.2006	611,9
08.07.1986	719,6	21.07.1994	645,1	13.07.2007	597,2
13.07.1986	647,1	09.07.1995	610,3	10.07.2008	581,8
22.07.1986	603,4	21.07.1995	637,2	26.07.2008	880,4
20.07.1987	657,0	28.07.1996	705,1	03.07.2009	650,9
28.07.1987	637,8	02.07.1997	969,9	14.07.2010	819,3
25.07.1988	693,0	17.07.1997	725,5	06.07.2014	740,6
29.07.1988	637,3	14.07.1998	662,2	12.07.2015	680,9
15.07.1990	748,5	15.07.1998	845,9	09.07.2016	853,0
22.07.1990	590,6	25.07.1998	667,5	21.07.2016	977,5
05.07.1991	625,2	01.07.1999	903,9	22.07.2016	646,0
06.07.1991	680,7	06.07.2000	880,5	11.07.2018	583,5
15.07.1991	603,9	19.07.2000	725,3	20.07.2018	873,1
16.07.1991	746,2	27.07.2000	631,6		

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда проект № 17-77-10035.

Авторы выражают благодарность Осипчуку Е. Н. за подготовку данных о границах водосборного бассейна и речной сети р. Селенга.

Список литературы

1. Антохина О. Ю. Особенности крупномасштабной циркуляции атмосферы над Евразией и атмосферные осадки в бассейне р. Селенги в середине летнего сезона // География и природные ресурсы. 2019. (В печати).
2. Антохина О. Ю., Антохин П. Н. Исследование долговременных изменений и особенностей выпадения атмосферных осадков в бассейне р. Селенги в середине летнего сезона (июль) // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : Всерос. науч.-практ. конф. (21–23 марта 2018 г.). 2018. С.441–449.
3. Основные режимы выпадения осадков на юге Восточной Сибири и в Монголии в июле / О. Ю. Антохина, П. Н. Антохин, Е. В. Девятова, Ю. В. Мартынова, В. И. Мордвинов // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 06. С. 443–450.
4. Афанасьев А. Н. Водные ресурсы и водный баланс бассейна оз. Байкал. Новосибирск : Наука, 1976. 238 с.
5. Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Александрова Т. М. Описание массива суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR) [Электронный ресурс]. URL:<http://aisori.meteo.ru/ClimateR>.
6. Возможные изменения гидрологических характеристик в связи с регулированием стока в бассейне реки Селенги / И. В. Бычков, В. М. Никитин, Н. В. Абасов, Т. В. Бережных, И. И. Максимова, Е. Н. Осипчук // География и природ. ресурсы. 2017. № 3. С. 75–86.
7. Марченко О. Ю., Мордвинов В. И., Антохин П. Н. Исследование долговременной изменчивости и условий формирования атмосферных осадков в бассейне р. Селенги // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1084–1090.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР. Л. : Гидрометеиздат, 1973. Т. 16, вып. 3. 400 с.
9. Сутырина Е. Н. Реакция стока р. Селенги на изменение интенсивности осадков и состояния водосборного бассейна // Изв. ИГУ. 2015. Т. 13. Сер. Науки о Земле. С. 120–130.
10. Changes in the summertime atmospheric circulation over East Asia and formation of long-lasting low-water periods within the Selenga river basin / T. V. Berezhnykh, O. Yu. Marchenko, V. I. Mordvinov, N. V. Abasov // Geography and Natural Resources. 2012. Vol. 33, N 3. P. 223–229.
11. GPCC The Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) данные Визуализация и скачивание [Электронный ресурс]. URL ftp://ftp-anon.dwd.de/pub/data/gpcc/html/download_gate.html.
12. North G. R. Bell T. L., Cahalan R. F. Sampling Errors in the Estimation of Empirical Orthogonal Functions // Monthly Weather Review. 1982. Vol. 110, N 7. P. 699–706.
13. GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle / U. Schneider [et al.] // Theoretical and Applied Climatology. 2013. Vol. 115, N 1–2. P. 15–40.
14. GPCC Full Data Monthly Product Version 2018 at 1.0°/ U. Schneider, A. Becker, P. Finger, A. Meyer-Christoffer, M. Ziese // Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historical Data. 2018.
15. GPCC First Guess Product at 1.0°/ M. Ziese, A. Becker, P. Finger, A. Meyer-Christoffer, B. Rudolf, U. Schneider // Near Real-Time First Guess monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges based on SYNOP. 2011 Data.
16. GPCC Full Data Daily Version.2018 at 1.0°/ M. Rauthe-Schöch, A. Ziese, A. Becker, P. Finger, A. Meyer-Christoffer, B. Rudolf, U. Schneider // Daily Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data. 2018.

УДК 551.513(571.1)

Особенности крупномасштабных волновых процессов в атмосфере над Евразией в периоды возникновения экстремальных природных пожаров в Сибири и на Дальнем Востоке

О. Ю. Антохина (olgayumarchenko@gmail.com)¹

П. Н. Антохин (apn@iao.ru)¹

И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru)²

В.И. Мордвинов (v_mordv@iszf.irk.ru)³

¹ *Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск*

² *Иркутский государственный университет, г. Иркутск*

³ *Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск*

Аннотация. Исследованы условия циркуляции атмосферы, способствующие возникновению катастрофических природных пожаров в 1998, 2012 и 2016 гг. Основное внимание обращено на длинные волны в барическом поле, развивающиеся над Евразией вдоль субтропического струйного течения. Для выделения волновых конфигураций выполнен анализ аномалий потенциальной температуры на динамической тропопause за каждый день с 1 июня по 31 августа относительно средних месячных значений за 1979–2018 гг. Признаком волны считалось появление вдоль струйного течения отчетливо выраженной знакопеременной цепочки аномалий с амплитудой в диапазоне от –40 до +40 К. Появление цугов длинных волн вдоль субтропического струйного течения может вносить существенный вклад в развитие квазистационарных аномалий барического поля, например, блокингов. Блокинги, в свою очередь, являются причиной сильных осадков в одних регионах и засух в других регионах. В литературе описан процесс нелинейной эволюции волн Россби, завершающийся их опрокидыванием и формированием долгоживущих аномалий, который может служить математической моделью наблюдаемых явлений. В реальной атмосфере на распространение и эволюцию длинных волн Россби в субтропиках влияют такие «внешние» факторы, как Полярный вихрь, в ложбинах и гребнях которого происходит встречная адвекция теплых и холодных воздушных масс; а также бегущие волны и вихри, развивающиеся на полярнофронтном струйном течении. Все эти факторы необходимо учитывать при анализе формирования долгоживущих барических аномалий, приводящих к длительной нехватке осадков и возникновению катастрофических пожаров.

Ключевые слова: пожары, атмосферная циркуляция, волны Россби, атмосферное блокирование, аномалии осадков, реанализ.

Введение

Природные пожары оказывают существенное влияние на экосистемы, а также на состав атмосферы [1–3; 5–13; 15; 16; 19; 20; 22–24; 27–29; 31; 33]. В периоды пожаров в атмосферу выбрасывается большое количество парниковых газов и аэрозолей – углекислого газа

(CO₂), метана (CH₄), оксидов азота (NO_x), аммиак (NH₃), неметановых углеводородов (NMHC) и других химических веществ [16]. Изменяя состав атмосферного воздуха, природные пожары могут существенно влиять на региональные и глобальные характеристики климата [15]. Прямые выбросы углерода при сгорании биомассы составляют от 40,0 до 130,0 Мт в год. Значительным может быть воздействие пожаров на тепловой и водный режимы регионов, а также на структуру и функционирование экосистем [12].

Леса Сибири и Дальнего Востока, являющиеся частью бореальной зоны Северного полушария, в последние десятилетия все чаще подвергаются сильным пожарам [8]. По оценкам [8] на территории России доминируют лесные пожары в Восточной Сибири, а в сумме пожары в Западной и Восточной Сибири составляют более половины (55 %) лесных пожаров всей бореальной зоны. Наиболее сильные пожары на территории России отмечаются в восточносибирском и дальневосточном регионах. По оценкам [29] общая прямая эмиссия углерода от горения лесов в Сибири оценивается для среднего сценария в 116 Тг С, а выгоревшая площадь составляет 6,9 млн га (1999 г.), для экстремального сценария эмиссия составляет 520 Тг С, а площадь выгоревших лесов 11,2 млн Га (2002 г.), что эквивалентно 5 и 20 % общей глобальной эмиссии углерода от лесных и степных пожаров, соответственно.

Пожары на территории Сибири и Дальнего Востока возникают каждый теплый сезон, но в некоторые периоды они приобретают катастрофический характер. Наиболее сильные пожары отмечены в 1998 [24; 28; 29], 2002 [11; 29; 31], 2003 [5; 31], 2012 [5; 6; 11; 13; 33], 2014 [22], 2016 [9]. В работе [27] показано, что наиболее сильно пожары в Сибири коррелируют с количеством приходящей солнечной радиацией (0,87–0,97). Известно, что в летний период безоблачная погода с максимумами солнечного излучения приходится на периоды стационарирования антициклонов, формирование гребней и блокингов в средней тропосфере.

Несмотря на многочисленные исследования условий циркуляции атмосферы, способствующих возникновению пожаров в Сибири и на Дальнем Востоке [1-3, 9,10,13, 33], до сих пор нерешенными остается целый ряд вопросов. Неясно, например, как соотносятся между собой региональные и глобальные факторы формирования «пожароопасных» аномалий циркуляции над Сибирью и Дальним Востоком. Под глобальными факторами мы понимаем дальние связи, обусловленные распространением длинных волн Россби. «Опрокидывание» этих

волн, результатом которого могут быть атмосферные блокинги, зависит, в свою очередь, от региональных факторов (например, орографии). В своей работе мы ставим целью исследование крупномасштабных особенностей циркуляции атмосферы над Евразией, влияющих на возникновение пожаров в Сибири и на Дальнем Востоке. Актуальность этой проблемы возрастает с каждым годом, так как в будущем ожидается увеличение количества катастрофических природных пожаров в бореальной зоне из-за того, во-первых, что пожароопасные сезоны будет более теплыми и сухими [7; 19] и, во-вторых, вследствие возрастания повторяемости событий блокирования [9].

Данные и методика

1. Циркуляция атмосферы

В работе мы используем данные архива ECMWF Era-Interim о высоте геопотенциальной поверхности 500 гПа и потенциальной температуре на динамической тропопаузе (PV- θ) [18]. Для идентификации блокингов применяется критерий GHGS, предложенный в работах [25; 30], а затем модифицированный в [14].

$$GHGS = \frac{Z(\varphi_0) - Z(\varphi_s)}{\varphi_0 - \varphi_s}$$

здесь Z – высота геопотенциальной поверхности 500 гПа, $\varphi_n = 80^\circ$ с. ш. $\pm \Delta$, $\varphi_0 = 60^\circ$ с. ш. $\pm \Delta$, $\varphi_s = 40^\circ$ с. ш. $\pm \Delta$, $\Delta = -5^\circ, -2,5^\circ, 0^\circ, 2,5^\circ$ или 5° . Пять значений Δ вдоль каждой долготы при расчетах впервые приняты к использованию в работе [14]. Эта процедура обеспечивает лучшее пространственное разрешение и, следовательно, большие возможности для корректной идентификации блокингов, чем процедура, предложенная в [30].

Выделение цугов длинных волн проводилось с помощью оценок аномалий PV- θ [21] над Северной Атлантикой и Евразией. Аномалии были рассчитаны относительно периода 1979–2017 гг.

2. Анализ возникновения пожаров

В исследовании пожаров мы опираемся на результаты, полученные в предыдущих работах [1,3,9,24]. Для оценок мощности горений используются современные базы данных об эмиссиях от природных пожаров: FLAMBE (Fire Locating and Modeling of Burning Emissions), GFED (Global Fire Emissions Database), FINN (Fire Inventory from NCAR), QFED (Quick Fire Emission Dataset), IS4FIRES. Все эти продукты основаны на спутниковой информации об излучающей мощно-

сти пожаров (ИМП), горячих точках или области выгорания. В представленной работе мы используем также данные эмиссии метана базы GFAS (Global Fire Assimilation System), полученные при помощи спектрорадиометра MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) [23] с разрешением $0,1^\circ$ по широте и долготе. Данные доступны на сайте <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/cams-gfas/> с 2003 г. по настоящее время. Для анализа 1998 использованы месячные данные GFED, основанные на анализе площади выгорания (<https://www.globalfiredata.org/>) с разрешением $2,5^\circ$ [20].

Исследования выполнены для трех лет, аномальных с точки зрения возникновения пожаров: 1998 [24; 28; 29] – пожары в Сибири и аномальные пожары на Дальнем Востоке, 2012 [5; 6; 11; 13; 33] – пожары на Дальнем Востоке, аномальные пожары в Сибири, 2016 [3; 9] – аномальные пожары в Сибири, паводки на Дальнем Востоке.

Результаты

На рисунке 1 приведены области распространения максимальных пожаров для каждого года. В 1998 г. это Дальний Восток, в 2012 г. – Западная Сибирь, в 2016 г. – Восточная Сибирь.

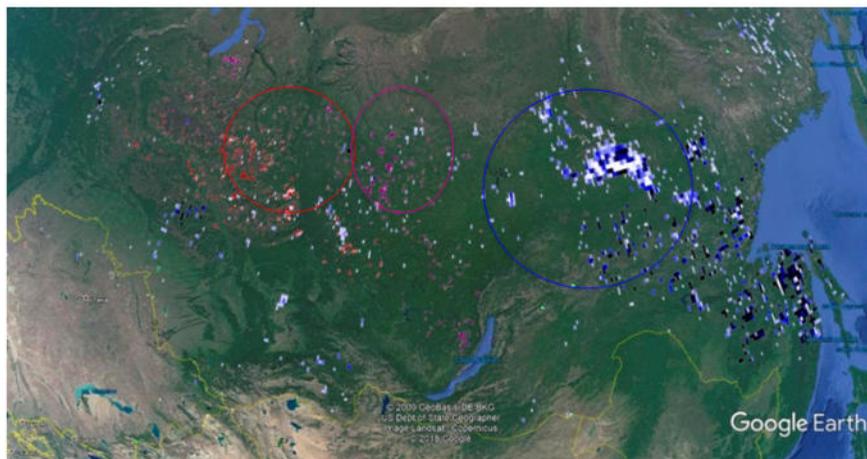


Рис. 1. Пожары – красная область – 3 июля 2012, малиновая – 23 июля 2016 (GFAS), синяя – суммарно за август 1998 (GFED). Пожары на основании эмиссий метана

На рисунке 2 показаны аномалии осадков в летние месяцы 1998, 2012, 2016 гг. Аномалии осадков являются промежуточной характеристикой, позволяющей связать пожарную опасность с особенностями циркуляции атмосферы. Черными кругами выделены области отрица-

тельных аномалий осадков, ассоциированные с пожарами. Остановимся на сходствах и различиях приведенных карт, сопоставим возможные причины длинных волн и блокингов в атмосфере. Оба этих явления способствуют появлению крупномасштабных аномалий осадков над Евразией.

Можно видеть, что пространственная структура аномалий атмосферных осадков в рассматриваемые периоды имеет сходные черты. В первую очередь, это отрицательная аномалия осадков на границе Западной и Восточной Сибири в районе $55\text{--}65^\circ$ с. ш. В 1998 и 2012 гг. она расположена южнее, чем в 2016 г. Летний период 2016 г. отличается также от двух других периодов аномалиями осадков на российском Дальнем Востоке (Амурская область, Хабаровский край). В 2016 г. в этой области зарегистрирована положительная аномалия осадков, а в 1998 и 2012 гг. отрицательная. Кроме того, 2016 г. отличается выраженной отрицательной аномалией осадков в южных районах Западной Сибири.

Довольно часто аномалии температур и осадков над Евразией связывают с фазой Североатлантического колебания (САК) [17]. Причиной САК, согласно современным представлениям, может быть опрокидывание волн Россби [17] и формирование блокингов в Северной Атлантике (СА). В работе [32] показано, что для отрицательной фазы САК характерна высокая повторяемость блокингов в высоких широтах СА. Зональный поток в эти периоды ослаблен. При положительной фазе САК блокирования редки, а зональный поток усилен. Для всех трех летних месяцев 1998, 2012 и 2016 гг. была характерна отрицательная фаза САК¹.

Дальняя связь между Атлантикой и Евразией (АЕ) в летний период исследована в работе [26]. Выделены пять центров действия, характеризующих эту связь, – в субтропической части Северной Атлантики, на северо-востоке Северной Атлантики, в Восточной Европе, Карском море, Северном Китае и Монголии. Знак барических аномалий в этих регионах определяет характер связи. Для анализа изменчивости барического поля над Атлантикой и Евразией предложен индекс (АЕИ). Положительные значения АЕИ указывают на высокие значения геопотенциала в субтропической части Северной Атлантики, Восточной Европе, а также над Северным Китаем и Монголией. Отрица-

¹ Выполнено по данным

<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/norm.nao.monthly.b5001.current.ascii.table>.

тельные значения АЕИ, соответственно, – на низкие значения геопотенциала над северо-востоком СА и Карским морем. При изменении знака АЕИ меняется знак барических аномалий. АЕИ имеет тенденцию к возрастанию в последние 30 лет. В качестве механизма, ответственного за существование такой дальней связи, авторы [26] указывают на распространение волн Россби из субтропической части Северной Атлантики. Похожая структура барических аномалий была получена в работе [4]. Структура этих аномалий, напоминающая положительную фазу АЕИ, наблюдалась при слабом муссоне Восточной Азии (не распространяющемся в северные районы Восточной Азии). И, наоборот, в периоды сильного муссона поле геопотенциала было похоже на барическое поле при отрицательной фазе АЕИ.

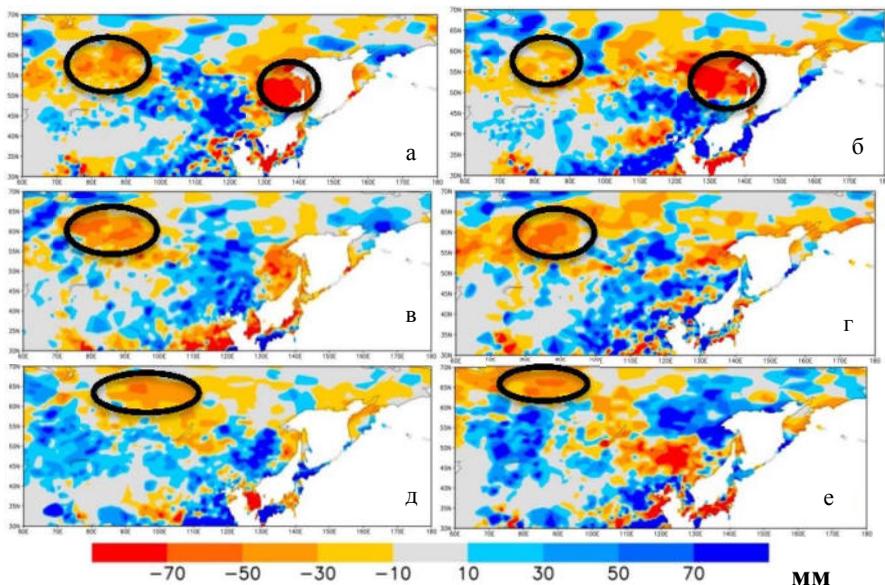


Рис. 2. Распределения аномалий количества осадков в июле, августе 1998 г. (а, б), июне, июле 2012 г. (в, г), июне, июле 2016 г. (д, е). Выделены области значительных отрицательных аномалий осадков

Так как индекс АЕИ является интегральной характеристикой циркуляции, аномалии барического поля в отдельных регионах могут различаться, даже если значения индекса имеют близкие значения. И, наоборот, одинаковые аномалии в регионе могут иметь место при разных значениях индекса. Например, в 1998 и 2012 гг. индексы АЕИ имели разный знак [26], хотя распределения осадков в эти годы соот-

ветствовали отрицательной фазе АЕИ. Приблизительно одинаковой в эти годы была и интенсивность муссона [4]. Для 2016 г. данные в статьях не приводятся.

Нельзя исключить влияние на характер дальних связей в Евразии еще одного важного фактора – явления Эль-Ниньо/Южное Колебание (ЭНЮК). В 1997–1998 гг. и в 2015–2016 гг. в тропической зоне Тихого океана было зарегистрировано сильное явление Эль-Ниньо (по данным <https://ggweather.com/enso/oni.htm>), а в 2011–2012 гг. умеренное Ла-Нинья. Возможно, этими различиями можно объяснить и разный характер дальних связей в Евразии.

Одним из следствий распространения и обрушения длинных волн России могут быть блокинг. На рис. 3 приведена диаграмма индекса GHGS, иллюстрирующая изменения со временем пространственной структуры блокирований над Евразией. Для количественного анализа динамики блокингов мы рассчитали повторяемости блокирований в долготных секторах 0–60 в. д «Европа и Урал», 60–90 в. д. «Западная Сибирь», 90–125 в. д. «Восточная Сибирь», 125–180 в. д «Дальний Восток и Тихий океан» (ДВ1). В Дальневосточно-тихоокеанского регионе расчёты выполнены дополнительно для сектора 125–160 в. д. (ДВ2). Расчеты повторяемости блокирований и анализ диаграммы показали, что в разные годы повторяемости блокирований в разных секторах были различными. В 1998 и 2012 гг. максимумы блокирования приходились на Восточную Сибирь и Дальний Восток, в 2016 г. возросло количество блокирований над Европой и Западной Сибирью.

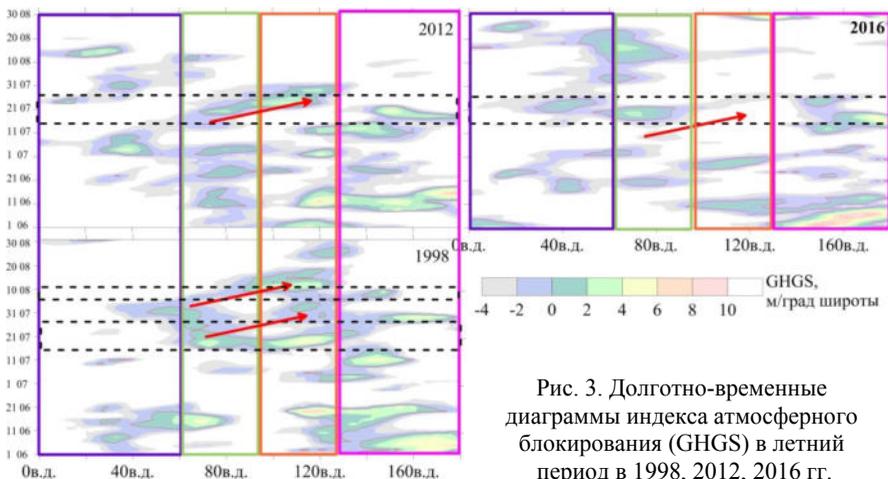


Рис. 3. Долготно-временные диаграммы индекса атмосферного блокирования (GHGS) в летний период в 1998, 2012, 2016 гг.

Можно предположить, что различная пространственная структура блокирований в разные годы связана с различиями в структуре длинных волн Россби. Для исследования связи между ними мы использовали данные о распределении потенциальной завихренности на изэнтропических поверхностях $PV-\theta$. На рис. А1 из Приложения А прослежена эволюция распределений $PV-\theta$ в периоды с максимальным развитием длинных волн вдоль субтропического струйного течения (ССТ). На рис.3 эти периоды выделены штриховыми линиями. На рис. А1 отчетливо видны области знакопеременных аномалий температуры, напоминающие цуги длинных волн, распространяющихся вдоль ССТ в широтной зоне 40–45 с. ш. С течением времени аномалии $PV-\theta$ эволюционируют, становятся в отдельных регионах крупномасштабными, напоминающими распределения $PV-\theta$ во время блокирований. В целом вся картина эволюции аномалий похожа на процесс генерации и усиления волн Россби, и последующей их нелинейной динамики с обрушением и формированием блокингов.

Несмотря на сходство аномалий $PV-\theta$ в субтропиках, в умеренных широтах Евразии распределения $PV-\theta$ в 1998 и 2016 гг. существенно различаются. В 2016 г. отрицательная аномалия $PV-\theta$ расположена над Восточной Сибирью и Дальним Востоком, а в 2012 – над Западной и Восточной Сибирью. Видимо, эти различия, обусловленные разной конфигурацией барического поля, являются причиной различий в адвекции воздушных масс Восточноазиатского муссона (положительная аномалия $PV-\theta$ на восточном побережье Азии). Рассмотрим особенности циркуляции атмосферы 15 июля 1998 и 2016 г. На рисунке А1 в эти дни мы видим два похожих волновых цуга в субтропиках, однако, например, к юго-востоку от Байкала аномалии имеют противоположный знак. В 2016 г. отрицательная аномалия в районе Байкала соединяется с аномалией над Дальним Востоком. Это приводит к выносу теплых воздушных масс муссона вдоль восточного побережья Азии и формированию блокирующего антициклона над северо-восточной оконечностью Азии. В 1998 г. барические ложбины над Сибирью и Дальним Востоком имеют другую конфигурацию, и к середине июля над Сибирью и Дальним Востоком формируется положительный температурный фон. Аномалия $PV-\theta$ при этом длительное время сохраняется над Северным Китаем и Дальним Востоком. Наши предыдущие исследования показали, что при такой конфигурации метеополей происходит одновременная адвекция муссонного воздуха в циклон, сформированный на фронтальном разделе с отрицательной

аномалией потенциальной температуры, а также в формирующийся над Дальним Востоком антициклон.

Таким образом, одна из областей возникновения пожаров – антициклон над Дальним Востоком – может быть связана с воздушными массами летнего Восточноазиатского муссона. Если устойчивый антициклон формируется в умеренных широтах над континентом, как в июле-августе 1998, пожары в этом регионе будут неизбежны. Известно, что муссонный воздух только в районах повышенной бароклинности способен вызывать осадки, в противном случае он порождает экстремальные засухи. На картах PV- θ (19, 20 июля, а также 9 августа 1998 г.) можно проследить постепенную трансформацию положительной волновой аномалии субтропического течения в антициклон, хорошо видимый на картах аномалий осадков (рис. 1), который и явился причиной пожаров на Дальнем Востоке.

Что касается пожаров в Западной и Восточной Сибири, то они также были спровоцированы процессами блокирования. Причем для всех трех рассматриваемых лет в период пожаров отмечен один и тот же типовой процесс, связанный с эволюцией гребней и блокингов над ЗС и ВС. В каждом из трех случаев происходило смещение гребня большой амплитуда с Западной на Восточную Сибирь (на рис. 3 этот процесс обозначен красной стрелкой). Эволюция барических образований при этом могла несколько отличаться:

1. Блокинг над ЗС → смещение → блокинг над ВС
2. Гребень над ЗС → смещение → блокинг над ВС
3. Блокинг над ЗС → смещение → гребень над ВС

Как показал анализ, именно эти три сценария наиболее благоприятны для возникновения пожаров. Реализация этих сценариев, их особенности и повторяемость связаны, видимо, как с распространением длинных волн вдоль ССТ, так и с нелинейными процессами взаимодействия волн с полярным вихрем.

Заключение

Исследованы условия циркуляции атмосферы, способствующие возникновению катастрофических природных пожаров летом 1998, 2012 и 2016 гг. Основное внимание обращено на распространение длинных волн над Северной Атлантикой и Евразией вдоль субтропического струйного течения и их последующую эволюцию. Цуги длинных волн наблюдались во все исследуемые годы, однако наиболее выраженными они были в 1998 и 2016 гг.

Несмотря на схожесть длинных волн над Евразией в 1998 и 2016 гг., на заключительной стадии эволюции волн обнаружены различия в конфигурации барического поля в умеренных широтах. Непосредственное участие в формировании этих различий принимали воздушные массы летнего Восточноазиатского муссона, однако направление адвекции этих воздушных масс теоретически могло зависеть от особенностей нелинейной стадии опрокидывания волн Россби, либо от состояния полярного вихря – его интенсивности и конфигурации, связанных с ним ложбин и гребней.

Исследование выполнено при поддержке грантов РФФИ № 17-05-00119, 17-05-00374

Список литературы

1. Влияние атмосферного блокирования в Западной Сибири на изменение концентрации метана в летний период / П. Н. Антохин, О. Ю. Антохина, М. Ю. Аршинов, Б. Д. Белан, Д. К. Давыдов, Т. К. Скляднева, А. В. Фофонов, М. Sasakawa, Т. Machida // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 5. С. 393–403.
2. Изменение концентрации диоксида углерода в периоды летнего атмосферного блокирования над Западной Сибирью / О. Ю. Антохина [и др.] // Сб. тез. XII Сиб. совещания по климато-экол. мониторингу. 2017. С. 11–12.
3. События атмосферного блокирования над Западной Сибирью в 2016 г. и связанные с ним погодно-климатические аномалии / О. Ю. Антохина [и др.] // Сб. тез. XII Сиб. совещания по климато-экол. мониторингу. 2017. С. 13–14.
4. Летняя циркуляция атмосферы северного полушария в периоды сильного и слабого муссона Восточной Азии / О. Ю. Антохина, П. Н. Антохин, О. С. Кочеткова, В. И. Мордвинов // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 1. С. 52–58.
5. Бондур В. Г. Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 6. С. 21–35.
6. Виноградова А. А., Смирнов Н. С., Коротков В. Н. Аномальные пожары 2010 и 2012 гг. на территории России и поступление черного углерода в Арктику // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 6. С. 482–487.
7. Мохов И. И., Чернокульский А. В. Региональные модельные оценки риска лесных пожаров в азиатской части России при изменениях климата // География и природ. ресурсы. 2010. № 2. С. 120–126.
8. Ситнов С. А., Мохов И. И. Сравнительный анализ характеристик пожаров в бореальных лесах Евразии и Северной Америки по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 2. С. 21–37.
9. Ситнов С. А., Мохов И. И., Джоза А. В. Влияние сибирских пожаров на содержание монооксида углерода в атмосфере над европейской частью России летом 2016 г. // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 2. С. 146–152.
10. Соколова Г. В. Метод долгосрочного прогноза показателей пожарной опасности в лесах Приамурья на основе учета параметров атмосферной циркуляции // Изв. ВУЗов. Лес. журн. 2014. № 5 (341).
11. Томшин О. А., Соловьев В. С. Исследование крупномасштабных неоднородностей аэрозольных полей, вызванных лесными пожарами в Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 7. С. 598–602.
12. Влияние природных пожаров в России 1998–2010 на экосистемы и глобальный углеродный бюджет / А. З. Шведенко, Д. Г. Щепашенко, Е. А. Ваганов, А. И. Сухинин, Ш. Ш. Максютов, И. МкКалум, И. П. Лакида // Докл. РАН. 2011. Т. 441, № 4. С. 544–548.

13. Distribution of trace gases and aerosols in the troposphere over Siberia during wildfires of summer 2012 / P. N. Antokhin [et. al.] // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2018. Vol. 123, N 4. P. 2285–2297.
14. Climatology of Northern Hemisphere blocking / D. Barriopedro, R. Garcia-Herrera, A. R. Lupo, E. A. Hernandez // Journal of Climate. 2006. Vol. 19. P. 1042–1063.
15. Fire in the Earth System / D. M. J. S. Bowman [et al.] // Science. 2009. Vol. 324, N 5926. P. 481–484.
16. *Crutzen P. J., Andreae M. O.* Biomass Burning in the Tropics: Impact on Atmospheric Chemistry and Biogeochemical Cycles // Science. 1990. Vol. 250, N 4988. P. 1669–1678.
17. *Davini P.* Atmospheric Blocking and Winter Mid-Latitude Climate Variability / tutorial full text available at <http://hdl.handle.net/10579/2241>.
18. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee [et al.] // Quart. J. R. Meteorological Society. 2011. Vol. 137, N 656. P. 553–597.
19. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest / M. Flannigan [et al.] // Global Change Biology. 2009. Vol. 15, N 3. P. 549–560.
20. *Giglio L., Randerson J. T., Werf G. R. V. D.* Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4) // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2013. Vol. 118, N 1. P. 317–328.
21. *Hoskins B. J.* Towards a PV- θ view of the general circulation // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. 1991. Vol. 43. P. 27–35.
22. Impact of Siberian forest fires on the atmosphere over the Korean Peninsula during summer 2014 / J. Jung [et al.] // Atmospheric Chemistry and Physics. 2016. Vol. 16, N 11. P. 6757–6770.
23. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power / J. W. Kaiser [et. al.] // Biogeosciences. 2012. Vol. 9. P. 527–554.
24. *Kasischke E. S., Bruhwiler L. P.* Emissions of carbon dioxide, carbon monoxide, and methane from boreal forest fires in 1998 // Journal of Geophysical Research. 2002. Vol. 108, N D1.
25. *Lejenäs H., Øakland H.* Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from long time series of observational data // Tellus. 1983. 35A. P. 350–362.
26. *Li J., Ruan C.* The North Atlantic–Eurasian teleconnection in summer and its effects on Eurasian climates // Environmental Research Letters. 2018. Vol. 13, N 2. P. 024007.
27. Wildfires Dynamics in Siberian Larch Forests / E. Ponomarev [et al.] // Forests. 2016. Vol. 7, N 12. P. 125.
28. Influence of biomass burning during recent fluctuations in the slow growth of global tropospheric methane / I. J. Simpson [et al.] // Geophysical Research Letters. 2006. Vol. 33, N 22.
29. *Soja A. J.* Estimating fire emissions and disparities in boreal Siberia (1998–2002) // Journal of Geophysical Research. 2004. Vol. 109, N D14.
30. *Tibaldi S., Molteni F.* On the operational predictability of blocking // Tellus A. 1990. Vol. 42, N 3. P. 343–365.
31. *Vasileva A., Moiseenko K.* Methane emissions from 2000 to 2011 wildfires in Northeast Eurasia estimated with MODIS burned area data // Atm. Env. 2013. Vol. 71. P. 115–121.
32. A New Rossby Wave–Breaking Interpretation of the North Atlantic Oscillation / T. Woollings [et al.] // Journal of the Atmospheric Sciences. 2008. Vol. 65, N 2. P. 609–626.
33. Radiative characteristics of aerosol during extreme fire event over Siberia in summer 2012 / T. B. Zhuravleva [et al.] // Atm. Meas. Techniques. 2017. Vol. 10, N 1. P. 179–198.

Приложение А

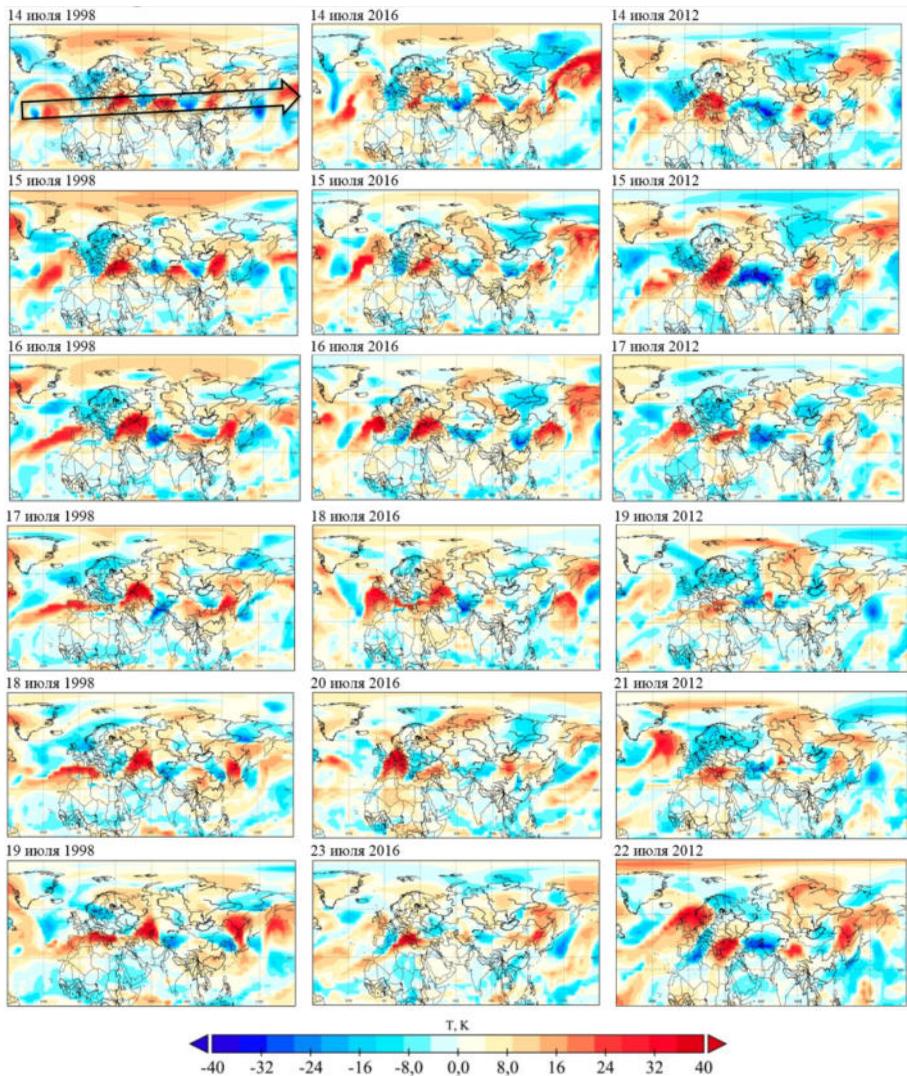


Рис. А1. Аномалии PV- θ для периодов формирования блокингов, и возникновения пожаров в 1998, 2016 и 2012 гг.

УДК 551.510

Исследование влияния типа воздушных масс на химический состав атмосферы над г. Томском

О. Ю. Антохина (olgayumarchenko@gmail.com)

П. Н. Антохин (apn@iao.ru), В. Г. Аршинова (arvi@iao.ru)

М. Ю. Аршинов (michael@iao.ru), Б. Д. Белан (bbd@iao.ru)

С. Б. Белан, Д. К. Давыдов, Н. В. Дудорова (unv@iao.ru)

Г. А. Ивлев (ivlev@iao.ru), А. В. Козлов, Т. М. Рассказчикова

(rtm@iao.ru), Д. Е. Савкин (densavkin88@gambler.ru)

Д. В. Симоненков (simon@iao.ru), Т. К. Скляднева (tatyana@iao.ru)

Г. Н. Толмачев (tgn@iao.ru), А. В. Фофонов (alenfo@iao.ru)

Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск

Аннотация. В работе по данным многолетнего мониторинга на TOR-станции рассчитаны средние значения концентрации газовых и аэрозольных компонент в разных воздушных массах в районе г. Томска. Показано, что наибольшие значения концентрации озона фиксируются в тропической воздушной массе, наименьшие в арктической. А для CO₂ и CH₄ характерно уменьшение концентрации от арктической до тропической. У таких газов, как CO и SO₂ характер распределения более сложный.

Ключевые слова: атмосфера, воздушная масса, аэрозоль, газ, концентрация, содержание, состав.

Введение

С. П. Хромов был одним из первых ученых, обративших внимание на оптическую однородность воздушной массы. Он показал [11], что интегральный фактор мутности атмосферы внутри одной и той же массы почти одинаков, и резко изменяется при переходе из одной в другую, либо при смене их типа в пункте измерений. Анализ, выполненный в [7] выявил, что величина фактора мутности определяется составом воздуха, который в свою очередь зависит от характера синоптических процессов и предыстории воздушных масс. При этом на состав воздуха оказывает влияние направление переноса [9].

Общий уровень концентрации примесей в воздухе и содержание отдельных газов: озона, диоксида углерода, оксидов азота и аэрозольных частиц разных размеров в большой степени обусловлен элементами общей циркуляции атмосферы. Однако при всей значимости воздействия синоптических процессов, состав воздуха определяется районом формирования воздушной массы, наличием источников и стоков той или иной примеси. Исходя из этого, воздушная масса в целом ока-

зывается однородной не только оптически, но и по составу [2]. Естественно, что это выполняется при условии отсутствия крупномасштабных источников примесей (пожар и т. п.).

При смене воздушных масс в изменении состава воздуха в районе проведения наблюдений существуют свои особенности. Изменение происходит скачкообразно по достаточно сложному механизму, который определяется динамическими процессами в зоне фронтальных разделов, растворимостью газов в атмосферных осадках, гидрофильностью или гидрофобностью аэрозольных частиц.

Из вышеперечисленных особенностей распределения состава воздуха внутри воздушных масс и перехода из одного типа в другой следует, что эти различия могут быть весьма значительны. Поэтому в настоящей работе ставится задача определения значения концентрации газовых и аэрозольных компонент в разных воздушных массах в районе Томска, где продолжительное время проводится мониторинг состава воздуха, а также особенностей его изменения при переходе из одного типа воздушной массы в другой.

Район исследований и методы анализа

Исследования проводились на основании данных полученных на TOR-станции, которая введена в эксплуатацию в декабре 1992 [3] и функционирует по настоящее время. В данной работе проанализированы изменения концентраций малых газовых составляющих атмосферы (МГС) O_3 , CO_2 , CH_4 , CO , SO_2 и химический состав аэрозоля. Для измерения МГС использовались следующие приборы. Газоанализатор Picarro G2301-m для измерения диоксида углерода в диапазоне $0...1000$ млн⁻¹ с погрешностью $< 0,2$ млн⁻¹ и метана в диапазоне $0...20$ млн⁻¹ и погрешностью $< 0,0015$ млн⁻¹. Электрохимический газоанализатор ОПТЭК К-100 для измерения оксида углерода в диапазоне $0...50$ мг/м³ с погрешностью ± 20 %. Флуоресцентный ультрафиолетовый газоанализатор Teledyne API 100E для измерения диоксида серы в диапазоне $0...20$ млн⁻¹ с погрешностью $\pm 0,5$ %. Хемилюминесцентный газоанализатор ОПТЭК 3.02-II для измерения озона в диапазоне $0...500$ мкг/м³ с погрешностью ± 20 %.

Изменения концентраций O_3 , CO_2 , CH_4 , CO , SO_2 в различных воздушных массах и при прохождении фронтов проанализированы за 2015 и 2016 гг. Тип воздушной массы устанавливался по картам барической топографии и приземными синоптическими.

Химический состав аэрозоля анализировался по данным самолетного зондирования, которое выполняется с июля 1997 года по настоя-

щее время над Караканским бором юго-западнее Новосибирска. Отбор проб осуществлялся на фильтры типа АФА-ХА и АФА-ХП. Химический анализ проб атмосферного аэрозоля производился на кафедре аналитической химии Томского государственного университета. Пределы обнаружения составляли для ионов 0,1-0,6 мкг/фильтр, для элементов – 0,01-0,02 мкг/фильтр.

Состав воздуха в различных воздушных массах

Результаты средних значений концентрации газовых компонентов воздуха в основных типах воздушных масс и соответствующие средние отклонения приведены в табл. 1.

Наименьшая средняя концентрация озона наблюдается в арктической воздушной массе и составляет 27 мкг/м³, наибольшая в тропической – 55 мкг/м³. Для СО₂ и СН₄ характерен обратный, по отношению к О₃, градиент. Из данных табл. 1 следует, что концентрация СО₂ наибольшая в арктической воздушной массе и уменьшается в более теплых массах. Наименьшая она в субтропической массе. Различия средних концентраций между арктической и умеренной воздушными массами достоверны по уровню 0,001. В умеренной, субтропической и тропической массами достоверность различия средних значений не достигает даже минимального уровня значимости 0,05. Такое распределение концентраций МГС отражает расположение источников и стоков углекислого газа по регионам формирования воздушных масс.

Для метана (табл. 1) также наблюдается градиент, направленный из холодного воздуха в теплый.

Наибольшая концентрация СН₄ фиксируется в арктической воздушной массе 2069 млрд⁻¹, наименьшая в тропической – 2003 млрд⁻¹. Различия в средних значениях между арктической и умеренной массами достоверно по уровню 0,001, между умеренной и субтропической – по уровню 0,01. Различия в концентрациях между субтропической и тропической массами не достоверны. Возможно, сказывается, также, как и для СО₂, небольшая повторяемость тропических масс, всего 85 случаев. Такое распределение метана, скорее всего, складывается из-за наличия источников, расположенных в Северном ледовитом океане [10] и в Васюганских болотах, мощность эмиссии, с поверхности которых превышает даже арктический источник [1].

Несмотря на то, что среднеглобальная концентрация оксида углерода снижается, в районе исследований во всех воздушных массах зафиксированы высокие концентрации СО (табл. 1). Наибольшая она в умеренной воздушной массе и составляет 364 млрд⁻¹. Немного

меньшее значение 355 млрд^{-1} фиксируется в тропической воздушной массе. Наименьшее значение наблюдается в арктической массе 327 млрд^{-1} , где отсутствуют как природные, так и антропогенные источники [2]. Такое распределение CO , по-видимому, отражает наличие мощного промышленного источника в Западной Европе, из которого, по данным [12], осуществляется перенос в умеренных широтах на территорию Сибири. Рост концентрации в тропической массе является отражением действия мощного источника, который находится в этих широтах. При этом, различия между средними концентрациями в арктической и умеренной массах, между умеренной и субтропической достоверно по уровню 0,001. Между концентрациями в субтропической и тропической достоверность находится на уровне 0,01.

Таблица 1

Средние концентрации и среднеквадратические отклонения газовых компонент в различных воздушных массах в районе г. Томска

Тип воздушной массы	O_3 , млрд ⁻¹	N	CO_2 , млн ⁻¹	N	CH_4 , млрд ⁻¹	N	CO , млрд ⁻¹	N	SO_2 , млрд ⁻¹	N
Арктическая	27 ±16	4424	428 ±26	1647	2069±153	1647	327 ±267	4424	11,4 ±5,2	4424
Умеренная	40 ±24	7046	418 ±25	1126	2022±114	1126	361 ±278	7038	10,6 ±5,5	7045
Субтропическая	50 ±23	5243	417 ±20	675	2011±2	675	330 ±171	5196	11,9 ±5,8	5241
Тропическая	55 ±20	687	418 ±10	85	2003±52	85	355 ±295	671	12,5 ±4,8	687

N – Число случаев

Усилия мирового сообщества по уменьшению антропогенных выбросов диоксида серы привели к значительному уменьшению фоновой концентрации SO_2 во многих регионах земного шара [15]. Это также видно из данных табл. 1 и для района г. Томска, где концентрация изменяется от $10,6 \text{ млрд}^{-1}$ в умеренной воздушной массе до $12,5 \text{ млрд}^{-1}$ в тропической. При этом различия между средними концентрациями во всех воздушных массах достоверны по уровню 0,001. Тем не менее, небольшие абсолютные различия между содержанием SO_2 в различных воздушных массах затрудняют их интерпретацию.

Так же как и для SO_2 , различия между средними концентрациями во всех воздушных массах достоверны по уровню 0,001. Это, с одной стороны, отражает поступление газов предшественников и УФ-Б радиации, определяющих концентрацию тропосферного озона [6]. С другой стороны, должна сказаться и недавно установленная нелинейная зависимость скорости генерации озона с увеличением температуры воздуха [8].

Ввиду того, что распределение концентраций химических компонентов подчиняется логнормальному закону, средние значения и среднеквадратичные отклонения рассчитывались для логарифмов концентраций, для которых потом считался доверительный интервал при уровне $P = 0,95$. То есть средние (или, точнее, среднегеометрические) значения и границы доверительных интервалов, нанесенные на рис. 1–2, являются антилогарифмами полученных значений. Количество использованных проб приведено в табл. 2.

Таблица 2

Количество проб для каждой воздушной массы и химического компонента, использованных для расчета средних значений и доверительного интервала

Тип воздушной массы	Субтропическая	Умеренная	Арктическая
Mg	154	511	238
Cu	170	495	231
Fe	158	488	235
Al	170	551	266
Si	162	518	237
Ca	158	527	250
Ba	125	306	150
Mn	151	467	207
B	35	149	81
Ni	143	426	198
Pb	136	403	185
Ti	138	449	202
Zn	91	159	94
Cr	159	426	204
Be	46	131	53
Zr	58	140	68
V	91	232	127
Co	91	202	109
Cd	42	114	45
Ag	24	81	49
Sn	103	245	115
Mo	111	268	141
Sr	24	98	50
Sb	0	2	8
NH ₄ '	67	161	88
NO ₃ '	135	433	215
Br'	28	164	54
Ca''	8	32	8
Cl'	157	516	253
SO ₄ ''	117	370	207
HCO ₃ '	7	43	13
Mg''	6	30	9
F'	13	46	11
K'	127	415	217
Na'	139	435	228

Анализ химического состава аэрозоля по типам воздушных масс позволяет сделать предварительные выводы по широтным закономерностям происхождения отдельных элементов и неорганических ионов, объединив их по этому признаку в соответствующие группы (рис. 1 и 2).

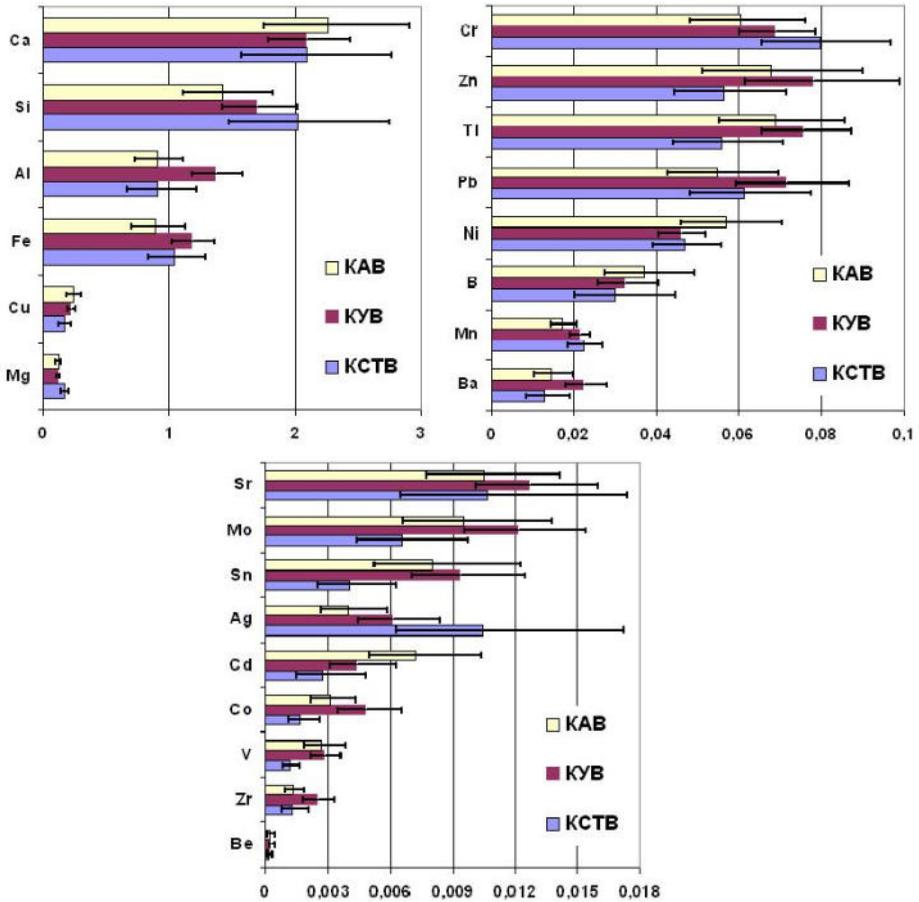


Рис. 1. Среднегеометрические значения концентраций элементов и ионов ($\text{мкг}/\text{м}^3$) в районе Караканского бора в различных типах воздушных масс (KAB – континентальная арктическая, KYB – умеренная, KCTB – субтропическая и тропическая воздушные массы); указаны доверительные интервалы по уровню $P = 0,95$, рассчитанные из среднеквадратичных отклонений, также вычисленных для логарифмов концентраций

Явное «южное» происхождение имеют кремний, хром, марганец, серебро и гидрокарбонат-анион (рис. 1). Вывод о последнем компоненте, однако, имеет низкую статистическую обеспеченность, хотя он и дает самый резко выраженный пик концентрации для HCO_3^- . К этой же группе тяготеют ионы хлора и натрия, вероятно, привносимые дальним переносом с морским аэрозолем (рис. 2).

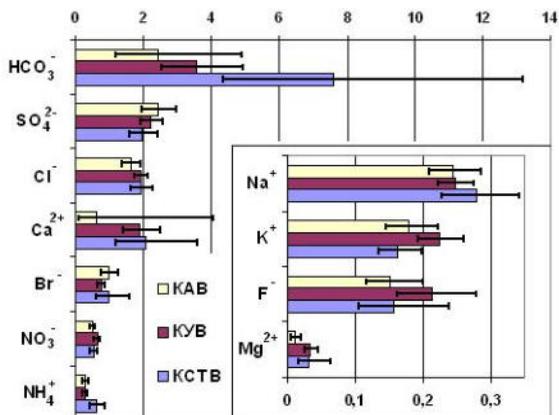


Рис. 2. Тоже для концентраций ионов (мкг/м^3)

Прямую корреляцию с арктическими воздушными массами имеют микроэлементы медь, бор, кадмий, никель и сульфат-анион (рис. 1). Все они имеют антропогенное происхождение, подтверждая высокую аккумуляционную способность арктического воздуха.

Умеренный воздух формирует в тропосферном аэрозоле юга Западной Сибири самую многочисленную группу элементов и ионов. Это алюминий, железо, цинк, титан, свинец, барий, стронций, молибден, олово, кобальт, ванадий, цирконий, из ионов – калий, фторид и нитрат (рис. 1). Очевидно, что умеренная масса имеет местное или зональное происхождение, поэтому, учитывая доминирующие потоки, можно прогнозировать основной вклад западных районов – Урала и Северного Казахстана, а также Кузбасса и, в ряде случаев, центральных районов Восточно-Сибирского плоскогорья.

Умеренный воздух формирует в тропосферном аэрозоле юга Западной Сибири самую многочисленную группу элементов и ионов. Это алюминий, железо, цинк, титан, свинец, барий, стронций, молибден, олово, кобальт, ванадий, цирконий, из ионов – калий, фторид и нитрат (рис. 1). Очевидно, что умеренная масса имеет местное или

зональное происхождение, поэтому, учитывая доминирующие потоки, можно прогнозировать основной вклад западных районов – Урала и Северного Казахстана, а также Кузбасса и, в ряде случаев, центральных районов Восточно-Сибирского плоскогорья.

Особенности изменения состава воздуха при смене воздушных масс

В связи с тем, что фронтальные разделы представляют собой сложные образования, сопровождающиеся изменением облачности и выпадением осадков в предфронтальной и зафронтальной областями. И, кроме того, резким изменением температуры, усилением и конвергенцией ветра, а измерения проводились в одной точке с интервалом в один час, для каждого случая использовались данные ежечасных измерений за 5 часов до и 5 часов после прохождения фронта. В течение исследуемого периода (2015–2016 гг.) в районе Томска наблюдалось прохождение 167 холодных, 145 теплых и 128 фронтов окклюзии.

При исследовании концентрации озона для сокращения влияния сезонной и суточной изменчивости концентрации газов было проведено нормирование данных о концентрации газов на их значения во время прохождения фронта [6]. Поэтому значения, представленные на рис. 3 являются относительными.

Для анализа изменчивости других газов были использованы их абсолютные значения.

При прохождении теплого фронта наблюдается уменьшение концентрации CO_2 с минимумом за линией фронта, затем происходит некоторое ее увеличение (рис. 3, *а*). Аналогичный ход изменения концентрации CO_2 выявлен при смещении холодного фронта (рис. 3, *б*), только минимальные значения наблюдаются за час до его прохождения.

При прохождении теплого фронта в изменении концентрации CH_4 имеется явно выраженное уменьшение при переходе из холодной воздушной массы в теплую (рис. 3, *в*). В холодном фронте кривая концентрации метана многомодальна, с двумя основными минимумами за три часа до прохождения фронта и тремя – после (рис. 3, *з*).

Для изменения содержания оксида углерода характерно, при общем уменьшении концентрации при переходе из холодной воздушной массы в теплую (рис. 3, *д*) и росте, при переходе из теплой в холодную (рис. 3, *е*) более сложное изменение, чем для CO_2 и CH_4 .

Хотя амплитуды колебаний концентрации SO_2 в зоне фронтов, как теплого, так и холодного (рис 3, *ж* и *з*) невелики, но для этого газа наблюдаются наиболее сложные хода в зоне фронтов.

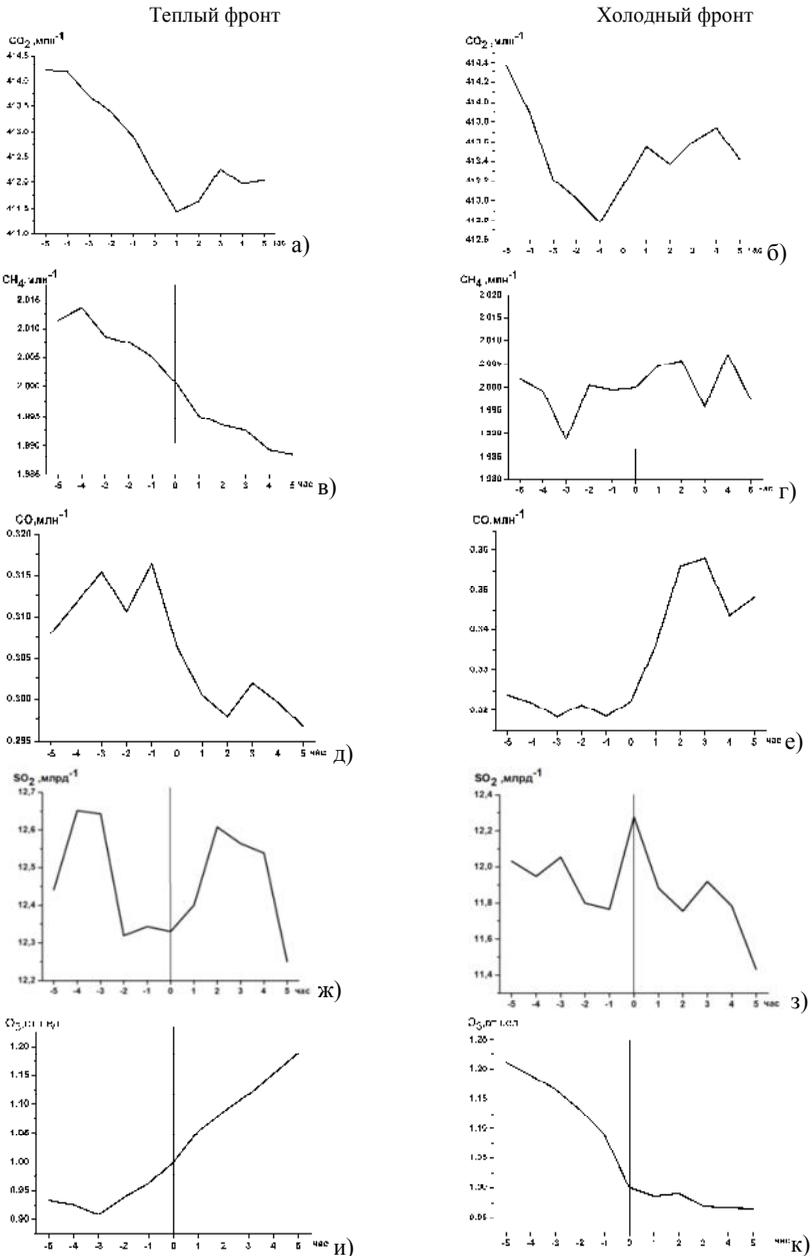


Рис. 3. Изменение концентрации МГС при прохождении фронтов через Томск. Отрицательные значения оси абсцисс соответствуют часам до прохождения фронта, положительные – после прохождения

При прохождении теплого фронта наблюдается уменьшение концентрации CO_2 с минимумом за линией фронта, затем происходит некоторое ее увеличение (рис. 3, *a*). Аналогичный ход изменения концентрации CO_2 выявлен при смещении холодного фронта (рис. 3, *б*), только минимальные значения наблюдаются за час до его прохождения.

При прохождении теплого фронта в изменении концентрации CH_4 имеется явно выраженное уменьшение при переходе из холодной воздушной массы в теплую (рис. 3, *в*). В холодном фронте кривая концентрации метана многомодальна, с двумя основными минимумами за три часа до прохождения фронта и тремя – после (рис. 3, *з*).

Для изменения содержания оксида углерода характерно, при общем уменьшении концентрации при переходе из холодной воздушной массы в теплую (рис. 3, *д*) и росте, при переходе из теплой в холодную (рис. 3, *e*) более сложное изменение, чем для CO_2 и CH_4 .

Хотя амплитуды колебаний концентрации SO_2 в зоне фронтов, как теплого, так и холодного (рис. 3, *ж* и *з*) невелики, но для этого газа наблюдаются наиболее сложные хода в зоне фронтов.

Для теплого фронта характерно увеличение концентрации озона при переходе из холодной воздушной массы в теплую (рис. 3, *и*). В зоне фронта рост составляет приблизительно 30 %. Из рисунка 3, *к* видно, что при прохождении холодного фронта концентрация озона резко уменьшается при переходе от теплой к холодной воздушной массе. Изменение концентрации приблизительно составляет 25 %. За фронтом концентрация озона стабилизируется и практически остается неизменной.

Не будем давать интерпретацию приведенным данным, так как каждый фронт представляет собой сложное образование с большим количеством особенностей. Это было установлено достаточно давно [11]. Наша цель была оценить общую тенденцию изменения и проверить выполненные оценки значений концентрации газов в разных воздушных массах.

Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать вывод, что каждая воздушная масса имеет свой состав воздуха, который в ряде случаев достоверно различается. Это относится как к газовым примесям воздуха, так и химическому составу аэрозольных частиц.

При переходе из одной воздушной массы в другую, концентрации примесей изменяются нелинейно. При этом, направление градиента зависит от состава воздуха в холодной и теплой воздушных массах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда проект № 17-17-01095.

Список литературы

1. Крупномасштабные исследования газового и аэрозольного состава воздуха над Сибирским регионом / П. Н. Антохин, В. Г. Аршинова, М. Ю. Аршинов, Б. Д. Белан, С. Б. Белан, Д. К. Давыдов, Г. А. Ивлев, А. В. Козлов, Ф. Недэлэк, J.-D. Paris, Т. М. Рассказчикова, Д. Е. Савкин, Д. В. Симоненков, Т. К. Складнева, Г. Н. Толмачев, А. В. Фофонов // *Оптика атмосферы и океана*. 2014. Т. 27, № 03. С. 232–239.
2. Вертикальное распределение газовых и аэрозольных примесей воздуха над российским сектором Арктики / О. Ю. Антохина, П. Н. Антохин, В. Г. Аршинова, М. Ю. Аршинов, Б. Д. Белан, С. Б. Белан, Д. К. Давыдов, Г. А. Ивлев, А. В. Козлов, Ph. Nedelec, J.-D. Paris, Т. М. Рассказчикова, Д. Е. Савкин, Д. В. Симоненков, Т. К. Складнева, Г. Н. Толмачев, А. В. Фофонов // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30, № 12. С. 1043–1052.
3. TOR-станция мониторинга атмосферных параметров / М. Ю. Аршинов, Б. Д. Белан, В. В. Зуев, В. Е. Зуев, В. К. Ковалевский, А. В., Лиготский В. Е. Мелешкин, М. В. Панченко, Е. В. Покровский, А. Н. Рогов, Д. В. Симоненков, Г. Н. Толмачев // *Оптика атмосферы и океана*. 1994. Т. 7, № 8. С. 1085–1092.
4. Динамика аэрозоля при прохождении атмосферных фронтов / В. Г. Аршинова, Б. Д. Белан, Е. В. Воронцова, Г. О. Задде, Т. М. Рассказчикова, О. И. Семьянова, Т. К. Складнева // *Оптика атмосферы и океана*. 1997. Т. 10, № 7. С. 813–819.
5. Изменение концентрации озона в приземном слое воздуха при прохождении атмосферных фронтов / В. Г. Аршинова, Б. Д. Белан, Т. М. Рассказчикова, А. Н. Рогов, Г. Н. Толмачев // *Оптика атмосферы и океана*. 1995. Т. 8, № 4. С. 625–631.
6. *Белан Б. Д.* Озон в тропосфере. Томск : ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
7. Спектральная прозрачность атмосферы в основных синоптических объектах / Б. Д. Белан, Г. О. Задде, А. И. Кусков, Т. М. Рассказчикова // *Оптика атмосферы и океана*. 1994. Т. 7, № 9. С. 1187–1197.
8. *Белан Б. Д., Савкин Д. Е., Толмачев Г. Н.* Зависимость образования озона в приземном слое от температуры воздуха // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30, № 11. С. 971–979.
9. *Звягинцев А. М., Какаджанова Г., Тарасова О. А.* Влияние направлений переноса воздушных масс на сезонный ход концентраций малых газовых составляющих атмосферы в Европе. // *Метеорология и гидрология*, 2010. № 7. С. 18–28.
10. Фоновая составляющая окиси углерода в приземном воздухе (станция мониторинга «Обнинск») / Ф. В. Кашин, В. Н. Арефьев, Н. И. Сизов, Р. М. Акименко, Л. Б. Упэнэк // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52, № 3. С. 281–287.
11. *Хромов С. П.* Основы синоптической метеорологии. Л. : Гидрометиздат, 1948. 700 с.
12. Источники и вариации тропосферного СО в Центральной Сибири: численные эксперименты и наблюдения на высотной мачте ZOTTO / Ю. А. Шгабкин, К. Б. Моисеенко, А. И. Скороход, А. В. Васильева, М. Хайманн // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52, № 1. С. 51–63.
13. *Scott G. M., Diab R. D.* Forecasting Air Pollution Potential: A Synoptic Climatological Approach // *Journal of the Air Waste Management Association*. 2000. Vol. 50, № 10. P. 1831–1842.
14. Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf / N. Shakhova, I. Semiletov, A. Salyuk, V. Yusupov, D. Kosmach, O. Gustafsson // *Science*. 2010. Vol. 327, N 5970. P. 1246–1250.
15. Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005 / S. J. Smith, J. van Aardenne, Z. Klimont, R. J. Andres, A. Volke, S. D. Arias // *Atmos. Chem. Phys*. 2011. Vol. 11, N 3. P. 1101–1116.

УДК 551.50: 551.581 (66)

Климатические особенности Республики Кот-д'Ивуар (Африка)

А. В. Аргучинцева (arg@math.isu.ru)¹

М. Tea (M. Thea) (thearusse@gmail.com)¹

Dje Kouakou Bernard (dkouakou_b@yahoo.fr)²

¹ Иркутский государственный университет, г. Иркутск

² Chef of SODEXAM, Кот-д'Ивуар

Аннотация. Для станций Абиджан и Корхого Республики Кот-д'Ивуар (Западная Африка) рассматриваются данные (1871–2018 гг.) метеорологических измерений с точки зрения возможных их климатических сдвигов. Выбор станций обусловлен их различным расположением: береговое и внутриконтинентальное. Показано, что, в целом, почти за пятидесятилетний период, произошло потепление, хотя разброс между максимальными и минимальными температурами не превышает 3–5 °С. Расчётные плотности воздуха варьируют хотя и в незначительных пределах, но вносят основной вклад в изменение давления.

Ключевые слова: климат, температура воздуха, плотность, атмосферное давление.

Введение

Одна из относительно молодых республик в Африке – Республика Кот-д'Ивуар (независимость с 1960 г.) расположена в Западной Африке между 4°30' и 10°30' северной широты. Это преимущественно равнинная страна, покрытая влажнотропическими лесами на юге и высокотравной саванной на севере [1]. Страна находится под влиянием двух типов воздушных масс: пыльной сухой с севера и влажной с юга. Контраст двух этих воздушных масс создает внутритропическую зону конвергенции (ВЗК), провоцирующую осадки муссонного характера. Сезонное перемещение ВЗК на территории страны позволяет говорить о четырех основных климатических зонах, различающихся количеством осадков и их периодичностью.

Кот-д'Ивуар располагает 185 активно действующими дождемерными станциями и 14 синоптическими метеостанциями, расположенными в разных физико-географических районах. Наблюдения на станциях, входящих в Международную сеть, проводятся одновременно (синхронно) в стандартные сроки 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 ч среднего гринвичского времени, совпадающего с местным. В этой межтропической зоне осадки и температуры являются определяющими пара-

метрами для климата. Однако климатические изменения, происходящие во всем мире, не обошли стороной и Кот-д’Ивуар.

Для анализа этих изменений рассмотрим некоторые фрагменты проведённых расчётов, а именно, данные по двум станциям наблюдений: Абиджан и Корхого. Выбор представления расчётов обусловлен различием климатических особенностей: Абиджан – береговая станция, Корхого – внутриконтинентальная. Надо отметить, что, рассматривая данные за продолжительный период, мы, к сожалению, не располагаем сведениями о переносе метеорологических площадок, изменении типов измерительных приборов, погрешностях в используемых методиках наблюдений и пр., что, естественно, вносит не только случайные, но и систематические ошибки. Кроме того, имеются существенные пропуски в данных наблюдений, что обусловлено причинами военных действий в стране.

Исходные данные и их статистическая обработка

Данные срочных наблюдений Компании по Эксплуатации и Развитию Аэропортовой, Аэронавигационной и Метеорологической Инфраструктуры (*франц.* SODEXAM) за период 1971–2018 гг.

Рассмотрим изменение температуры по названным станциям за пятилетние периоды (рис. 1).

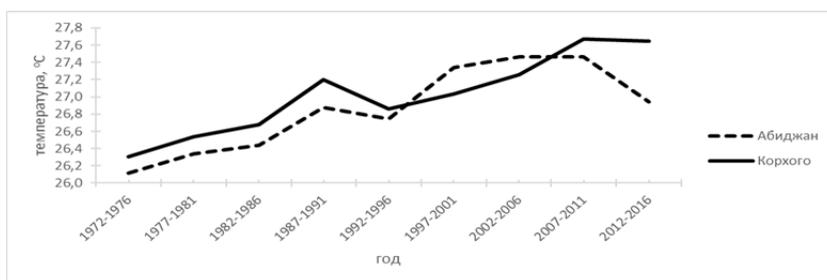


Рис. 1. Тенденция изменения осреднённой по пятилетиям температуры (1971–2018 гг.)

Несмотря на колебания осреднённых пятилетних температур, прослеживается чёткая тенденция к их повышению, причём в целом внутриконтинентальные температуры выше береговых. Из общей видимой тенденции ведёт по особому себя период с 1998 по 2008 г. Вероятно, это обусловлено рядом причин, которые необходимо выяснить. За весь рассматриваемый период (48 лет) наиболее заметно повысилась температура именно внутриконтинентальная (на 1,3 °C), то-

гда как на побережье – только на 0,7 °С. Это подтверждает гипотезу о потеплении климата, в том числе и в Кот-д’Ивуаре.

Надо отметить, что термический режим почти не имеет сезонного хода, однако сезонные изменения обеспечиваются другими климатическими параметрами.

Далее, рассмотрим динамику атмосферного давления (рис. 2).

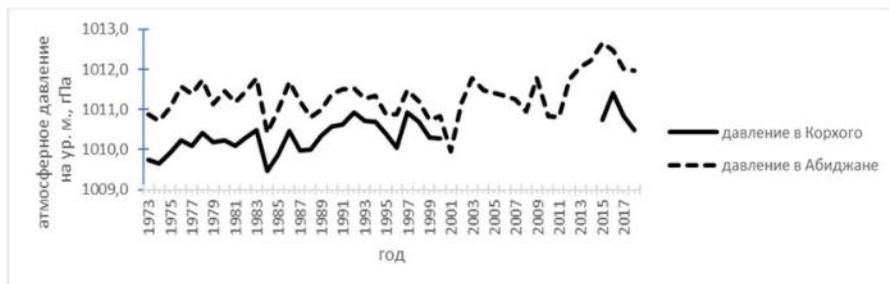


Рис. 2. Атмосферное давление, приведённое к уровню моря (пропуски – наблюдения не проводились)

Как видим, диапазон колебания среднегодового давления колеблется в узких пределах (не более 2–3 гПа), причём в континентальном районе давление в среднем немного ниже (см. рис. 2). Следует отметить, что давление близко к параметрам стандартной атмосферы. Если рассматривать по месяцам, то наибольшее давление приходится на летние сезоны (июль, август), когда температура воздуха понижается. Эта тенденция сохраняется и в годовом цикле (рис. 3). График приведён только для Абиджана.

Многолетнее среднее количество осадков составляет 1020 мм и 606 мм соответственно для Абиджана и Корхого, т. е. различие в 1,3 раза.

Климатическая годовая норма относительной влажности: в Абиджане – 85 %, Корхого – 63 %, причём, если в Абиджане отклонение от нормы в среднем по месяцам составляет 4-5 %, то в Корхого в засушливый период – до 40 %. Стопроцентная вероятность превышения нормы относительной влажности в Абиджане – в июне-сентябре, в Корхого – с мая по октябрь.

Плотность атмосферного воздуха рассчитывалась двумя способами: с учётом виртуальной температуры и по уравнению состояния для влажного воздуха. Результаты расчётов практически совпадают с точностью погрешностей округления (рис. 4).

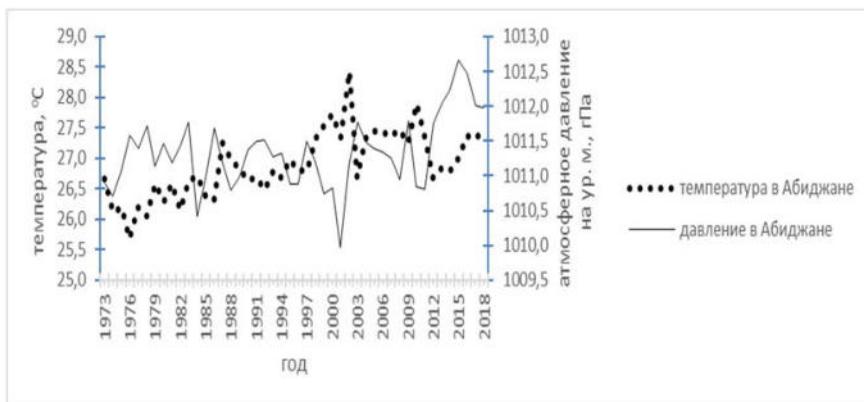


Рис. 3. Среднегодовые изменения температуры и атмосферного давления в Абиджане

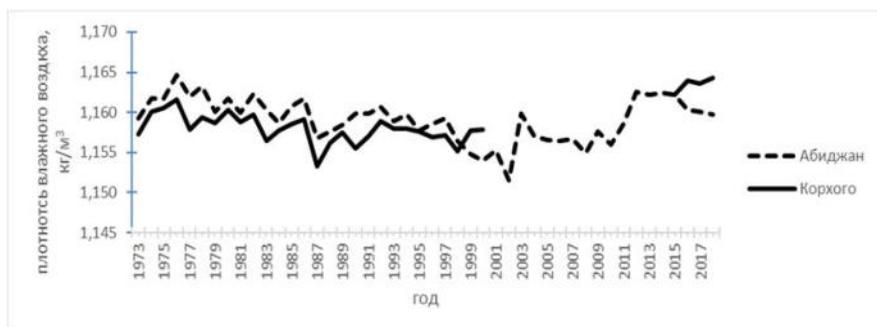


Рис. 4. Плотность воздуха в районе рассматриваемых станций (пропуски – отсутствие регулярных наблюдений на станции Корхого)

Разница между значениями плотности на двух различных станциях не превышает тысячных долей. Несмотря на прямопропорциональную зависимость между составляющими параметрами уравнения состояния Клапейрона-Менделеева, чётко прослеживается для давления преобладающее влияние плотности, по сравнению с температурой воздуха. Это подтверждает и метод главных компонент, являющийся одним из методов факторного анализа. При расчётах осуществлён переход к новой системе координат, являющейся системой ортонормированных линейных комбинаций, при которой первая главная компонента обладает наибольшей дисперсией. Показано, что плотность, по сравнению с температурой, является в уравнении состояния именно главной компонентой и на её долю приходится 85 % вариативной части давления.

Расчёт плотности воздуха является необходимой составляющей для дальнейшей оценки ветроэнергетического потенциала Республики Кот-д'Ивуар.

Заключение

Рассматриваемый район является довольно устойчивым в динамике многолетнего поведения метеорологических характеристик. Но проблема потепления климата не обошла его стороной. В среднем почти за пятидесятилетний период температура в Республике повысилась примерно на 1 °С. Вариативность давления атмосферного воздуха в основном зависит от его плотности.

Список литературы

1. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Кот-д'Ивуар> (дата обращения 29.03.2019).

УДК 551.582.2

Исследование изменения площади ледовых покровов Арктики по данным реанализов

Е. В. Винокурова (katekaulitz483@mail.ru)

О. Г. Анискина (olga.aniskina@mail.ru)

М. А. Моцаков (maxm@rshu.ru)

*Российский государственный гидрометеорологический университет,
г. Санкт-Петербург*

Аннотация. Приводятся результаты исследований ледового покрова в Арктической зоне.

Ключевые слова: Арктика, таяние льдов, климат.

Таяние льдов в Арктике является одной из важнейших проблем нашего времени [1; 2]. В данном исследовании рассматривается изменение концентрации льда в Арктическом бассейне по данным реанализов JRA, ERA20C [3; 4].

Целью исследования является оценка климатических изменений количества льда в Арктическом регионе.

Для того чтобы оценить, насколько опасно таяние льдов, сначала отслеживались изменения количества льда в Арктической зоне за период с 1958 по 2015 г. по данным JRA. На рисунке 1 представлен вре-

менной ход среднемесячной концентрации льда. Черная линия – январь, желтая – июль, зеленая – август, красная – сентябрь.

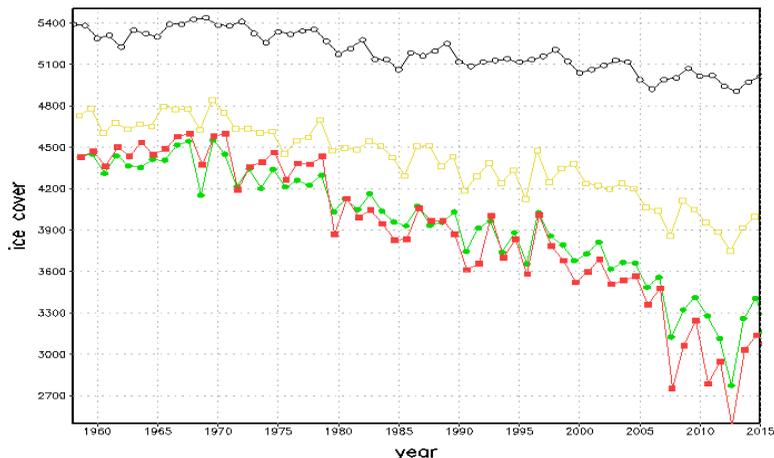


Рис. 1. Изменение среднемесячных концентраций льда за период 1958–2015 гг. по реанализу JRA

Данные, которые были использованы для данной работы, являются значениями в маленьких ячейках размером 1° долготы и 1° широты. Следовательно, Арктический регион покрывается множеством таких ячеек. Анализировалась доля этой ячейки, покрытая льдом. Если одна маленькая ячейка полностью покрыта льдом, то концентрация равна единице, а если в ячейке льда нет, то соответственно концентрация равна нулю, если ячейка наполовину покрыта льдом, то концентрация равна 0,5 и т. д. Далее рассчитывается площадь, покрытая льдом в каждой ячейке

$$S = a \Delta \varphi \cos \varphi \Delta \lambda . \quad (1)$$

где a – радиус Земли, $\Delta \varphi$ – шаг по широте в радианах, $\Delta \lambda$ – шаг по долготе в радианах.

Затем суммируются все эти значения по ячейкам и уже по этим данным строятся графики. Но так как эти переведенные значения все равно бы сохраняли общую структуру, то можно их и не переводить в квадратные метры. Значения, расположенные на оси OY, по сути, показывают сумму долей всех ячеек, занятых льдом.

Из анализа следует, что абсолютный минимум достигнут в сентябре 2012 г. и самые большие изменения происходят в летний период. Ещё одним интересным результатом является то, что до конца 20 столетия минимум в годовом ходе концентрации льда достигался в августе, а в последние десятилетия в сентябре. Для исследования изменчивости количества льда были построены диаграммы Хофмюллера (рис. 2).

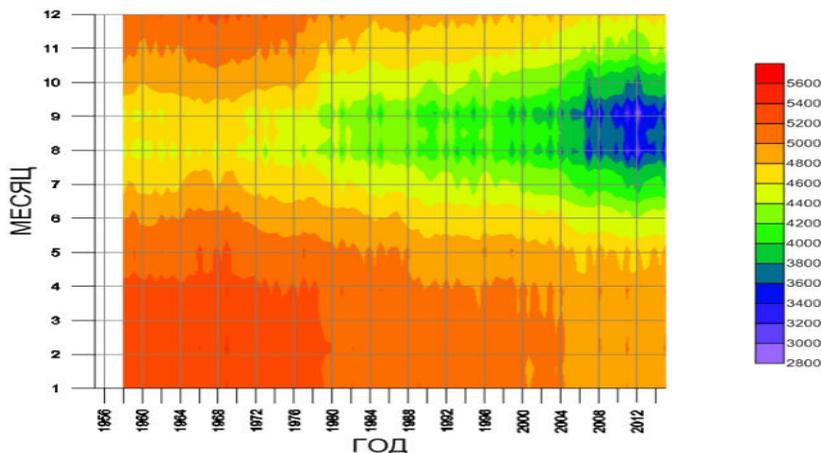


Рис. 2. Временное распределение концентрации льда

На диаграммах Хофмюллера представлен весь ходовой ход площади льда для исследуемого периода.

Из рисунка 2 видно, что с 60-х до 80-х гг. максимальная толщина льда сохраняется с января по апрель, в нескольких годах даже и до мая. Минимальные размеры в этих промежутках наблюдались в августе и сентябре, но больше в августе. Затем с 80-х гг. зимнее максимальное и летнее минимальное количество льда сильно уменьшилось. Это хорошо видно по цветовой палитре рис. 2 – зимний ярко красный резко сменился на оранжевый, в жёлтый цвет на зелёный. Второй аналогичный скачок произошёл в 2004 г. – количество льда уменьшилось, но опять же максимумы наблюдаются с января по май в промежутке с 80-х до 90-х гг. и с января по апрель за последующие годы до 2004. Минимумы так же наблюдаются в августе и в сентябре. Но худшая картина наблюдается с начала 00-х гг., видно, что количество льда резко уменьшилась. Максимумы наблюдаются с января по май, а минимумы, опять же в августе и сентябре, но уже с очень маленькой

концентрацией. Начиная с 1980-х гг. количество месяцев, в которые уменьшается общая площадь льдов Арктики стремительно увеличивается.

На рисунках 3, 4 и 5 представлена среднемесячная концентрация льда для месяцев март, июль и сентябрь.

На данных рисунках в качестве примера представлены среднемесячные данные о концентрации льда по реанализу JRA. По рисунку 3 видно, что в марте 1958 г. лед покрывает почти всю область Арктического региона. В марте, как уже отмечалось ранее, ледовый покров максимальный – он состоит из старого многолетнего лёд и вновь образовавшегося за зиму молодого льда.

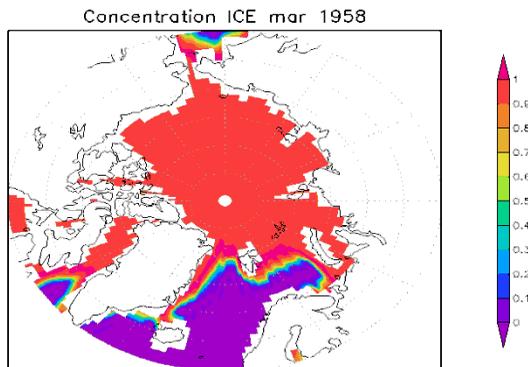


Рис. 3. Среднемесячная концентрация льда за март 1958 г. по реанализу JRA

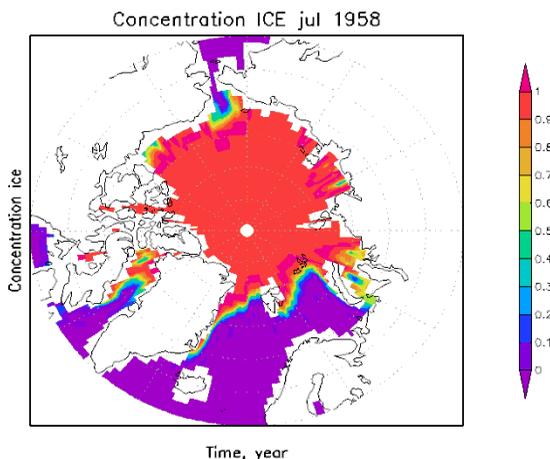


Рис. 4. Среднемесячная концентрация льда за июль 1958 г. по реанализу JRA

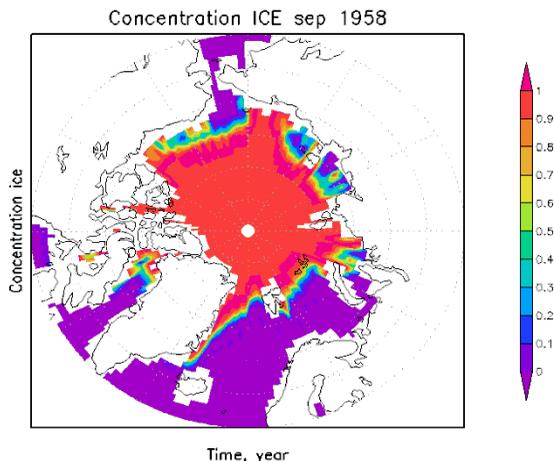


Рис. 5. Среднемесячная концентрация льда за сентябрь 1958 г. по реанализу JRA

На рисунке 4 показана ледовая обстановка за июль 1958 г. Видно, что количество льда уменьшилось, но не повсеместно, а в море Баффина, Баренцевом море и Беринговом проливе, т. е. лёд тает, но не глобально.

На рисунке 5 показан сентябрь 1958 г., когда отмечается минимальное количество льда за данный год. Лёд растаял в Баренцевом, Восточно-Сибирском морях, морях Баффина и Лаптевых, а также у берегов Северном Америки. Скорее всего растаял молодой лёд, а концентрация многолетнего льда не изменилась.

На рисунках 6 и 7 представлены карты концентрации льда, соответствующие его максимальному и минимальному количеству.

Рисунок 6 показывает максимум, он наблюдается в марте 1969 г. Как видно из рисунка, льдом покрыта почти вся водная поверхность полярного региона. Лед отсутствует лишь в Норвежском море, это объясняется тем, что там наблюдается система теплых течений, иными словами, из-за влияния Гольфстрима.

На рисунках 7 наблюдается мрачная картина. Минимальное количество льда отмечается в сентябре 2012 г. График на рисунке 1 недостаточно объемно демонстрирует, а на рис. 6 наблюдается более наглядное изображение. Видно, что лёд остался только у берегов Гренландии и Аляски. Вся Российская и Европейская Арктика полностью свободна ото льда.

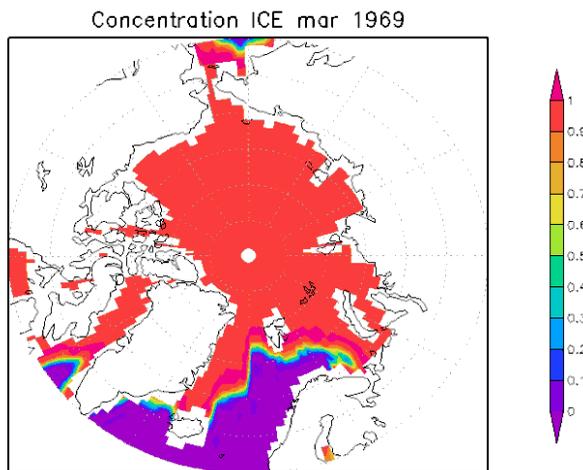


Рис. 6. Максимальное количество льда по реанализу JRA. Март 1969 г.

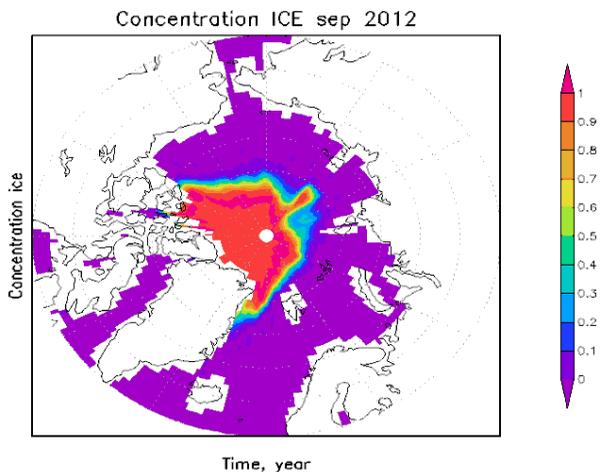


Рис. 7. Минимальное количество льда по реанализу JRA. Сентябрь 2012 г.

Следующий реанализ, который использовался для исследования – это ERA-20 century. Здесь присутствуют данные за период с 1900 по 2010 г. На рисунке 8 представлен временной ход среднемесячной концентрации льда за те же месяцы, что и в предыдущем реанализе.

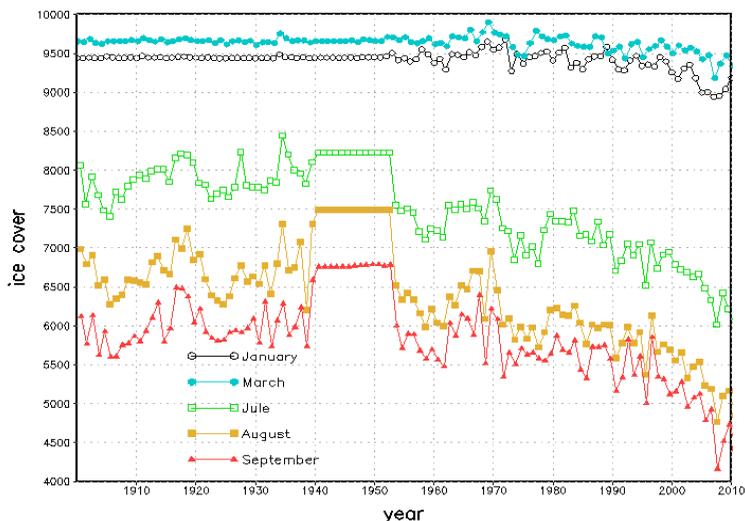


Рис. 8. Изменение среднемесячных концентраций льда за период 1900–2010 гг. по реанализу ERA-20с

Проанализируем график, приведённый на рис. 8. По этому графику видно все недостатки и достоинства реанализа. Видно, что достойные данные о ледовом покрове появились только с 1960-х гг., что во времена Второй Мировой войны данных нет. Поэтому, по сути, увеличение исследуемого периода (по сравнению с реанализом JRA) не происходит – доверять можно только данным с 1960-х гг.

Рассмотрим каждый месяц по отдельности, данный реанализ тоже показывает, что максимальное количество льда наблюдается в марте. С начала наблюдений, т. е. с 1900 по 1960-е гг. изменения не столь велики. Но начиная с 60-х гг. до 2010 г., отмечаются не резкие, но значительные колебания. Январь полностью повторяет колебания марта, но количество льда меньше, что естественно, так как лёд продолжает в это время нарастать. Так же как и в предыдущем анализе, максимальные изменения происходят в летние месяцы. В июле уже отмечаются значительные колебания. Август и сентябрь можно рассмотреть вместе. Но по сравнению с предыдущим реанализом, они различаются по количеству льда, но структура годовых колебаний схожи. Резкие скачки встречаются на протяжении всех лет. Но начиная со второго десятилетия отмечается резкое уменьшение количества льда. Абсолютный минимум достигнут в сентябре 2012 г., как и показывает предыдущий реанализ. Еще, как видно по графику за июль, август и

сентябрь, наблюдается некое повторение данных за промежутки с 1940 по 1953 г.

Количество льда и временной ход этого реанализа и предыдущего принципиально не отличаются, если рассматривать одинаковый период.

Для исследования изменчивости количества льда были построены диаграммы Хофмюллера (рис. 9).

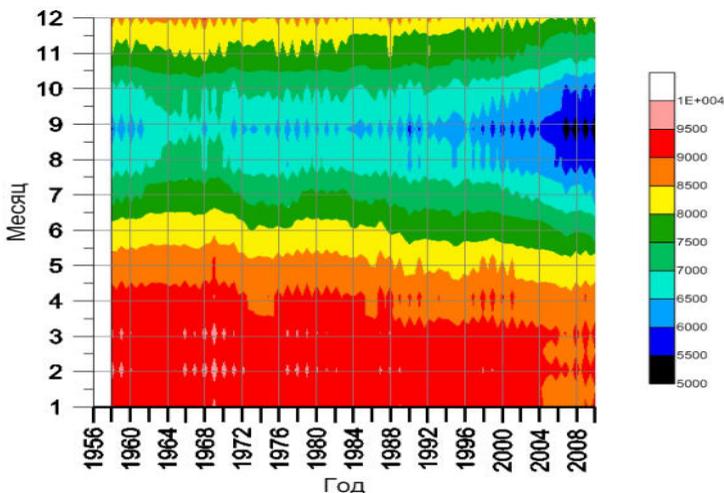


Рис. 9. Временное распределение концентрации льда

Из рисунке 9 видно, что с 1956 по 2004 г. максимальная концентрация льда сохраняется с января по апрель. Минимальные размеры в этих промежутках наблюдались в августе и сентябре, но чаще в сентябре. Затем с 2004 г. до конца наблюдений максимум наблюдается в феврале и марте. Минимумы наблюдаются в сентябре. Но также, как и в предыдущем реанализе, показывается неудовлетворительная картина. С конца 90-х гг. количество льда резко идет на спад и в итоге минимум наблюдается в 2008 г.

На рисунках 10 и 11 представлены карты, соответствующие максимальному и минимальному количеству льда.

Рисунок 10 показывает максимум, он наблюдается в марте 1969 г. Как видно из рисунка, льдом покрыта почти вся водная и не водная поверхность полярного круга. Снова же, лед отсутствует лишь в Норвежском море из-за влияния Гольфстрима.

Рисунок 11 показывает минимум, и он наблюдается в сентябре 2008 г. Сравнивая результаты с предыдущим реанализом, можно заметить, что данная модель ERA-20с учитывает лед и на поверхности материков. Также, если сравнить минимумы для JRA и для ERA-20с, замечается, что данный реанализ показывает большее количество льда, чем в предыдущем реанализе.

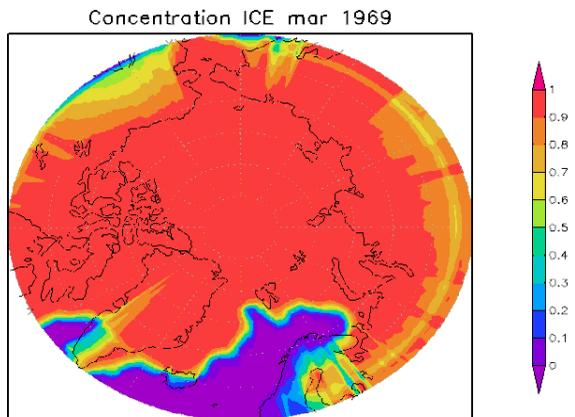


Рис. 10. Максимальное количество льда по реанализу ERA-20с

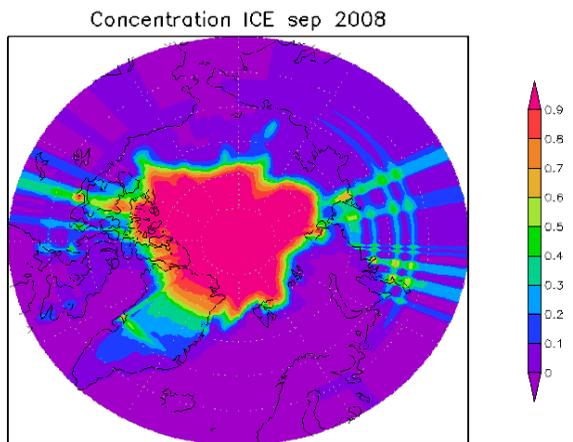


Рис. 11. Минимальное количество льда по реанализу ERA-20с

Сравнив и проанализировав два реанализа, можно сделать вывод, что в целом они все показывают общую картину о состоянии льда в Арктическом регионе и сохраняют схожесть.

Реанализ JRA. Наблюдения по данному реанализу проводятся с 1958 г. по настоящее время.

Реанализ ERA-20с дает изменения за длительный период с 1900 по 2010 г.

Список литературы

1. Доронин Ю. П., Хейсин Д. Е. Морской лед. Л. : Гидрометеиздат, 1975. 318 с.
2. Межгодовая тенденция изменения толщины морского льда в Арктическом бассейне в 1970–1990 –х гг. / А. П. Нагурный, В. Г. Коростелев, О. М. Йоханессен, Е. Ю. Медведченко // Тр. ААНИИ. 2003. Вып. 446. С. 83–98.
3. Реанализ ERA20C [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-20c> (дата обращения: 12.02.2019).
4. Реанализ JRA [Электронный ресурс]. URL: http://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_en.html (дата обращения: 12.02.2019).

УДК 630.431.1 (571.5)

Оценка климатической уязвимости западного побережья оз. Байкал

С. Ж. Вологжина (svologzhina@gmail.com)¹

И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru)¹

К. А. Лощенко (loshchenko@bk.ru)¹

К. В. Савватеева (savvateeva.kseni@mail.ru)^{1,2}

¹ Иркутский государственный университет, г. Иркутск

² Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Иркутск

Аннотация. Проведена пространственно-временная оценка климатической уязвимости западного побережья оз. Байкал по ежедневным данным метеорологических станций за период 1997–2017 гг. Наблюдаемая в последние десятилетия тенденция уменьшения значений индекса климатической уязвимости на байкальских станциях в летние месяцы определяет более благоприятные условия для развития рекреационной деятельности в Байкальском регионе.

Ключевые слова: климатическая уязвимость; экстремальные осадки; максимальный ветер; максимальные температуры; минимальные температуры; оз. Байкал.

Введение

В последние десятилетия межгодовые вариации уровня воды крупных озёр и водохранилищ часто рассматриваются как индикаторы для оценки региональных последствий изменений климата [6]. В подавляющем большинстве работ при анализе последствий изменений климата анализируется многолетний режим температуры воздуха и атмосферных осадков. Не является исключением оз. Байкал, где при-сущая колебаниям притока воды в озеро цикличность с периодом ~20–30 лет в последние десятилетия нарушается [5].

Напомним, что озеро Байкал, которое является национальным достоянием, находится почти в центре Азии на границе Иркутской области и республики Бурятия в РФ, в пределах 51°29'–55°46' с. ш. и 103°43'–109°58' в. д. [1]. Существенное влияние на климат озера оказывает его расположение в своеобразной котловине, со всех сторон окружённой горными хребтами и сопками. В работе исследуется климатический режим западного побережья, которое более скалистое и обрывистое, тогда как рельеф восточного побережья – более пологий (местами горы отступают от берега на десятки километров). С западной прибрежной стороны котловины простираются мощные хребты – Приморский, максимальная высота которого достигает 1728 м (Трёхголовый Голец) и Байкальский с максимальной отметкой на Горе Черского – 2572 м. Котловину озера делят на три части – южную котловину, среднюю и северную котловину, которые разделены поднятиями дна, исключаящие прямой водообмен между водами котловин ниже 400 м [4].

Влияние горного рельефа и ориентация склонов по отношению к господствующим ветровым потокам сказывается в различиях годовых сумм атмосферных осадков, которые варьируют от 200 мм над районом Малого Моря до 1400 мм на наветренных склонах хребта Хамар-Дабан. Наряду с влиянием рельефа существенное влияние на климатические особенности озера Байкал оказывает его огромная водная масса, которая зимой проявляется в отепляющем воздействии на прибрежные территории, а летом озеро оказывает охлаждающее воздействие. Поэтому годовые амплитуды температуры воздуха изменяются от 30 °С до 38 °С над акваторией Байкала, что намного ниже годовых амплитуд за пределами озера (от 41 °С до 50 °С).

В зимний период над Байкальским регионом устанавливается Азиатский антициклон с преобладанием ясной холодной погоды и развитием процессов радиационного выхолаживания, однако над более теплой поверхностью озера Байкал в это время года по приземным

и кольцевым синоптическим картам можно проследить барическую депрессию. Летом происходит усиление циклонической деятельности. В направлении господствующих на высотах южных и юго-западных потоков осуществляется адвекция наиболее сухих и теплых воздушных масс, а при адвекции холода на южные районы Сибири и Монголию происходит образование южных циклонов, с которыми связано выпадение максимального количества атмосферных осадков в годовом распределении.

На ветровой режим в пределах оз. Байкал оказывают влияние такие факторы, как атмосферная циркуляция, особенности рельефа территории и термические различия водной поверхности и окружающей суши. Протяженность озера с юго-запада на северо-восток определяет направление основных ветров над его акваторией – вдоль оз. Байкал и по нормали от берега и озера. Наиболее устойчивым ветровым потоком для акватории всего Байкала является «горная», на Южном Байкале к группе устойчивых ветров можно также отнести «култук», а на Среднем и Северном – «верховик». В течение года в разных районах Байкала наблюдается от 18 до 148 штормовых дней, которые приурочены к весне и осени [2].

Методика исследования

В настоящее время оз. Байкал – зона активной рекреационной и туристической деятельности. В этой связи важно проводить исследование климатических факторов, оказывающих влияние на условия проживания и развития рекреационной деятельности на побережье Байкала.

Для количественной оценки климатической уязвимости территории В.В. Оганесяном [3] предложена формула, учитывающая совместное воздействие изменчивости максимальных (T_{max}) и минимальных температур (T_{min}), которые отражают континентальность климата, а также максимальных сумм атмосферных осадков (P_{max}) и максимальных значений скорости ветра (V_{max}), нормированных на средние значения метеорологических параметров:

$$V_i = \frac{|T_{min}| + |T_{max}|}{|T_{min_{cp.}}| + |T_{max_{cp.}}|} + \frac{P_{max}}{P_{cp.}} + \frac{V_{max}}{V_{cp.}}. \quad (1)$$

В данной работе для оценки климатической уязвимости территории западного побережья оз. Байкал экстремальные значения температуры воздуха, атмосферных осадков и скорости ветра нами нормируются на средние значения самих показателей, что позволяет учиты-

вать межгодовую изменчивость экстремальных значений температурно-влажностных и ветровых характеристик:

$$V_i = \left(\frac{|T_{min}| + |T_{max}|}{|T_{min_{cp.}}| + |T_{max_{cp.}}|} + \frac{P_{max}}{P_{max_{cp.}}} + \frac{V_{max}}{V_{max_{cp.}}} \right) * 100 \%. \quad (2)$$

В качестве исходных данных использованы среднесуточные значения восьми метеорологических станций, расположенных на западном побережье оз. Байкал, предоставленные «Иркутским управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» за период 1997–2017 гг. (табл. 1). Местоположение станций варьирует от 51° с. ш. до 54° с. ш. и от 104° в. д. до 108° в. д., высоты станций изменялись от 453 м (Большой Ушканий) до 487 м (Хужир).

Таблица 1

Расположение метеорологических станций, экстремумы и средние значения индексов климатической уязвимости в 1997–2017 гг.

Станция	Координаты		Высота, м	Индексы климатической уязвимости		
	широта, ° с. ш.	долгота, ° в. д.		максимальное значение	среднее	минимальное значение
Байкальск	51°39'	104°08'	476	654	301	154
Большое Голоустное	52°02'	105°25'	461	601	393	179
Большой Ушканий	53°51'	108°35'	453	510	300	157
Исток Ангары	51°52'	104°49'	469	632	366	242
Сарма	53°06'	106°50'	462	595	388	210
Солнечная	54°02'	108°16'	463	674	386	205
Узур	53°19'	107°33'	461	499	299	152
Хужир	53°12'	107°20'	487	614	337	167

Обсуждение результатов

В таблице 1 представлены средние и экстремальные значения индекса климатической уязвимости, рассчитанные в исследуемый нами период 1997–2017 гг. Средние значения индекса климатической уязвимости изменялись от 299 % на ст. Узур, расположенной в средней части оз. Байкал, до 393 % – на ст. Большое Голоустное в юго-западной оконечности озера. Максимальные значения данного показателя в исследуемый период составили 674 % и отмечались на ст. Солнечная в феврале 2002 г., когда месячные суммы осадков в 4 раза превысили средние многолетние значения, максимальная скорость ветра достигала 36 м/с, а экстремальные значения температуры воздуха в 2 раза были выше средних значений. Минимальные значения индекса климатической уязвимости (152 %) зафиксированы в октябре 2009 г.

на ст. Узур при значениях экстремальных температур, близких к средним многолетним, максимальной скорости ветра ниже средних значений на 3 м/с и при отсутствии атмосферных осадков на станции.

В годовом распределении на трех станциях (Солнечная, Узур и Большой Ушканий) из восьми рассмотренных неблагоприятное воздействие метеорологических факторов наиболее выражено зимой и весной за счет высоких перепадов температур и сильного ветра, а наименьшие значения индекса климатической уязвимости отмечаются в мае и июне (рис. 1). На станциях Хужир и Байкальск наибольшая климатическая уязвимость отмечается в период с ноября по февраль. На байкальской станции Большое Голоустное максимальные значения индекса климатической уязвимости отмечаются летом, в основном за счет высоких показателей изменчивости атмосферных осадков, максимальных и минимальных температур. На станциях Сарма и Исток Ангары годовой ход индекса климатической уязвимости практически не выражен.

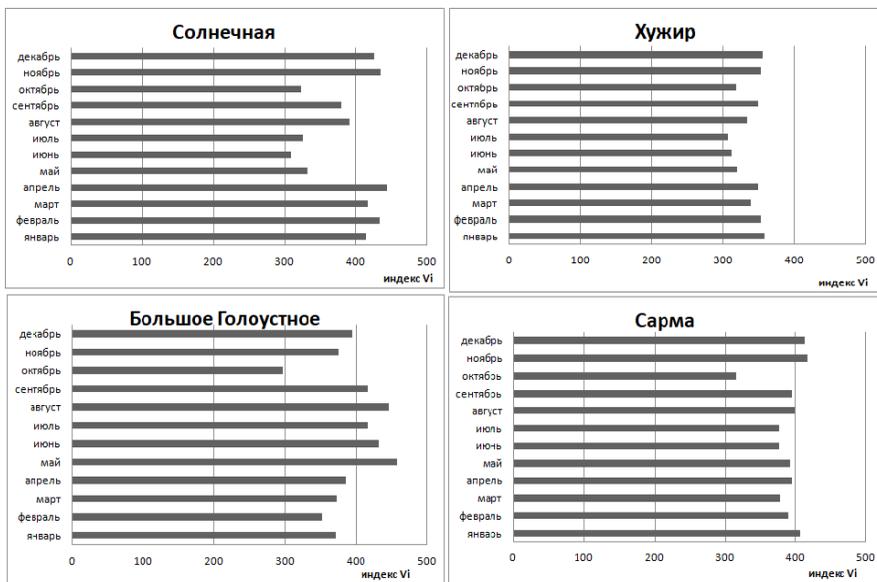


Рис. 1. Средние значения индекса климатической уязвимости байкальских станций в 1997–2017 гг.

В многолетней динамике индекса климатической уязвимости на всех станциях, кроме Хужира и Байкальска, выявлена тенденция к уменьшению его значений в летние месяцы и практически на всех

станциях в сентябре и в период с ноября по январь. Среди метеорологических станций выделяется Исток Ангары, где индекс климатической уязвимости уменьшается во все месяцы, кроме периода с февраля по апрель, когда значения индекса близки к средним многолетним за период 1997–2017 гг.

Уменьшение индекса климатической уязвимости на байкальских станциях в исследуемый период происходит в основном за счет ослабления ветра, что наглядно видно по данным ст. Исток Ангары в различные сезоны года (рис. 2). Следует отметить, что максимальная скорость ветра во все сезоны года вносит наибольший вклад в средние значения индекса климатической уязвимости, который согласно формуле (2) учитывает комплексное воздействие экстремальных значений температуры воздуха, атмосферных осадков и скорости ветра. Далее по вкладу следует изменение максимальных и минимальных температур воздуха, индекс экстремальности которых характеризуется незначительным уменьшением в зимние месяцы и значительными вариациями весной и осенью при частом выходе циклонов на территорию Иркутской области. Межгодовая изменчивость в изменении экстремальных характеристик атмосферных осадков наиболее выражена весной.

Таблица 2

Тенденции изменения индексов климатической уязвимости на байкальских станциях в 1997–2017 гг.

Станция	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Байкальск	↑	~	↑	~	↑	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↑
Большое Голоустное	↓	~	↓	↑	↓	↓	~	↓	↓	↑	↓	↓
Большой Ушканий	↓	↑	↓	~	~	↓	↓	↓	↓	~	↓	↓
Исток Ангары	↓	~	~	~	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Сарма	↓	↑	~	~	↑	↓	↓	↓	↓	↑	~	↓
Солнечная	↓	↑	~	~	↓	↓	↓	↓	~	~	~	↓
Узур	~	↑	~	~	↑	~	↓	↓	~	~	↓	↓
Хужир	↓	↓	↓	↓	↓	~	↑	~	↓	~	↓	↓

↑ увеличение, ↓ уменьшение, ~ без изменений

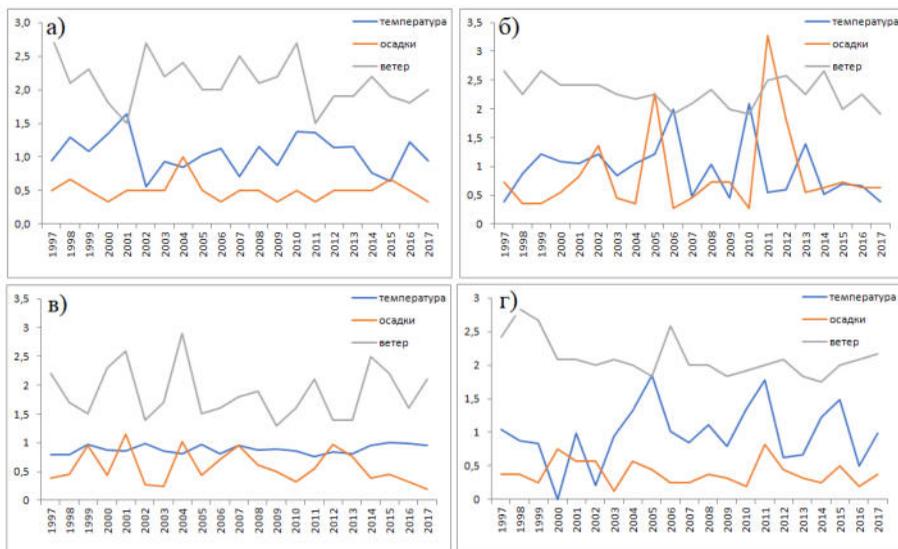


Рис. 2. Средние значения индекса климатической уязвимости на ст. Исток Ангары в январе (а), апреле (б), июле (в) и октябре (г) 1997–2017 гг.

Заключение

Предложена модификация индекса климатической уязвимости, учитывающего комплексное воздействие экстремальных значений температуры воздуха, скорости ветра и атмосферных осадков. Данный показатель рассчитывается для байкальского региона впервые и может быть полезным при оценке влияния климатических факторов на различные сферы деятельности человека.

В исследуемый период 1997–2017 гг. на западном побережье оз. Байкал наибольшая климатическая уязвимость по степени воздействия экстремальных значений метеорологических величин отмечается на юго-западной оконечности озера (ст. Большое Голоустное), а наименьшая уязвимость – в средней части озера (станция Узур).

В годовом распределении большинство станций (62 %) характеризуются максимальной климатической уязвимостью зимой за счет высоких перепадов температур и более сильного ветра и минимальной – летом. На станции Большое Голоустное климатическая уязвимость более выражена летом в основном за счет высокой изменчивости атмосферных осадков и экстремальных температур.

Современные изменения климата западного побережья оз. Байкал характеризуются уменьшением климатической уязвимости во все месяцы, кроме октября и периода с февраля по май, особенно на ст. Исток Ангары, преимущественно на фоне уменьшения максимальных скоростей ветра.

Список литературы

1. Беркин Н. С., Макаров А. А., Русинек О. Т. Байкаловедение : учеб. пособие. Иркутск : Изд-во Ирк. гос. ун-та, 2009. 291 с.
2. Лут Л. И. Типовые байкальские ветры и их устойчивость // Климатические ресурсы Байкала и его бассейна. Новосибирск : Наука, 1976. С. 31–49.
3. Оганесян В. В. Методика расчета климатической уязвимости территории на основе безразмерных климатических индексов // Тр. Гидрометцентра России. 2017. Вып. 366. С. 158–165.
4. Сизова Л. Н. Влияние крупномасштабной атмосферной циркуляции на элементы ледово-термического и водного режима озера Байкал : дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск, 2017. 135 с.
5. Особенности современных изменений притока воды в озеро Байкал / В. Н. Синюкович, Л. Н. Сизова, М. Н. Шимараев, Н. Н. Курбатова // География и природ. ресурсы. 2013. № 4. С. 57–63.
6. Yuan Y., Zeng G., Liang J. Variation of Water Level in Dongting Lake over a 50-Year Period: Implications for Impacts of Anthropogenic and Climatic Factors // Journal of Hydrology. 2015. Vol. 525. P. 450–456.

УДК 551.5

Межгодовая изменчивость общего облачного покрова в июле на юге Иркутской области, Бурятии и в Монголии по данным архива ECMWF ERA-Interim

Е. В. Девятова (devyatova@iszf.irk.ru)¹

О. Ю. Антохина (olgayumarchenko@gmail.com)²

И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru)³

В. И. Мордвинов (v_mordv@iszf.irk.ru)^{1,3}

¹ Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

² Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск

³ Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. В работе выполнено сравнение межгодовой динамики общей облачности (total cloud cover, TCC, архив реанализа ECMWF ERA-Interim) с межгодовыми изменениями атмосферных осадков архива GPCC на территории бассейна Селенги с 1979 по 2016 г. Сравнение показало хорошее соответствие долговременных тенденций и экстремальных вариаций этих двух характеристик, начиная с 1989 г. Наибольшие расхождения отмечаются в период с 1982 по 1989 г. Изучены особенности межгодовой динамики TCC в июле с 1989 по 2016 г. в южном районе Иркутской области, в российской и монгольской части бассейна Селенги, а также в южной части Восточных Саян. Выделены периоды, в которые межгодовые вариации TCC во всех четырех

районах имеют одинаковый характер. Самый длительный из них – это период с 1998 по 2002 г. Рассмотрены особенности крупномасштабной циркуляции для июля 1990 г. (положительная аномалия осадков в бассейне Селенги, высокие значения ТСС во всей исследуемой области) и 1992 г. (отрицательная аномалия осадков в бассейне Селенги, высокие значения ТСС в южном районе Иркутской области, Восточном Саяне и монгольской части бассейна Селенги и низкие значения ТСС в российской части бассейна). Выявлено, что в июле 1990 г. отмечалось интенсивное атмосферное блокирование над Азиатским континентом, а в июле 1992 г. блокировки длительностью более 5 суток над Азиатским континентом не наблюдались.

Ключевые слова. Облачность, общая циркуляция атмосферы, региональная климатология, атмосферные блокировки, атмосферные осадки.

Введение

Исследования долговременных изменений общего количества облачности могут быть полезны в решении ряда прикладных задач региональной климатологии. В данной работе мы изучаем вариации общей облачности на основе данных реанализа ERA-Interim Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) [1] для территории, охватывающей южные районы Иркутской области и Бурятии, северную и центральную части Монголии.

Облачность в проектах реанализа является расчетной величиной, а значит, неизбежны ошибки, связанные со схемами параметризации, используемыми в этих моделях. Поэтому предварительно необходимо сопоставить ее с данными прямых наблюдений или с какими-то косвенными характеристиками. В данной работе мы используем для сравнения данные о распределении суммарных месячных значений количества атмосферных осадков архива GPCC [2] на территории бассейна реки Селенги (юг Бурятии, северная и центральная части Монголии). Выбор региона обусловлен хорошей изученностью долговременной динамики стока Селенги и режима атмосферных осадков в ее бассейне. Известно, что в бассейнах озера Байкал и реки Селенги (площадь бассейна которой составляет 83,4 % площади бассейна озера) с 1996 г. наблюдается затяжной маловодный период [3–5], преимущественно обусловленный начавшимся в этом году снижением количества осадков, выпадающих в летний период в бассейне этой реки [4; 5]. Сопоставляя данные об осадках с данными об общем количестве облачности мы можем проверить степень сходства вариаций этих двух характеристик, а также более надежно оценить долговременные изменения количества выпадающих осадков в регионе.

Данные

Общий облачный покров (Total cloud cover, TCC): осредненные за месяц по среднесуточным значениям данные в узлах сетки $1,0^{\circ} \times 1,0^{\circ}$ архива ECMWF ERA-Interim с 1979 по 2016 г. [1]. Атмосферные осадки: суммарные за месяц значения в узлах сетки $1,0^{\circ} \times 1,0^{\circ}$ архива GPCC с 1979 по 2016 г. [2]. Архив представляет собой данные наблюдений, интерполированные в узлы сетки.

Для анализа крупномасштабной структуры метеорологических полей при экстремально высоких и низких значениях TCC и количества осадков в бассейне Селенги (1990 и 2007 гг.) были использованы данные архива ECMWF ERA-Interim о высоте изобарической поверхности 500 гПа; горизонтальных компонентах ветра на изобарической поверхности 500 гПа; потенциальной температуре на динамической тропопаузе (PV- θ).

Регион исследования

На рисунке 1 представлена карта исследуемой территории.

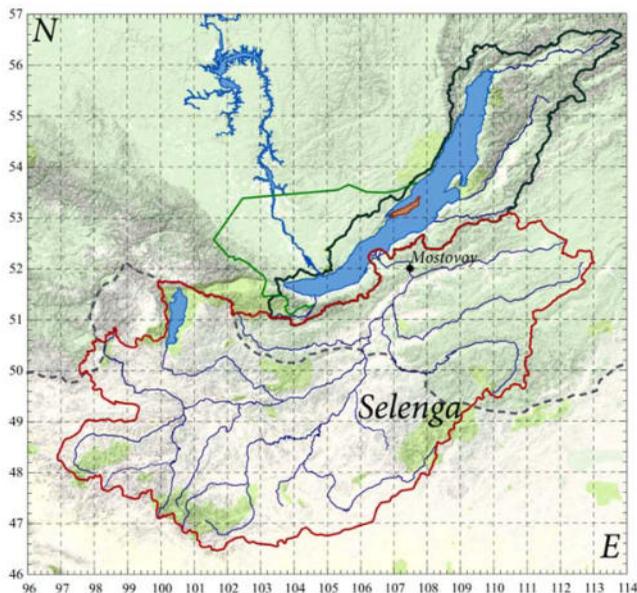


Рис. 1. Карта исследуемой территории. Черный и красный контуры – бассейн озера Байкал (красный контур – бассейн реки Селенги, черный – остальная часть бассейна озера). Зеленый контур – южный район Иркутской области. Пунктирная кривая – государственная граница между Российской Федерацией и республикой Монголия

Методика

Для каждого июля с 1979 по 2018 г. среднемесячные значения ТСС суммировались в узлах сетки в интересующей нас области и затем усреднялись по этой области. За этот же период суммировались суммарные значения количества осадков и затем пересчитывались в относительные единицы по формуле:

$$P_{anom} = \frac{P_i}{\bar{P}} - 1$$

где P_i – осадки в текущем году, \bar{P} – средние осадки за 1950–1990 гг.

Для анализа крупномасштабной структуры метеорологических полей при экстремально высоких и низких значениях ТСС и количества осадков над бассейном Селенги (1990 и 2007 гг.) были произведены расчеты индекса блокирования GHGS [6] по формуле:

$$GHGS = \frac{Z(\varphi_0) - Z(\varphi_s)}{\varphi_0 - \varphi_s}$$

здесь Z – высота геопотенциальной поверхности 500 гПа, $\varphi_n = 80^\circ$ с. ш. $\pm \Delta$, $\varphi_0 = 60^\circ$ с. ш. $\pm \Delta$, $\varphi_s = 40^\circ$ с. ш. $\pm \Delta$. $\Delta = -5^\circ, -2,5^\circ, 0^\circ, 2,5^\circ$ или 5° , как было принято в работе [7].

Результаты

На рисунке 2 представлены графики межгодовых изменений ТСС и атмосферных осадков в июле на территории бассейна реки Селенги с 1979 по 2016 г. Коэффициент корреляции между этими двумя графиками составляет 0.6 и является достоверным при уровне значимости 98 %. Наибольшие отличия наблюдались в период с 1982 по 1989 г. Мы убрали из рядов по 11 значений ТСС и количества осадков с 1979 по 1989 г. включительно. Затем рассчитали коэффициент корреляции между оставшимися 27 парами значений, который оказался равен 0,78 (при уровне значимости 98 %). Мы полагаем, что расхождение в динамике ТСС и осадков в период с 1982 по 1989 г. может быть связано с некорректным воспроизведением облачности моделью ECMWF над исследуемым районом в этот период. Данное предположение требует дальнейшей проверки (например, сравнения с данными других архивов реанализа или данными прямых наблюдений за облачностью). Отметим, что хорошо видна тенденция к снижению значений ТСС и количества осадков, начиная с середины 1990-х гг.

Таким образом, на территории бассейна Селенги и в прилегающих к нему районах с 1989 г. данные ТСС архива ECMWF ERA-

Interim и данные о количестве выпадающих осадков архива GPCC имеют одинаковую трендовую составляющую и неплохо согласуются между собой. Это позволяет, во-первых, использовать эти данные в исследованиях долговременных климатических изменений и экстремальных погодных событий, и, во-вторых, подтверждает тенденции, выявленные по данным о количестве осадков в регионе.

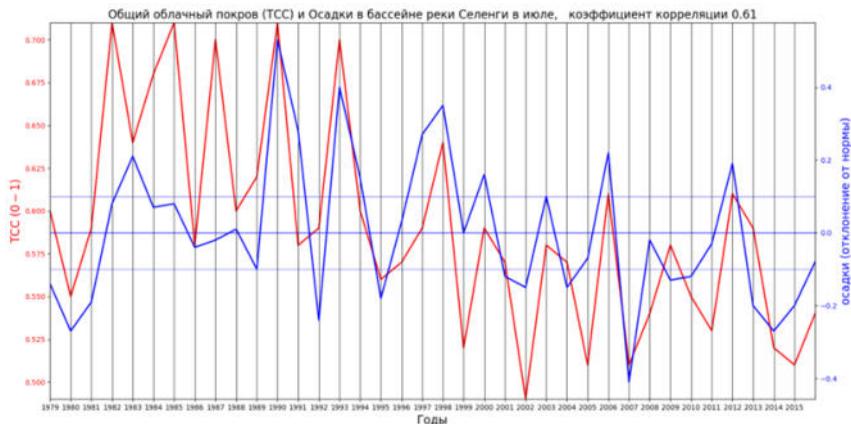


Рис. 2. Графики межгодовых изменений общей облачности TCC (ERA-Interim) и атмосферных осадков (GPCC) в бассейне реки Селенги в июле

На рисунке 3 показаны графики межгодовых вариаций TCC в июле с 1989 по 2016 г., рассчитанные для южного района Иркутской области (ограничен зеленым контуром на рис. 1), российской части бассейна Селенги и монгольской части бассейна Селенги, а также для горной области в западной части республики Бурятия (к северо-востоку от озера Хубсугул, см. рис. 1). Отметим, что для Восточных Саян характерны более высокие значения TCC, чем для остальных трех районов.

Рисунок 3 показывает, что в отдельные периоды межгодовые вариации TCC во всех четырех районах имеют одинаковый характер, например, с 1989 по 1991 г.; с 1998 по 2002 г.; с 2005 по 2007 г.; с 2008 по 2010 г. Самый длительный из них – это период 1998–2002 гг. Возможно, что в эти интервалы времени для всей изучаемой территории были характерны однотипные циркуляционные процессы, тогда как, например, в июле 1992 г. значения TCC выросли по сравнению с июлем предыдущего года в монгольской части бассейна Селенги, Восточных Саянах и, незначительно, в южном районе Иркутской обла-

сти, а в российской части бассейна Селенги величина ТСС, наоборот, по сравнению с предыдущим годом, снизилась. Рисунок 4 показывает распределения ТСС в июле 1990 (слева) и 1992 г. (справа)

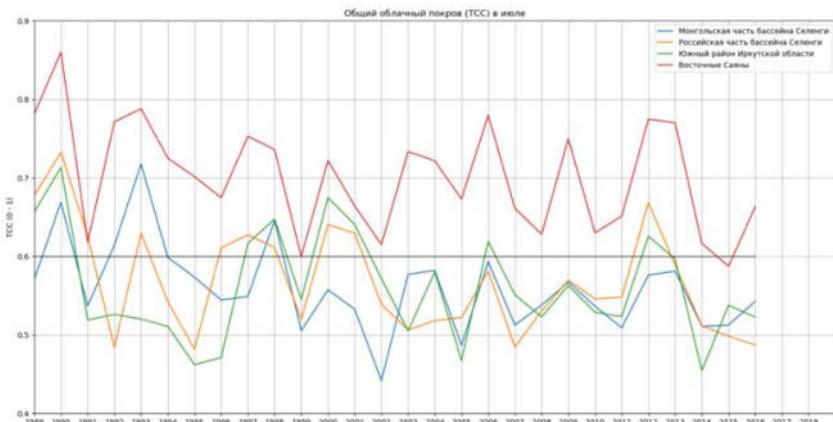


Рис. 3. Графики межгодовых вариаций ТСС отдельно в монгольской (синий цвет) и российской (оранжевый) частях бассейна Селенги, южном районе Иркутской области (зеленый) и в юго-восточной части Восточных Саян (красный)

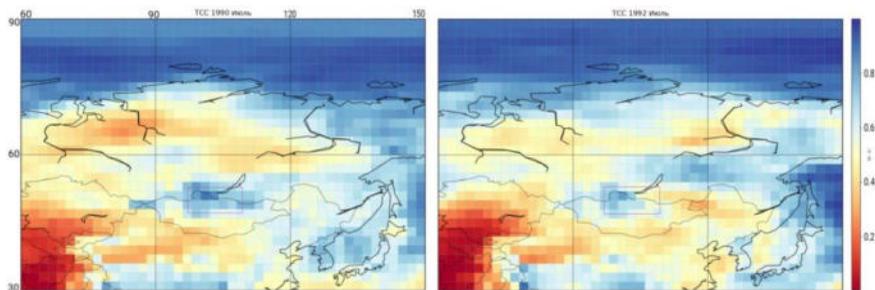


Рис. 4. Среднемесячное распределение ТСС в июле 1990 и 1992 гг.

Рассмотрим характер крупномасштабной циркуляции над Евразией и метеорологические условия над исследуемым регионом для двух июлей: 1990 и 1992 гг.

1990 г. График на рис. 2 показывает, что в июле этого года в бассейне Селенги выпали обильные осадки (самая большая по величине положительная аномалия за весь исследованный нами период, равная +0,53). В наших предыдущих исследованиях [8; 9] было показано, что в июле 1990 г. выпадению обильных осадков над бассейном Селенги предшествовали и сопутствовали атмосферные блокингги над Азиат-

ским континентом. Блокингам, их определению, механизмам формирования, погодным условиям посвящено огромное количество работ, см. например [6; 7; 10; 11].

На рисунке 5 представлена диаграмма «долгота–время» индекса блокирования GHGS для июля 1990 г., на которой видно, что в 1990 г. для июля характерно интенсивное атмосферное блокирование над Азиатским континентом и Охотским морем. В первой половине июля блокинги развивались над Уралом – Западной Сибирью (60–90 в. д.), что способствовало закачке арктического воздуха на континент (см. рис. 6) и Дальним Востоком – Охотским морем (120–160 в. д.), что способствовало поступлению на континент воздушных масс из области Восточно-Азиатского летнего муссона (см. рис. 6). Одновременно с этими двумя блокингами было идентифицировано слабое блокирование над Восточной Сибирью (90–120 в. д.). В середине июля, одновременно с разрушением западносибирского и дальневосточного блокингов, начал развиваться второй в этом месяце блокинг над Восточной Сибирью, более интенсивный, чем первый. В нашей работе [9] было показано, что на станциях, расположенных в российской части бассейна Селенги, наблюдалось выпадение атмосферных осадков во время обоих блокирований над Восточной Сибирью.

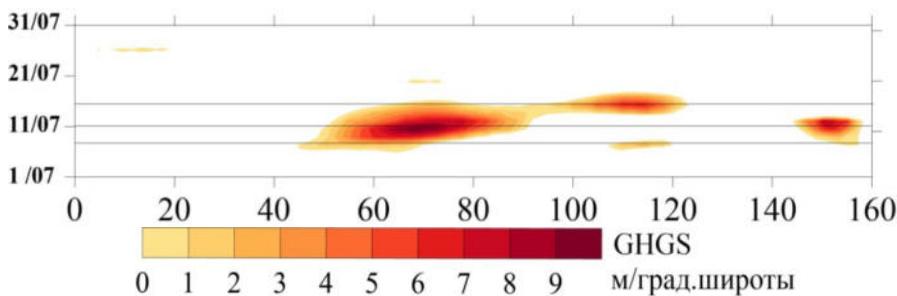


Рис. 5. Диаграмма «долгота–время» индекса блокирования GHGS для июля 1990 г.
 По оси X – градусы восточной долготы.
 По оси Y – даты с 01.07.1990 по 31.07.1990

Рисунок 6 демонстрирует распределения PV- θ (заливка) и горизонтального ветра на поверхности 500 гПа (изолинии) 7, 11 и 15 июля 1990 г. (эти даты отмечены горизонтальными линиями на диаграмме рис. 5).

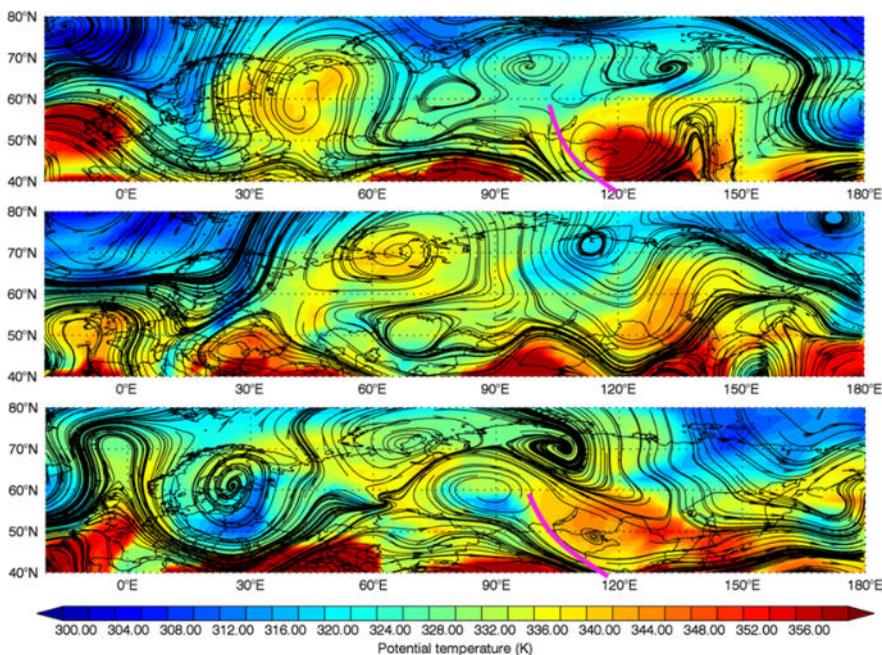


Рис. 6. Распределения PV- θ (заливка) и горизонтального ветра (изолинии) 7 июля (верхняя панель), 11 июля (средняя панель) и 15 июля (нижняя панель) 1990 г.

В поле ветра на рисунке 6 хорошо видна пространственная структура блокингов. 7 и 15 июля в поле PV- θ , являющейся удобной характеристикой для анализа происхождения воздушных масс, видно, что во время восточносибирских блокирований граница между «арктической» и «муссонной» воздушными массами была ориентирована с северо-запада на юго-восток приблизительно по центру бассейна Селенги (розовая кривая на верхней и нижней панели рис.. 6). Мы полагаем, что именно этот фактор должен был способствовать усилению фронтальной и циклонической деятельности в этих районах и, в итоге, приводить к выпадению осадков. Для анализа и проверки этого предположения необходим дальнейший углубленный анализ синоптических процессов, протекавших на изучаемой территории в течение описанных событий блокирования.

1992 г. В июле этого года отмечалась отрицательная аномалия осадков в бассейне Селенги (-0,24, см. рис. 2). На рисунке 7 показана диаграмма «долгота – время» индекса блокирования GHGS для июля 1992 г. Видно, что в июле этого года над Азиатским континентом не

было продолжительных блокирований. В первой декаде месяца были блокинги над Атлантикой и Тихим океаном (их части видны на диаграмме). Во второй декаде в течение 1–2 суток наблюдались блокинги над Восточной Сибирью (11–12 и 20–22 июля) и Западной Сибирью (18 июля). Однако, если строго подходить к определению блокинга, длительность события блокирования должна составлять не менее 5 суток. Блокинг длительностью более 5 суток в этом месяце наблюдался только над Европейским континентом в третьей декаде месяца.

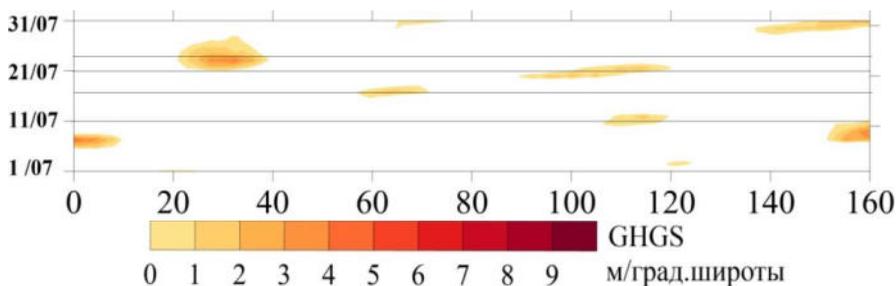


Рис. 7. Диаграмма «долгота – время» индекса блокирования GHGS для июля 1992 г. По оси X – градусы восточной долготы. По оси Y – даты с 01.07.1992 по 31.07.1992

На рисунке 8 сверху вниз показаны распределения PV- θ (заливка) и горизонтального ветра (изолинии) для 11, 18, 21 и 23 июля 1992 г. Циркуляция атмосферы 11 июля (слабый блокинг над Восточной Сибирью) способствует поступлению в бассейн Селенги холодной воздушной массы с северо-запада и теплой с юго-востока. Однако структура потока оказалась неустойчивой, блокинг не получил дальнейшего развития, и анализ последующих двух суток (иллюстрации здесь не приводятся) показал, что холодный воздух сместился в восточном направлении по северу Иркутской области, минуя бассейн Селенги. На распределениях 18, 21 и 23 июля непосредственно над бассейном Селенги виден перенос воздуха с северо-запада на юго-восток. Выяснение особенностей циркуляции в эти периоды требует более углубленного анализа и выходит за рамки данной работы.

Заключение

В работе выполнено сравнение межгодовых изменений общей облачности (*total cloud cover*, TCC, архив реанализа ECMWF ERA-Interim), являющейся расчетной величиной, с межгодовыми изменениями атмосферных осадков архива GPCC (данные наблюдений, интерполированные в узлы сетки) на территории бассейна Селенги с

1979 по 2016 г. Сравнение показало хорошее соответствие долговременных тенденций и экстремальных вариаций этих двух характеристик с 1989 г. Наибольшие расхождения в межгодовой динамике ТСС и осадков отмечаются в период с 1982 по 1989 г. Мы полагаем, что они могут быть связаны с некорректным воспроизведением облачности моделью ECMWF над исследуемой территорией.

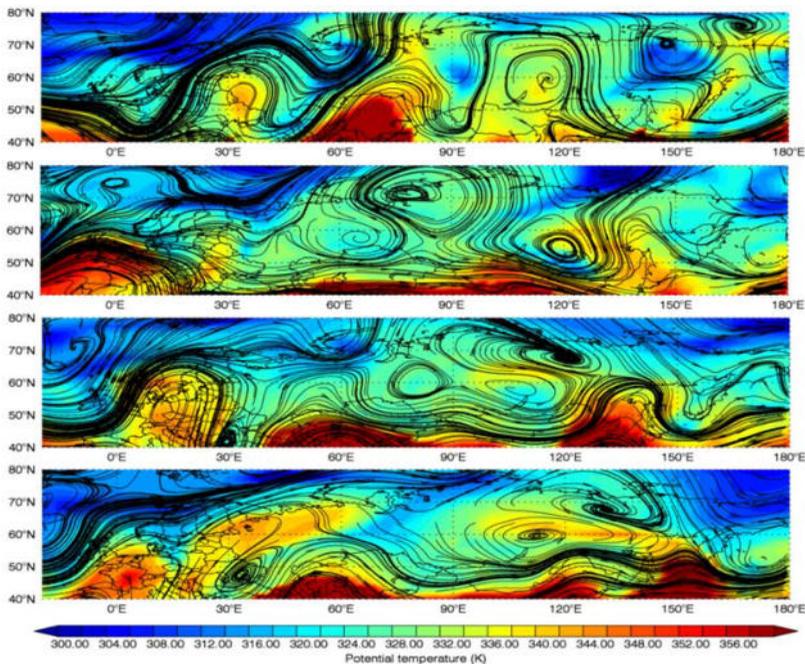


Рис. 8. Распределения PV- θ (заливка) и горизонтального ветра (изолинии) 11, 18, 21 и 23 июля 1992 г. (сверху вниз)

Изучены особенности межгодовой динамики ТСС в июле с 1989 по 2016 г. в южном районе Иркутской области, отдельно в российской и монгольской части бассейна Селенги, а также в южной части Восточных Саян. Выделены периоды, в которые межгодовые вариации ТСС во всех четырех районах имеют одинаковый характер, самый длительный из них – это период с 1998 по 2002 г.

Рассмотрены особенности крупномасштабной циркуляции в июлях 1990 г. (положительная аномалия осадков в бассейне Селенги, высокие значения ТСС во всей исследуемой области) и 1992 г. (отрицательная аномалия осадков в бассейне Селенги, высокие значения

ТСС в южном районе Иркутской области, Восточном Саяне и монгольской части бассейна Селенги и низкие значения ТСС в российской части бассейна). Показано, что в июле 1990 г. отмечалось интенсивное атмосферное блокирование над Азиатским континентом по общей схеме: одновременное блокирование над Западной Сибирью (вовлечение на континент арктического воздуха) и Дальним Востоком (вовлечение на континент муссонных воздушных масс) и вслед за этим атмосферное блокирование над Восточной Сибирью. При такой конфигурации блокировок в систему циркуляции над регионом (а, значит, и на территорию бассейна) поступали арктические и муссонные воздушные массы. В отличие от 1990 г., в июле 1992 г. блокировки длительностью более 5 суток над Азиатским континентом не наблюдались.

Авторы выражают благодарность Е. Н. Осипчуку (к.т.н., ИСЭМ СО РАН) за подготовку данных о границах водосбора и речной сети озера Байкал и реки Селенги, а также Мртыновой Ю. В. (к.ф.-м.н., ИМКЭС СО РАН) за подготовку и визуализацию данных о горизонтальном ветре и PV- θ архива ECMWF ERA-Interim.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда проект No 17-77-10035.

Список литературы

1. The ERA-Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System / D. P. Dee [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. Vol. 137, N 656. P. 553–597. doi:10.1002/qj.828.
2. Schneider, Udo; Becker, Andreas; Finger, Peter; Meyer-Christoffer, Anja; Ziese, Markus (2018): GPCC Full Data Monthly Product Version 2018 at 1.0°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historical Data. DOI: 10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V2018_100.
3. Возможные изменения гидрологических характеристик в связи с регулированием стока в бассейне реки Селенги / И. В. Бычков [и др.] // География и природ. ресурсы. 2017. № 3. С. 75–86.
4. Changes in the summertime atmospheric circulation over East Asia and formation of long-lasting low-water periods within the Selenga river basin / T. V. Bereznykh [et al.] // Geography and Natural Resources. 2012. Vol. 33, N 3. P. 223–229. <https://doi.org/10.1134/S1875372812030079>.
5. Runoff fluctuations in the Selenga River Basin / N. L. Frolova, P. A. Belyakova, V. Y. Grigoriev, A. A. Sazonov, L. V. Zotov, J. Jarsjö // Regional Environmental Change. 2017. N 17. P. 1965–1976.
6. Tibaldi S., Molteni F. On the operational predictability of blocking // Tellus. 1990. Vol. 42A. P. 343–365.
7. A Climatology of Northern Hemisphere Blocking / D. Barriopedro [et al.] // Journal of Climate. 2006. Vol. 19, N 6. P. 1042–1063. doi:10.1175/JCLI3678.1.
8. Peculiarities of the atmospheric blocking events over the Siberia and Russian Far East region during summertime / O. Yu. Antokhina, P. N. Antokhin, E. V. Devjatova, V. I. Mordvinov // Proceedings of SPIE. 2017. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10466/104665V/Peculiarities-of-the-atmospheric-blocking-events-over-the-Siberia-and/10.1117/12.2287311.full?SSO=1>.

9. Динамические процессы в атмосфере, обуславливающие аномалии осадков в Восточной Сибири и Монголии в летний период / О. Ю. Антохина, П. Н. Антохин, Е. В. Девятова, В. И. Мордвинов // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2018. Т. 1. С. 10–27. DOI: 10.21513/2410-8758-2018-1-10-27.

10. Rex D. F. Blocking Action in the Middle Troposphere and its Effect upon Regional Climate // *Tellus*. 1950. Vol. 2, N 3. P. 196–211.

11. Pelly J. L., Hoskins B. J. A New Perspective on Blocking // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2003. Vol. 60, N 5. P. 743–755.

УДК 911.6-911.7

Региональные особенности взаимосвязи изменений приземной температуры воздуха, снежного покрова и температуры почвы в условиях Восточно-Европейской равнины

Л. М. Китаев (lkitaev@mail.ru)¹

В. А. Аблеева (sfm0@yandex.ru)²

Е. Д. Коробов (forest@mail.ru)³

А. С. Желтухин (azheltukhin@mail.ru)³

¹ *Институт географии РАН, г. Москва*

² *Приокско-террасный государственный природный биосферный заповедник, Московская обл. Серпуховской р-н, пос. Данки*

³ *Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник, Тверская обл., Нелидовский р-н, пос. Заповедный*

Аннотация. Выделены типичные для Восточно-Европейской равнины фазы изменений температуры почвы в условиях сезонного хода толщины снега и приземной температуры воздуха. На всей исследуемой территории ход температуры почвы в период с устойчивым снежным покровом отличается малым диапазоном изменений и незначительной вариабельностью – вне зависимости от ландшафтных условий. Значимые многолетние тенденции хода температуры почвы характерны для малоснежных осеннего и весеннего периодов, равно как и значимая в это время корреляционная связь температуры почвы и температуры воздуха при отсутствии статистических связей в снежный период. Появление устойчивого снежного покрова вызывает резкое снижение вариабельности температуры почвы – опять же вне зависимости от регионального разнообразия ландшафтных условий. В итоге, проведена количественная оценка реакции температурного режима почвы на сезонную и многолетнюю изменчивость снежного покрова и климата: наличие устойчивого снежного покрова определяет для температуры почвы ход в узком коридоре значений, низкую вариабельности и незначительные многолетние тренды вне зависимости от типа растительности и изменчивости метеорологических условий последних десятилетий – на локальном и региональном пространственных уровнях Восточно-Европейской равнины.

Ключевые слова: толщина снега, приземная температура воздуха, температура почвы, пространственное распределение, многолетний ход.

Введение

Снежный покров, занимающий в холодный период года значительную площадь в Северном полушарии, играет здесь роль связующего звена между изменчивостью климата и процессов на поверхности суши. Будучи зависимым от атмосферных явлений, снежный покров оказывает существенное влияние на гидрологические процессы [1; 2 и др.], на состояние почвы и растительности [3; 4 и др.]. С другой стороны, резкое изменение альбедо с наступлением зимы и особенно распределения снега в связи с рельефом и растительностью, обуславливают через радиационный баланс характер изменений климата. Взаимосвязь термики верхних слоев почвы и снежной толщи во многом определяют склоновый сток весной и состояние биоты, в связи с чем В. А. Кудрявцевым [5] уже в 1954 г. была предложена система уравнений, описывающих процесс теплообмена в цепочке грунт – снежный покров – атмосфера. Подобные работы проводились как для зоны сезонного промерзания почвогрунтов, так и, в большей степени, для территорий с вечной мерзлотой, в результате чего уточнялся механизм промерзания почвы в условиях потепления второй половины XX – начала XXI в.

Вместе с тем соотношение сезонного хода приземной температуры воздуха, толщины снега и температуры почвы неоднозначно и оценено недостаточно, особенно на уровне региональных пространственно-временных обобщений, хотя данный вопрос имеет важное значение, в частности при модельных расчетах снегозапасов с использованием спутниковых данных [6; 7]. Так, выявлено наиболее тесное взаимодействие исследуемых параметров в начале снежного периода при, тем не менее, недостаточной изученности региональных различий сопряженности хода характеристик [8; 9]. В И. Слепцов с соавторами [10] предложил алгоритм расчета количества циклов замерзания и оттаивания мерзлых грунтов в связи с изменениями температуры воздуха – но только для осеннего и весеннего малоснежных периодов Центральной Якутии.

Основная цель проведенных исследований состоит в оценке характера пространственно-временных изменений температурного режима почвы в условиях изменений снежного покрова и температуры почвы последних десятилетий – в различных ландшафтных и климатических условиях Восточно-Европейской равнины.

Методические подходы

Ранее нами был проведен анализ результатов экспериментальных наблюдений сезонной изменчивости приземной температуры воздуха, толщины снежного покрова и температуры почвы – в Приокско-Террасном и Центрально-Лесном заповедниках (Московская и Тверская области) для холодного периода 2013/14, 2014/15 и 2015/16 гг. [11]. Так, по данным наблюдений на экспериментальных площадках в лесных массивах с преобладанием лиственных и хвойных пород, а также на открытых пространствах в холодный период года (октябрь – май) были выделены фазы изменений температуры почвы в условиях сезонного хода приземной температуры воздуха и толщины снега – однотипные для участков с различным видовым составом растительности в условиях зим разной снежности. Выявлено повсеместное постоянство температуры почвы на глубине 10-40 см в период с устойчивым снежным покровом – в диапазоне $+1,0 \dots -1,0$ °C, что говорит о малой в этот период зависимости температуры почвы от типа растительности, изменений толщины снега и колебаний приземной температуры воздуха ввиду теплоизолирующих свойств снежной толщи и значительной, после осенних дождей, влажности почвы. Аналогичные результаты были получены по данным наблюдений метеостанций Великие Луки и Тула – при расстоянии между ними и заповедниками соответственно 150 км к югу и 100 км к северу и расстоянии между крайними объектами наблюдений около 750 км с севера на юг.

Логичным продолжением проведенных работ можно считать переход от локального пространственного уровня к уровню региональному – к исследованию реакции температуры почвы на изменения характеристик снежного покрова и климата в разных ландшафтных условиях Восточно-Европейской равнины. Территории южнее широты 50° в данном случае не рассматривались ввиду возможного возникновения ошибок при статистическом анализе небольших здесь снегозапасов на равнине и весьма неравномерного распределения снежного покрова и промерзания почвы в горах. В качестве исходной информации использованы суточные данные [16] приземная температура воздуха, толщина снежного покрова и температура почвы по материалам наблюдений 75-ти метеостанций Росгидромета с наиболее длинными синхронными рядами исследуемых характеристик (1989–2015 гг.). Оценивается холодный период года, объединяющий зимнее время с устойчивым снежным покровом (декабрь – март), а также малоснежные предзимье (октябрь-ноябрь) и весну (апрель – май). Преем-

ственность результатов проведенных ранее локальных исследований и представляемых здесь обобщений регионального уровня основана на использовании единых методик Росгидромета при измерениях приземной температуры воздуха и толщины снега [12], а также соответствия полученных нами результатов общим характеристикам климата Второго оценочного доклада Росгидромета [13]. Измерения температуры почвы в заповедниках проводились с использованием автоматических датчиков (логгеров) на глубинах 10, 20 и 40 см, на метеостанциях – вытяжными термометрами, где нами использованы данные для глубин 20, 40 и 80 см. Анализ данных наблюдений в заповедниках и на метеостанциях Великие Луки и Тула показали отсутствие значимых различий замеров автоматическими датчиками и вытяжными термометрами для температуры почвы до 40 см глубины [11]. Данные метеостанций о температуре на глубине 80 см, при сходстве динамики с температурой вышележащих слоев почвы, дают дополнительную информацию для региональных обобщений. В результате, нами было принято решение о возможности обобщения результатов локальных (данные заповедники) и региональных (данные метеостанции) наблюдений.

Сезонная изменчивость температурного режима почвы, снежного покрова и приземной температуры воздуха

Как показали результаты проведенных нами ранее экспериментальных работ в Приокско-Тerrasном и Центрально-Лесном заповедниках (Московская и Тверская области, 2014–2016 гг.), сезонный ход температуры почвы на глубине до 40 см стабилен в период с устойчивым снежным покровом: колебания происходят в диапазоне $-1,0 \dots +1,0$ °С и соответствующим малыми колебаниями средних величин [11] – в условиях разной снежности зим, изменений год от года приземной температуры воздуха, различиях в растительном покрове. Аналогичный сезонный ход параметров показывают среднесуточные данные по 75 метеостанциям Восточно-Европейской равнины. В качестве примера нами рассматриваются результаты наблюдений расположенных в разных ландшафтных условиях метеорологических станций Нарьян-Мар – $67,63$ ° с. ш., $53,03$ в. д., Сыктывкар – $61,68$ с. ш., $50,78$ в. д. и Валуйки – $50,22$ с. ш., $38,1$ в. д. [16].

На рисунке 1 представлены графики сезонного хода характеристик каждой из трех станции, полученные путем осреднения суточных данных за период 1989–2015 гг. Характер временного хода здесь в целом соответствует полученным ранее закономерностям для Приокско-Тerrasного и Центрально-Лесного заповедников (центр Восточно-

Европейской равнины). Прослеживается та же смена фаз в сезонном ходе: медленное, синхронно приземной температуре воздуха, снижение температуры почвы во время установления снежного покрова; зеркальная трансформация температурного профиля почвы (нижние слои почвы становятся более теплыми по отношению к верхним); стабилизация температуры почвы при устойчивом снежном покрове; в процессе разрушения снежного покрова верхние слои вновь становятся более теплыми, нежели нижние; повышение температуры почвы синхронно приземной температуре воздуха во время разрушения снежного покрова и его окончательного схода. Подобно ранее полученным результатам [11], для всех исследуемых точек характерно относительно медленное, аналогично ходу приземной температуры, снижение температуры почвы осенью и более быстрое повышение температур весной (рис. 1), что соответствует выводу А. И. Воейкова [15] о том, что согревающее влияние снега превосходит по времени воздействия охлаждающее влияние, и оно тем больше, чем продолжительнее лежит снежный покров при морозах.

В период с устойчивым снежным покровом температура почвы в сезонном ходе также стабилизируется в коридоре в 2,0–3,0 °С, но сам коридор в своих границах сдвигается от отрицательной области температур к положительной, на фоне широтных изменений приземной температуры воздуха и высоты снега при движении от северной точки (Нарьян-Мар) к южной (Валуйки):

- температура почвы до глубины 40 см –2,0 – –5,0 °С, –1,0–1,0 °С, 0–2,0 °С, –1,5–0 °С;
- температура почвы для горизонта 80 см –2,0–0 °С, 0–2,0 °С, 1,5–3,5 °С, 1,0–8,0 °С;
- приземная температура воздуха –14 °С, –10 °С, –8 °С, –2 °С;
- толщина снежного покрова 50, 44, 34, 28 см.

Пространственная изменчивость среднеголетних величин температуры почвы по Восточно-Европейской равнине в целом происходит соответственно вышеизложенному (рис. 2). При устойчивом снежном покрове, температуры почвы малых значений повышаются с севера на юг, будучи в большинстве отрицательными для глубин до 40 см и положительными для глубины 80 см. В целом для региона, диапазон пространственных различий температуры почвы на глубине до 40 см невелик, от –1,5 до +1,5 0 °С, при большем, в разы, диапазоне пространственных изменений осенью и весной. Малый диапазон региональных пространственных изменений температуры почвы в период с устойчивым снежным покровом происходит на фоне заметных, в

основном зональных, изменений высоты снежного покрова (от 15 до 60 см) и приземной температуры воздуха (от -15 до -30 °С).

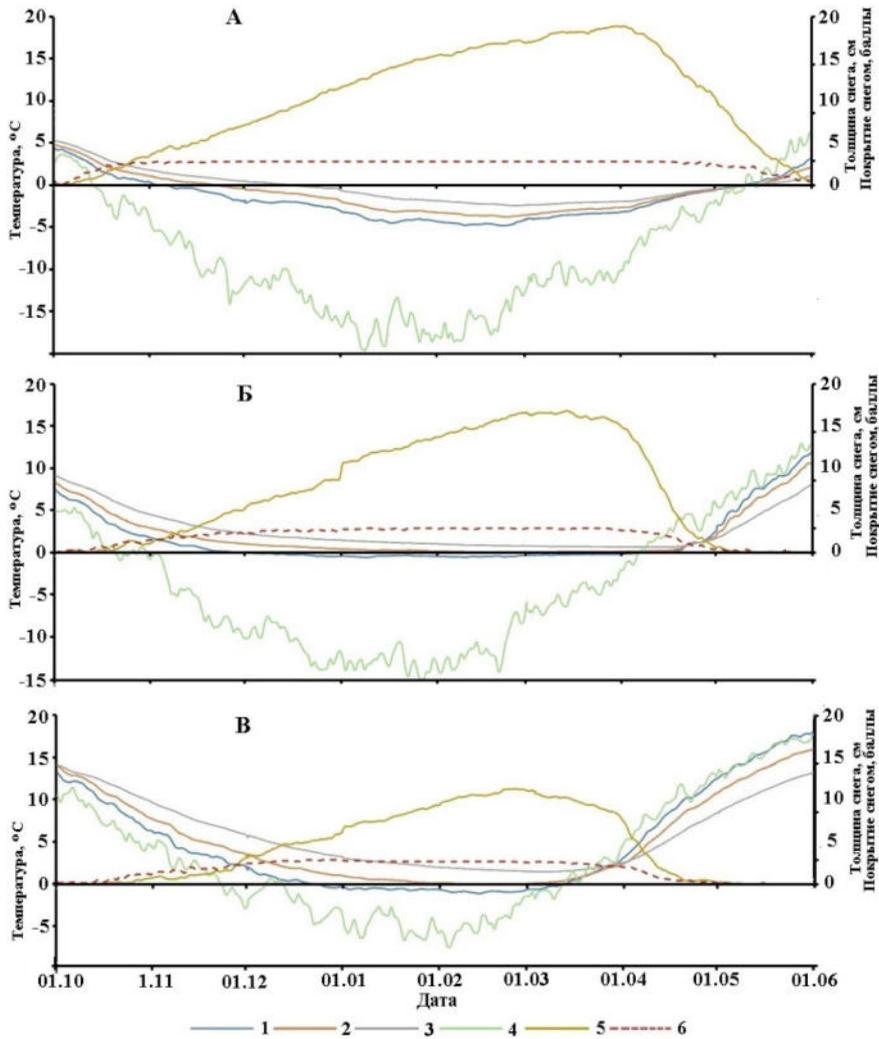


Рис. 1. Сезонный ход осредненных за 1989–2015 гг. температуры почвы на глубинах 20 см (1), 40 см (2) и 80 см (3), приземной температуры воздуха (4), толщины снега (5) и степени покрытия территории снежным покровом (6).
 А – Нарьян-Мар ($67,63^{\circ}$ с. ш., $53,03^{\circ}$ в. д.), Б – Сыктывкар ($61,68^{\circ}$ с. ш., $50,78^{\circ}$ в. д.),
 В – Валуйки ($50,22^{\circ}$ с. ш., $38,1^{\circ}$ в. д.)

Многолетняя изменчивость температурного режима почвы, снежного покрова и приземной температуры воздуха

Наличие данных наблюдений с 1989 по 2015 г. позволяет оценить не только сезонные, но и многолетние характеристики изменений исследуемых характеристик. Из рисунка 2 видно, что стандартное отклонение многолетнего хода температуры почвы в период с устойчивым снежным покровом несущественны. Осредненное по территории стандартное отклонение температуры почвы в период с устойчивым снежным покровом на глубинах 20, 40 и 80 см имеет величины 0,73; 0,71 и 0,53 °С при стандартном отклонении приземной температуры воздуха 2,5 °С. В малоснежные предзимний и весенний периоды стандартное отклонение температуры почвы составляет соответственно 0,93; 0,89 и 1,36 °С и 1,1; 0,92 и 1,03 °С, приземной температуры воздуха 1,9–1,6 °С. Следовательно, устойчивый снежный покров определяет в том числе и малую межгодовую вариабельность температуры почвы – в 3–5 раз меньшую вариабельности приземной температуры воздуха и в 1,2–1,5 раз меньшую вариабельности температуры почвы в предзимний и весенний периоды – вне зависимости от изменений в разных ландшафтных условиях толщины снега, приземной температуры почвы и растительности. Означенные результаты, соответствуют, в частности, выводу А. В. Павлова [8] о формировании термических свойств сезонно-мерзлых почвогрунтов в начале снежного периода.

Многолетние тенденции в изменениях температура почвы в период с устойчивым снежным покровом, при малой вариабельности в это время, малозначимы, что совпадает с выводами Б. Г. Шерстюкова [14] для центральной части Восточно-Европейской равнины – имея при этом мало различающиеся по территории значения коэффициентов линейного тренда, уступающих по величине коэффициентам линейного тренда осеннего и весеннего периодов (рис. 4) в 2–6,5 раз:

осень: 0,062 °С / год на глубине 20 см; 0,070 °С / год на глубине 40 см; 0,056 °С / год на глубине 80 см;

период с устойчивым снежным покровом: –0,009 °С / год на глубине 20 см; 0,035 °С / год на глубине 40 см; 0,048 °С / год на глубине 80 см;

весна: 0,022 °С / год на глубине 20 см; 0,061 °С / год на глубине 40 см; 0,049 °С / год на глубине 80 см.

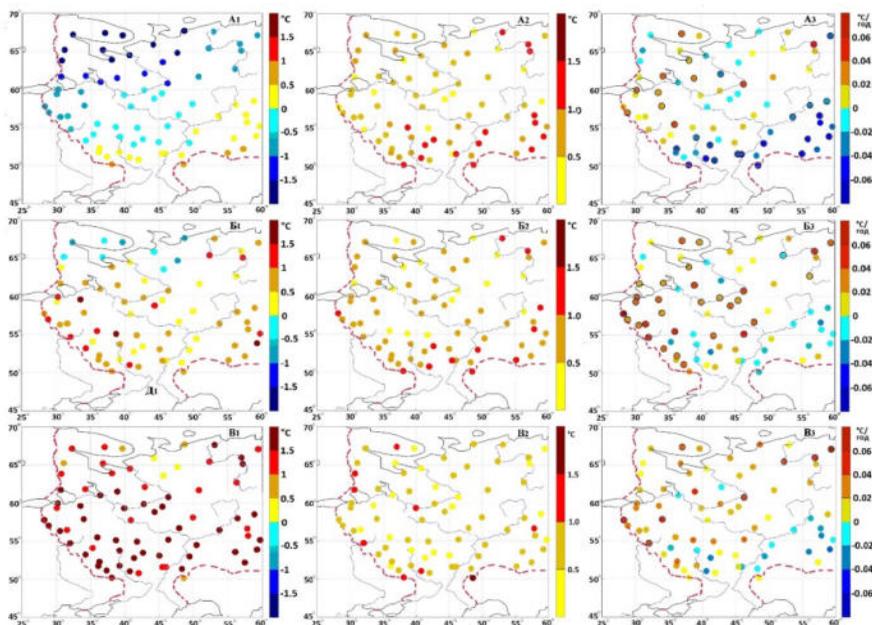


Рис. 2. Пространственное распределение осредненных за 1989–2015 гг. средних значений характеристик температуры почвы на глубинах 20, 40 и 80 см: средняя – А1, В1, В1; стандартное отклонение – А2, В2, В2; коэффициенты линейного тренда – А3, В3, В3, Г3, Д3

Связь межгодовой изменчивости температуры почвы с изменчивостью климата в холодный период года также неоднозначна – как следствие тепляющих свойств снежного покрова. Корреляция многолетнего хода температуры почвы с приземной температурой воздуха для глубин до 40 см осенью и весной значима в положительном диапазоне коэффициентов корреляции в диапазоне 0,39–0,88 – прежде всего на севере – северо-западе Восточно-Европейской равнины (рис. 5). Можно предположить, что такие широтные различия в тесноте связей могут быть связаны с разницей водно-физических свойств почвы, в частности с динамикой увлажнения почв. В период с устойчивым снежным покровом статистическая связь температуры почвы и приземной температуры воздуха отсутствует на всей территории Восточно-Европейской равнины. Корреляция многолетней изменчивости температуры почвы и толщины снежного покрова повсеместно мала или незначима.

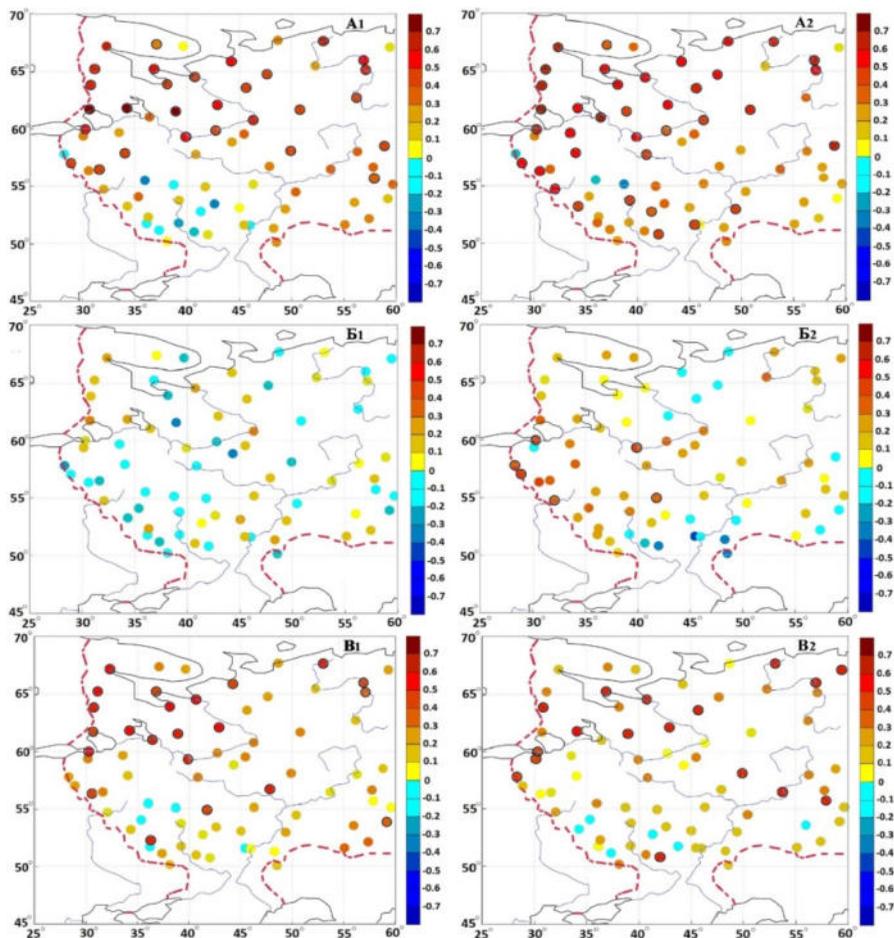


Рис. 3. Пространственное распределение коэффициентов корреляции многолетнего хода приземной температуры воздуха и температуры почвы на глубинах 20 и 40 см в октябре–ноябре (А1, А2), декабре – марте (Б1, Б2), апреле – мае (В1, В2)

Выводы

На основе анализа данных наблюдений 1989–2015 гг. на материалах наблюдений 75 метеорологических станций проведена количественная оценка реакции температурного режима почвы на изменения снежного покрова и климата последних десятилетий в различных ландшафтных условиях Восточно-Европейской равнины.

Выявлены характерные для всех ландшафтных условий исследуемого региона фазы сезонного хода температуры почвы в условиях изменчивости толщины снежного покрова и приземной температуры воздуха. Сезонная скорость снижения температур воздуха и почвы в период формирования снежного покрова осенью ниже скорости повышения температур во время разрушения снежного покрова весной. В период с устойчивым снежным покровом температура почвы в сезонном ходе стабилизируется в коридоре в $2,0\text{--}3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, сам же коридор в своих границах сдвигается на первые градусы от отрицательной области температур к положительной на фоне широтных изменений приземной температуры воздуха и высоты снега. В целом для региона, диапазон пространственных различий температуры почвы для глубин до 40 см невелик, от $-1,5$ до $+1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, на глубине 80 см от $0,5$ до $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, вне зависимости от ландшафтной неоднородности территории.

Стандартное отклонение многолетнего хода температуры почвы в малоснежные периоды предзимья и весны повсеместно больше стандартного отклонения температуры почвы в период с устойчивым снежным покровом. Появление снега определяет снижение межгодовой вариабельности температуры почвы в 3–5 раз относительно вариабельности приземной температуры воздуха и в 1,2–1,5 раза относительно вариабельности температуры почвы в предзимний и весенний периоды – вне зависимости от изменений в разных ландшафтных условиях толщины снега, приземной температуры воздуха и растительности. Многолетние тенденции в изменениях температура почвы в период с устойчивым снежным покровом малозначимы, будучи достаточно однородными в пространственном распределении и имея коэффициенты линейного тренда в 2–6,5 раз меньше относительно коэффициентов осеннего и весеннего периодов.

Связь межгодовой изменчивости температуры почвы с изменчивостью климата в холодный период года также неоднозначна – как следствие тепляющих свойств снежного покрова. Значимые коэффициенты корреляции многолетнего хода температуры почвы на глубине до 40 см и приземной температуры воздуха характерны только для осени и весны, будучи незначимыми по всей территории Восточно-Европейской равнины в снежный период – при повсеместно малой или незначимой связи с ходом толщины снега.

Таким образом появление в холодный сезон устойчивого снежного покрова определяет для температуры почвы появление узкого температурного коридора в изменчивости, малые или незначимые коэффициенты линейного тренда, малую сезонную и межгодовую вариа-

бельность, отсутствие статистических связей с ходом толщины снега и приземной температуры воздуха – вне зависимости от различий ландшафтов Восточно-Европейской равнины.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проекты № 18-05-00440 и № 18-05-00427 (сбор, обработка и первичный анализ исходной информации), а также при поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук 0148-2019-0009 (интерпретация результатов анализа).

Список литературы

1. Львович М. И. Человек и воды. М. : Географгиз, 1963. 568 с.
2. Львович М. И. Вода и жизнь. М. : Мысль, 1986. 253 с.
3. Ваганов Е. А., Шиятов С. Г., Мазена В. С. Дендроклиматологические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск : Наука, 1996. 246 с.
4. Николаев А. Н., Скачков Ю. Б. Влияние снежного покрова и температурного режима мерзлых почв на радиальный прирост деревьев Центральной Якутии // Журн. Сиб. федер. ун-та. Сер. Биология. 2012. № 5. С. 43–51.
5. Кудряцев В. А. Температура верхних горизонтов вечномерзлой толщи в пределах СССР. М. : Изд-во АН СССР, 1954. 182 с.
6. Снежный покров Восточно-Европейской равнины по данным многочастотной микроволновой спутниковой радиометрии / Л. М. Китаев, Д. А. Боярский, Т. Б. Титкова, Н. Ю. Комарова // Соврем. проблемы дистанцион. зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 1. С. 249–258.
7. Ensemble-based assimilation of fractional snow-covered area satellite retrievals to estimate the snow distribution at Arctic sites / K. Aalstad, S. Westermann, T. V. Schuler, J. Boike, L. Bertino // The Cryosphere. 2018. N 12. P. 247–270.
8. Павлов А. В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск : Гео, 2008. 230 с.
9. Осокин Н. И., Сосновский А. В. Влияние динамики температуры воздуха и высоты снежного покрова на промерзание грунта // Криосфера Земли. 2015. № 1. С. 99–105.
10. Слепцов В. И., Мордовской С. Д., Петров Е. Е. Расчет количества циклов замерзания-оттаивания породного массива для условий центральной Якутии на горизонтальных поверхностях // Гор. Информ.-аналит. бюл. 2012. № 9. С. 101–105.
11. Сезонная динамика температуры воздуха, снегозапасов и промерзания почвы в центральной части Восточно-Европейской равнины / Л. М. Китаев, В. А. Аблеева, Ж. А. Асаинова, А. С. Желтухин, Е. Д. Коробов // Лед и Снег. 2017. Т. 57. № 4. С. 518–526.
12. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. 1. Л. : Гидрометеоиздат, 1985. 299 с.
13. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М. : Из-во Росгидромета, 2014. 1008 с.
14. Шерстюков А. Б. Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли. 2008. № 1. С. 79–87.
15. Воейков А. И. Избранные сочинения. Л. : Гидрометеоиздат, 1957. 259 с.
16. URL: www.meteo.ru (дата обращения 01.07.2018).

УДК 911.6-911.7

Сопоставление межгодовых колебаний характеристик снежного покрова и краткосрочных изменений климата

Л. М. Китаев (lkitaev@mail.ru)

Институт географии РАН, г. Москва

Аннотация. Исследована изменчивость характеристик снежного покрова Восточно-Европейской равнины на фоне современных изменений климата для которых характерна стабилизация после многолетнего увеличения хода индексов атмосферной циркуляции. Проведена оценка характера пространственного распределения и различий в многолетней вариабельности толщины и плотности снега, продолжительности его залегания, приземной температуры воздуха, осадков. Фильтрация рядов исходных данных дискретным преобразованием Фурье позволила выявить сходство квазипериодных колебаний характеристик снежного покрова и климата – при слабых или незначимых корреляционных связях и различиях в многолетних тенденциях характеристик.

Ключевые слова: снежный покров, характеристики климата, межгодовая вариабельность, гармоника Фурье, квазипериодные колебания.

Введение

Наличие в настоящее время продолжительных временных рядов климатических и связанных с ними характеристик позволяет провести их анализ путем выделения многолетних тенденций, межгодовых колебаний, сезонных и циклических вариаций – как для отдельных характеристик, так и для их композитной оценки. В последнем случае популярны анализ корреляции и регрессии, не всегда, тем не менее, дающий значимые результаты, в частности при исследовании реакции характеристик подстилающей поверхности на изменения климата [1; 4; 7 и др.]; в этом более эффективен метод главных компонент [6; 8 и др.].

Опыт исследования зависимости изменений снежного покрова от изменений характеристик климата показывает здесь малую или незначимую корреляционную связь, во многих случаях несовпадение характера многолетних тенденций [4; 5]. В таком случае, проведение статистическими методами фильтрации многолетних рядов характеристик дает возможность, оценивать возможную синхронность межгодовой изменчивости. В данной работе, с использованием фильтрации дискретным разложением Фурье, оценивается сходство квазипериодических колебаний характеристик снежного покрова и характеристик климата последних десятилетий в пределах Восточно-Европейской равнины.

Современные изменчивость характеристик снежного покрова и климата

Общие особенности пространственного распределения и тенденции хода рассматриваемых характеристик рассмотрены многими исследователями и обобщены, в частности, в докладах Росгидромета [1; 3]. И в данном случае дается лишь краткая оценка изменений характеристик последних десятилетий (1999–2017 гг.) – для иллюстрации взаимосвязей изменчивости климата и снежного покрова. В качестве исходных материалов использованы данные наблюдений 75 метеорологических станций, расположенных в зоне устойчивого равнинного снегонакопления Восточно-Европейской равнины – севернее 50° с. ш. [10]. Для анализа за каждый год рассчитывался период со снежным покровом с момента его появления до окончательного схода, средние за снежный период значения среднесуточной температуры воздуха, а также суммарные за снежный период осадки. Для снежного периода подсчитано также количество дней с осадками – как показатель, дающий в сочетании с суммарными осадками представление об их интенсивности. Оценка проведена для территории Восточно-Европейской равнины в целом, а также для метеостанций Мезень ($65,87^\circ$ с. ш., $44,22^\circ$ в. д.), Кологрив ($52,92^\circ$ с. ш., $44,32^\circ$ в. д.), Великин Луки ($56,35^\circ$ с. ш., $30,62^\circ$ в. д.), Калач ($50,40^\circ$ с. ш., $41,05^\circ$ в. д.).

Полученные для Восточно-Европейской равнины значения соответствуют представлениям о современном состоянии климата (табл. 1). Вариабельность многолетнего ряда приземной температуры воздуха существенно превышает вариабельность суммарных осадков (коэффициенты вариации 0,158 и 0,069). Вариабельность толщины снежного покрова в три раза превышает вариабельность плотности снега (коэффициенты вариации 0,159 и 0,056).

Запас воды в снеге имеет высокий, подобно толщине снежного покрова, коэффициент вариации (0,147). Вариабельность количества дней с осадками в течение снежного периода и продолжительности самого снежного периода невелика, имея близкие значения коэффициентов вариации – 0,063 и 0,068. При этом, количество дней с осадками в дни со снежным покровом составляет 60 % для дней со снежным покровом. Значения коэффициентов вариации характеристик снежного покрова увеличиваются к югу, что связано, по-видимому, с широтным снижением величины снегозапасов и увеличением его вариабельности в связи, в том числе, с значительными здесь сезонными и межгодовыми колебаниями приземной температуры воздуха и осадков. Значимые многолетние тенденции практически отсутствуют.

Таблица 1

Сезонные климатические характеристики холодного периода Восточно-Европейской равнины, осредненные для периода 1999–2017 гг.

Характеристика		Расположение				
		Мезень	Кологрив	Великие Луки	Калач	Восточно-Европейская равнина
Толщина снежного покрова, см	Среднее	32	38	25	15	29
	Стандартное отклонение	0,115	0,176	0,231	0,215	0,159
	Коэффициент линейного тренда	-0,595	-0,171	0,104	0,104	-0,007
Плотность снега, г/см ³	Среднее	0,245	0,244	0,211	0,213	0,224
	Стандартное отклонение	0,016	0,098	0,182	0,221	0,056
	Коэффициент линейного тренда	-0,001	-0,001	0,004	-0,001	0,001
Дни со снежным покровом	Среднее	191	161	116	83	144
	Стандартное отклонение	0,069	0,068	0,156	0,233	0,068
	Коэффициент линейного тренда	0,101	0,263	0,449	-0,790	0,073
Температура воздуха, °С	Среднее	-9,3	-7,2	-1,6	-6,7	-6,5
	Стандартное отклонение	0,165	0,189	0,259	0,326	0,158
	Коэффициент линейного тренда	0,086	0,088	-0,126	-0,065	0,011
Осадков за снежный период, мм	Среднее	191	184	240	137	192
	Стандартное отклонение	0,117	0,157	0,150	0,315	0,069
	Коэффициент линейного тренда	0,310	-0,553	1,618	-0,930	0,221
Дни с осадками в течение снежного периода	Среднее	107	87	66	52	82
	Стандартное отклонение	0,055	0,107	0,169	0,162	0,063
	Коэффициент линейного тренда	0,127	-0,152	-0,427	0,489	-0,220

Курсивом выделены незначимые коэффициенты линейных трендов.

Для периода 1999–2017 гг. рассмотрена также изменчивость индекса Северо-Атлантической осцилляции – North Atlantic Oscillation, NAO [11], имеющего существенное влияние на климат Восточно-Европейской равнины [6]. Исследуемый период интересен отсутствием значимых тенденций в многолетнем ходе индексов, в отличие от периода до 2000 г. с преобладающим ростом их интенсивности. Средне-многолетнее значение индекса, его коэффициент вариации и коэффициент линейного тренда составляют соответственно $-0,025$, $0,117$ и $-0,001$.

Заметных совпадений в тенденциях многолетнего хода исследуемых характеристик обнаружить не удалось, равно как не удалось выявить значимых корреляционных связей их многолетнего хода – при заметных различиях вариабельности.

Квазипериодичные колебания характеристик снежного покрова и климата

Суть дискретного Фурье-преобразования (расчета композитных временных рядов, содержащих сумму колебаний) состоит в следующем. На первом этапе вычисляются коэффициенты Фурье-преобразования, с помощью которых проводится обратное преобразование для ряда значений с расчетом гармоник, охватывающих в сумме наибольший процент выборки. Далее, путем суммирования полученных гармоник формируется композитный временной ряд, иллюстрирующий квазипериодные колебания характеристик.

Для анализа сходства многолетней динамики снежного покрова и климата за каждый год рассчитывался период со снежным покровом с момента его появления до окончательного схода, средние за снежный период значения среднесуточной температуры воздуха, суммарные за снежный период и количество за снежный период дней с осадками.

Таким образом, ввиду, как было указано выше, отсутствия значимых статистических связей многолетнего хода исследуемых характеристик, их межгодовая изменчивость анализируется посредством фильтрации рядов данных дискретным разложением Фурье – с расчетом для четырех последовательных гармоник, охватывающих в данном случае больше 80 % выборки каждой характеристики. В результате, полученные ряды низкочастотных колебаний для Восточно-Европейской равнины в целом дали возможность в границах периода 1999–2017 гг. выделить для характеристик снежного покрова и характеристик климата по три колебания (рис. 1) – ход снеготолщины, как расчетного от толщины снега и его плотности параметра, в данном случае не рассматривается.

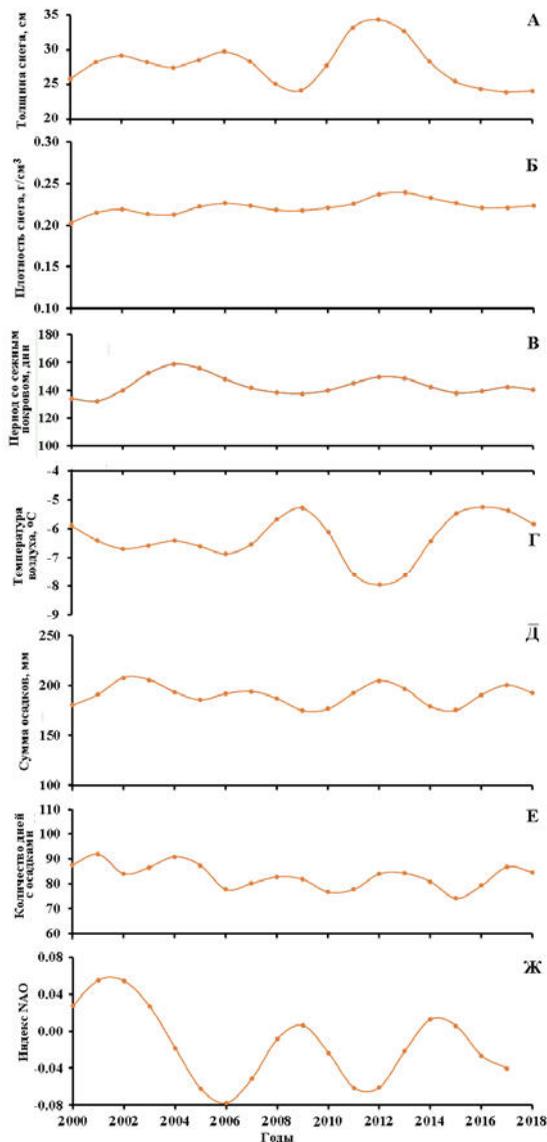


Рис. 1. Восточно-Европейская равнина, период 1999–2018 гг.: гармоники Фурье для средних за снежный период толщины снега (А), его плотности (Б) и продолжительности залегания (В), приземной температуры воздуха (Г), осадков (Д), количества дней с осадками за снежный период (Е), индекса Северо-Атлантической осцилляции NAO (Ж)

Полученные для характеристик периоды колебаний составляют 6–8 лет с близким расположением максимумов отдельных гармоник. Исключение составляет ход приземной температуры воздуха – в данном случае просматривается вполне закономерная асинхронность колебаний колебаниям характеристик снежного покрова и осадков. Период колебаний индекса NAO также включает в себя 6–8 лет, будучи близким к периоду характеристик снежного покрова и климата.

Пространственные различия низкочастотных колебаний исследуемых характеристик, полученных также в результате дискретного преобразования Фурье, иллюстрируют рис. 2 – на примере данных расположенных с севера на юг метеорологических станций Мезень, Кологрив, Великие Луки, Калач. Для означенных метеостанций также характерно наличие трех колебаний характеристик снежного покрова и климата с периодами 6–8 лет.

Так же как и для Восточно-Европейской равнины для всех метеорологических станций просматривается асинхронность хода гармоник приземной температуры воздуха и характеристик снежного покрова, а также сходство хода гармоник характеристик снежного покрова ходу осадков. Для продолжительности снежного периода, толщины и плотности снега можно отметить заметное несоответствие хода гармоник южной метеорологической станции Калач ходу гармоник других метеорологических станций, что может быть связано с большой вариабельностью относительно малых на юге региона снеготолщин в условиях теплых, с большим количеством оттепелей, зим (табл. 1). Зональность в ходе гармоник проявляется в основном в амплитуде колебаний: ее уменьшении с севера на юг для характеристик снежного покрова и увеличении для приземной температуры воздуха.

Кроме сходства квазипериодических колебаний характеристик снежного покрова и характеристик климата, удалось выявить значимые регрессионные зависимости для межгодовой изменчивости рядов Фурье толщины и плотности снежного покрова с приземной температурой воздуха и суммарными осадками (табл. 2). При значимых общих коэффициентах регрессии, преобладающий (значимый) вклад в изменчивость толщины снежного покрова имеет ход суммарных осадков, для изменчивости плотности снега – ход приземной температуры воздуха. Исключением в данном случае является метеорологическая станция Калач – с малыми коэффициентами регрессии, что, по-видимому, можно объяснить неустойчивостью незначительных снеготолщин в условиях теплых зим южных территорий исследуемого региона.

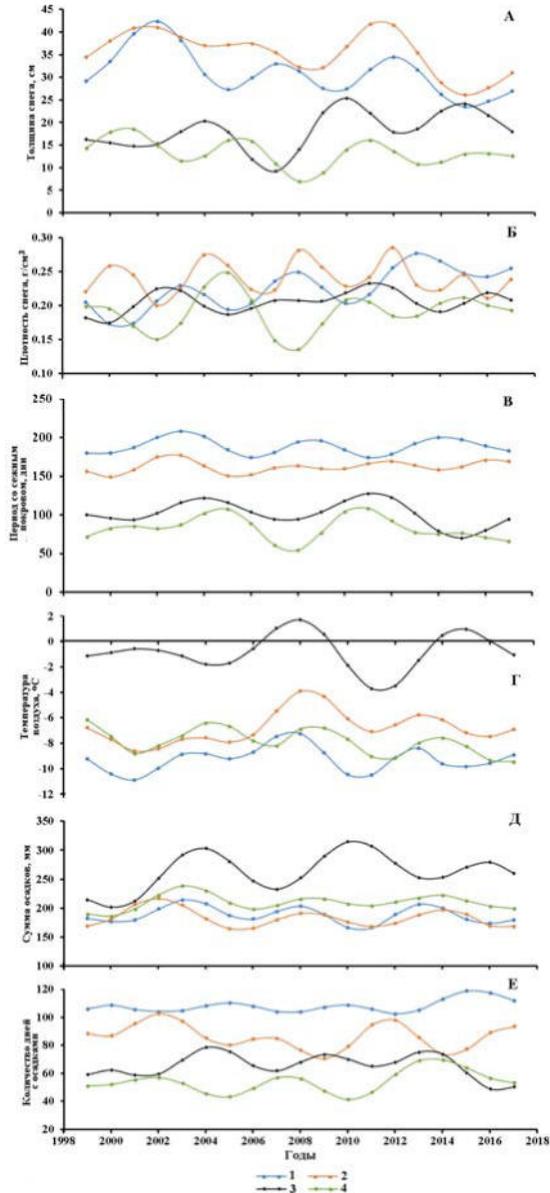


Рис. 2. Зональные особенности гармоник Фурье (1999–2018 гг.) для средних за снежный период толщины снега (А), его плотности (Б) и продолжительности залегания (В), приземной температуры воздуха (Г), осадков (Д), количества дней с осадками за снежный период (Е) на примере данных метеорологических станций Мезень (1), Колголив (2), Великие Луки (3), Калач (4)

Таблица 2

Регрессионная зависимость характеристик снежного покрова от характеристик климата для рядов Фурье (1999–2018 гг.)

Характеристика	Расположение	Коэффициент регрессии	Бета коэффициенты	
			Приземная температура воздуха	Сумма осадков
Толщина снежного покрова, см	Мезень	0,580	-0,604	0,724
	Кологрив	<i>0,397</i>	<i>-0,368</i>	<i>0,125</i>
	Великие Луки	0,677	<i>0,037</i>	0,691
	Калач	0,548	<i>-0,136</i>	0,505
Плотность снега, г/см ³	Мезень	0,580	-0,504	0,111
	Кологрив	0,540	-0,419	-0,310
	Великие Луки	0,614	<i>-0,064</i>	0,586
	Калач	<i>0,225</i>	<i>0,187</i>	<i>0,116</i>
Количество дней со снежным покровом	Мезень	0,789	-0,457	-0,994
	Кологрив	<i>0,327</i>	<i>-0,329</i>	<i>0,322</i>
	Великие Луки	0,821	-0,701	0,226
	Калач	<i>0,126</i>	<i>0,045</i>	<i>0,109</i>

Курсивом выделены незначимые коэффициенты линейных трендов.

Выводы

Рассмотрены особенности многолетней изменчивости характеристик снежного покрова (толщина, плотность, период залегания) и характеристик климата зимнего периода (приземная температура воздуха, сумма осадков, количество дней с осадками). Заметных (значимых) корреляционных связей, а также сходных тенденций в многолетнем ходе характеристик обнаружить не удалось, в связи с чем, для всех характеристик рассмотрены ряды данных, полученных посредством фильтрации исходных рядов всех исследуемых характеристик дискретным разложением Фурье. В результате, для всех характеристик, включая индекс NAO, удалось обнаружить сходные квазипериодные колебания: в границах периода 1999–2017 гг. Для Восточно-Европейской равнины в целом и для отдельных метеорологических станций выделяются четыре колебания частотой 6–8 лет, с разницей наступления максимумов до трех лет. Прослеживается вполне закономерная асинхронность хода гармоник характеристик снежного покрова и приземной температуры воздуха и прямое сходство межгодовой динамики характеристик снежного покрова и осадков. Колебания гармоник характеристик снежного покрова, рассчитанных по данным метеорологической станции Калач мало схожи с колебаниями харак-

теристик по данным других станций – что, по-видимому, можно считать следствием формирования и variability малых снеготолщин при относительно теплых, с частыми оттепелями, зим южных территорий исследуемого региона. Проявление зональности в характере колебаний характеристик заключается в изменении амплитуды колебаний с севера на юг в соответствии с общими зональными особенностями климата.

Наряду с близким характером квазипериодических колебаний характеристик снежного покрова и характеристик климата, выявлены значимые регрессионные зависимости для межгодовой изменчивости рядов Фурье толщины и плотности снега с приземной температурой воздуха и осадками. При этом определяющий вклад в характер хода толщины снега имеет изменчивость суммарных осадков, в ход плотности снега – изменчивость приземной температуры воздуха.

Результатов исследований, сходных с представленными, обнаружить не удалось, и таким образом, выявленные особенности многолетних колебаний характеристик снежного покрова и климатических показателей могут быть использованы в ходе фундаментальных исследований взаимосвязи изменений климата и криосферы.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проекты № 18-05-00440 и № 18-05-00427 (сбор, обработка и первичный анализ исходной информации), а также в рамках программы президиума РАН № 51 (интерпретация результатов анализа).

Список литературы

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М. : Из-во Росгидромет, 2014. 1008 с.
2. Гандин Л. С., Казан Р. Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л. : Гидрометеиздат, 1976. 360 с.
3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 г. М. : Росгидромет, 2017. 70 с.
4. Китаев Л. М. Связь сезонных изменений температуры воздуха и снежного покрова Северной Европы // Криосфера Земли. 2006. Т. 10, № 3. С. 76–82.
5. Сезонная динамика температуры воздуха, снеготолщин и промерзания почвы в центральной части Восточно-Европейской равнины / Л. М. Китаев, В. А. Аблеева, Ж. А. Асанова, А. С. Желтухин, Е. Д. Коробов // Лед и Снег. 2017. Т. 57, № 4. С. 518–526.
6. Попова В. В. Современные изменения температуры приземного воздуха на севере евразии: региональные тенденции и роль атмосферной циркуляции // Изв. РАН. Сер. Географ. 2009. № 6. С. 59–69.
7. Туткова Т. Б. Изменчивость зимнего стока реки Ока в зависимости от изменения климата // Лед и снег. 2018. Т. 2, № 58. С. 191–198.
8. Galin M. B. Study of the low-frequency variability of the atmospheric general circulation with the use of time-dependent empirical orthogonal functions // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2007. Vol. 43, N1. P. 15–23.
9. Grinsted A., Moore J. C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // Nonlin. Processes Geophys. 2004. N 11. P. 561–566.
10. URL: www.meteo.ru (дата обращения 01.06.2018).
11. URL: (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink>) (дата обращения 01.06.2018).

УДК 551.583

Связь изменений глобальной циркуляции атмосферы и температуры воздуха за период 1899–2018 гг.

Н. К. Кононова (NinaKononova@yandex.ru)

Институт географии РАН, г. Москва

Аннотация. В продолжение работы [6] рассмотрены флуктуации глобальной циркуляции атмосферы в 1899–2018 гг. в классификации Б. Л. Дзердзеевского. Выявлены три циркуляционные эпохи. Проанализирована повторяемость элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) в каждой эпохе. Отмечены ЭЦМ, суммарная продолжительность которых в среднем за эпоху превышает полгода. Установлена связь многолетних колебаний среднегодовой глобальной температуры воздуха с изменением характера циркуляции атмосферы. Особое внимание уделено современному периоду (1998–2018 гг.). В этот период в нижней тропосфере наблюдается максимальный меридиональный перенос воздушных масс (в среднем 320 дней в году), из них в 101 дне в среднем за год отмечаются макропроцессы с циклонами на полюсах, без блокирующих процессов, с тремя-четырьмя выходами циклонов из низких широт в высокие в каждом полушарии (тип 13). В остальные дни отмечаются макропроцессы с антициклонами на полюсах, выходами циклонов из низких широт в высокие в двух-четырёх секторах каждого полушария и формированием блокирующих процессов в их тылу (типы 8–12). Это отразилось на характере среднегодовой глобальной температуры воздуха.

Ключевые слова: глобальная циркуляция атмосферы, глобальная температура воздуха.

Введение

Для анализа глобальных атмосферных процессов в настоящее время используются различные индексы. Б. Л. Дзердзеевский показал, что типизация циркуляции атмосферы внетропических широт Северного полушария [3] может быть распространена и на Южное. В развитие этого тезиса в настоящей работе представлены флуктуации глобальной циркуляции атмосферы за 1899–2018 гг. и реакция на эти флуктуации глобальной температуры воздуха.

Материалы и методы

В 1967 г. Б. Л. Дзердзеевский [2] выявил сопряжённость циркуляции атмосферы внетропических широт Северного и Южного полушарий. При зональной циркуляции без блокирующих процессов в Северном полушарии аналогичный характер циркуляции отмечается и в Южном полушарии. При развитии меридиональной циркуляции с блокирующими процессами их количество одинаково в Северном и Южном полушариях, а оси арктических/антарктических блокирую-

щих процессов лежат в пределах одних и тех же долгот. Позднее по сборно-кинематическим картам, построенным за 1998–2005 гг. [7], были выявлены сезонные различия в проявлении элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) и построены их динамические схемы для Южного полушария.

Результаты

На рисунке 1 в верхнем ряду приведены схемы ЭЦМ 1а (зональная группа циркуляции, зимний для Северного полушария, летний – для Южного). В Северном полушарии два выхода циклонов из низких широт в высокие, в Южном – три. Во втором ряду расположены динамические схемы ЭЦМ 7ал, летнего для Северного полушария. В Северном полушарии три выхода циклонов из низких широт в высокие, в Южном – два. В третьем ряду находятся схемы ЭЦМ 12а, свойственного переходным сезонам. Количество выходов циклонов из низких широт в высокие одинаково. В четвёртом ряду расположены динамические схемы ЭЦМ 13з, (группа выходов циклонов из низких широт в высокие, зимнего для Северного полушария). В Южном полушарии больше выходов циклонов из низких широт в высокие.

Таким образом, в результате построения и анализа динамических схем перемещения барических образований в Южном полушарии для всех ЭЦМ выявлено, что при всех макропроцессах в летнем полушарии больше выходов циклонов из низких широт в высокие, чем в зимнем (рис. 1). При ЭЦМ переходных сезонов ситуация в разных полушариях одинакова.

Смена ЭЦМ происходит одновременно в двух полушариях, поэтому и суммарная годовая продолжительность каждого ЭЦМ также одинакова в двух полушариях. Следовательно, и флуктуации циркуляции атмосферы одинаковы во внетропических широтах всей Земли.

Рассмотрены флуктуации глобальной циркуляции атмосферы в 1899–2018 г. в классификации Б. Л. Дзерdzeевского. В глобальной циркуляции по продолжительности преобладают блокирующие процессы ([4], рис. 2).

Исключение составляют два периода: в 1938, 1939 и 1945 гг. наибольшей продолжительностью отличалась группа нарушения зональности, а в 1989, 1991, 1992, 1994 и 1997 гг. группа выходов циклонов из низких широт в высокие.

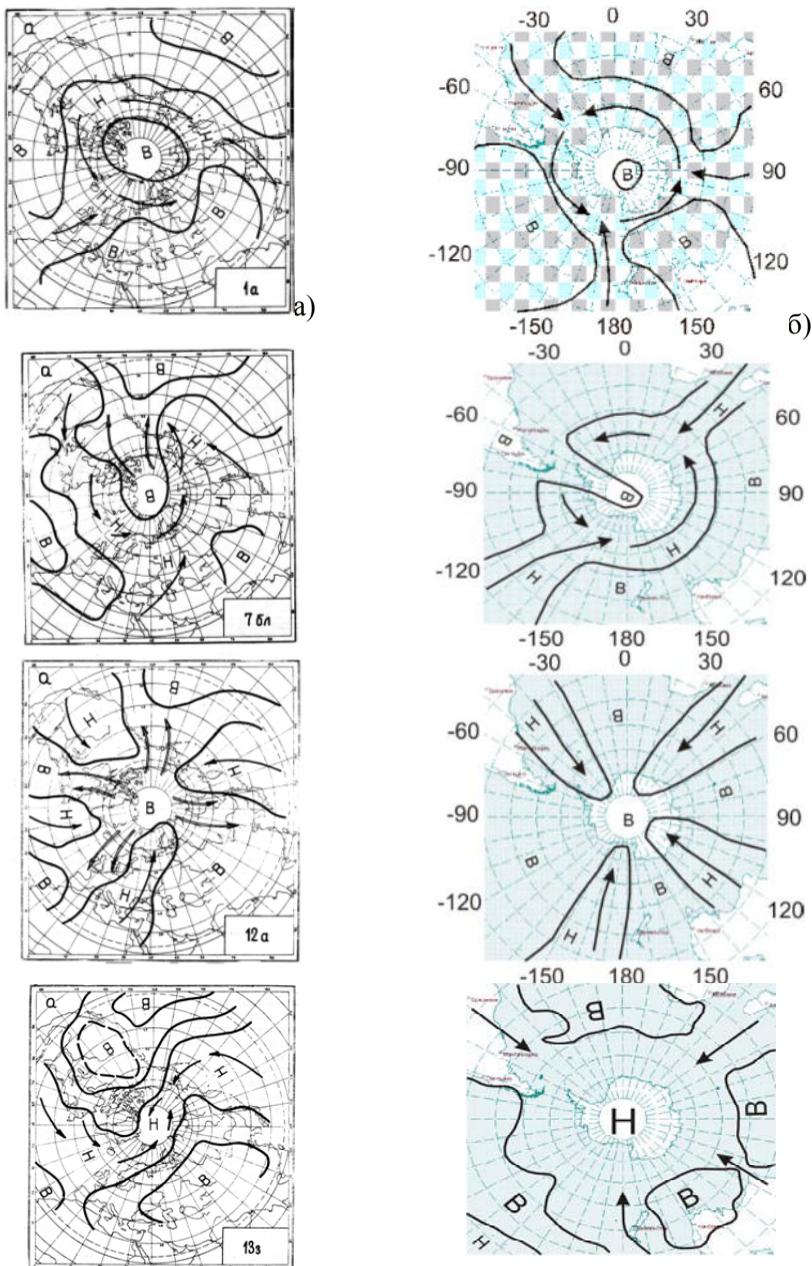


Рис. 1. Динамические схемы ЭЦМ: левый ряд – Северное полушарие (по Б. Л. Дзержевскому), правый ряд – Южное полушарие

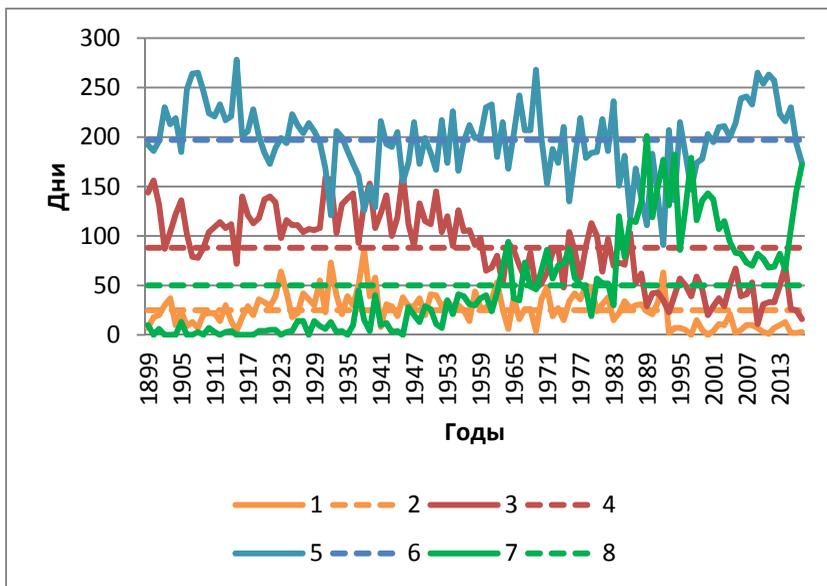


Рис. 2. Ежегодная продолжительность групп циркуляции атмосферы за 1899–2017 гг.:
 1 – зональная циркуляция, 2 – зональная средняя, 3 – нарушение зональности, 4 – нарушение зональности средняя, 5 – блокирующие процессы, 6 – блокирующие процессы средняя, 7 – выход циклонов из низких широт, 8 – выход циклонов из низких широт средняя

Анализ отклонений суммарной годовой продолжительности зональных (зональные + нарушения зональности) и меридиональных (блокирующие процессы + выход циклонов из низких широт в высокие) макропроцессов от их средних значений показал рост с 30-х гг. XX в. продолжительности межширотного обмена воздушных масс, и в течение XXI в. она максимальна за весь период наблюдений (рис. 3).

Раздельный анализ отклонений от средней суммарной годовой продолжительности формирования блокирующих процессов, соединяющих арктический/антарктический антициклон с субтропическим, и выходов циклонов из низких широт в высокие позволил выделить три циркуляционные эпохи ([1], рис. 4), различающиеся преобладанием положительных отклонений суммарной годовой продолжительности какой-либо одной группы циркуляции от средней за весь период наблюдений: 1899–1915 гг. эпоха блокирующих процессов, 1916–1956 гг. зональная эпоха, 1957 – настоящее время – эпоха выходов циклонов из низких широт в высокие.

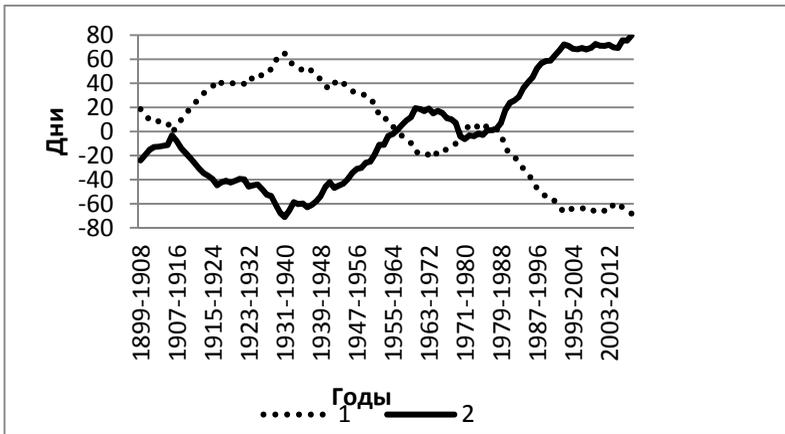


Рис. 3. Отклонения суммарной годовой продолжительности зональных (зональные + нарушения зональности) и меридиональных (блокирующие процессы + выход циклонов из низких широт в высокие) процессов от их средних значений (10-летние скользящие средние)

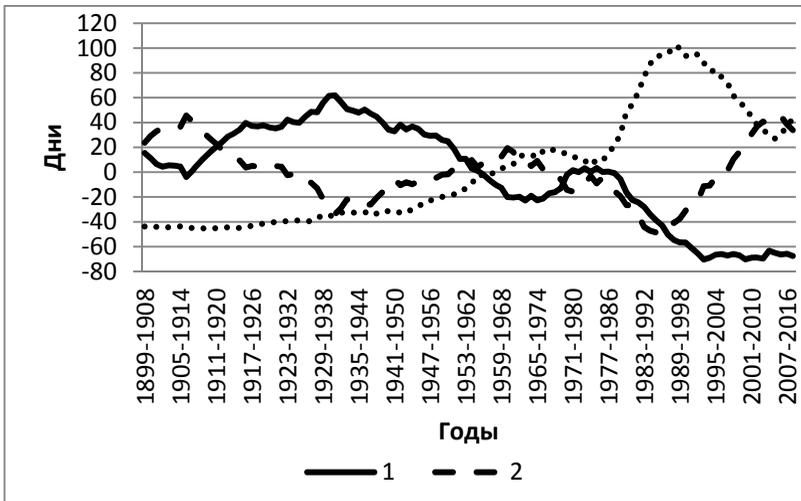


Рис. 4. 10-летние скользящие средние отклонений продолжительности групп циркуляции от их средних за 1899–2017 гг.: 1 – зональная + нарушение зональности, 2 – группа блокирующих процессов, 3 – группа выходов циклонов из низких широт в высокие

В начале XXI в., судя по графику, намечился переход к эпохе блокирующих процессов: величина отклонений от средней такая же, как в начале XX в., в эпоху блокирующих процессов, но рассмотрение

отклонений от средней по годам приводит к выводу, что эпоха выходов циклонов из низких широт в высокие продолжается и только достигает своего максимума. Как видно на рис. 5, по 2005 г. отклонения группы выходов циклонов из низких широт превышали отклонения группы блокирующих процессов. В период 2006–2012 гг. отклонения группы блокирующих процессов были выше, чем циклонической группы, в 2013–2014 гг. отклонения обеих групп были приблизительно одинаковы, а с 2015 г. отклонения циклонической группы стали быстро расти и в 2017 г. достигли максимума (114 дней в году), так что говорить об окончании третьей циркуляционной эпохи пока рано.



Рис. 5. Отклонения группы блокирующих процессов (1) и выходов циклонов из низких широт в высокие (2) в XXI в. от их средних за 1899–2017 гг.

Третья эпоха распадается на периоды. При общем преобладании положительных отклонений продолжительности выходов циклонов из низких широт в высокие в 1957–1969 гг. отмечается повышенная продолжительность блокирующих процессов (рис. 4). В 1970–1980 гг. продолжительность зональной циркуляции поднимается до уровня средней. В 1981–1997 гг. происходит быстрый рост суммарной годовой продолжительности выходов циклонов из низких широт в высокие. С 1998 г. по настоящее время наблюдается, как показано на рис. 5, чередование всплесков продолжительности выходов циклонов из низких широт и блокирующих процессов. Показательно, что именно на этот период приходятся наиболее значительные за весь период наблюдений метеорологически обусловленные опасные природные процессы (наводнения, сели, оползни, ледовые катастрофы и т. п. [5;

8–10], даты которых приведены в [11]. При этом в течение почти всего времени наиболее продолжительной в нижней тропосфере остаётся группа блокирующих процессов (в среднем за 1899–2018 гг. 197 дней в году). Далее следуют группы нарушения зональности (с одним блокирующим процессом в каждом полушарии, 88 дней в году), группа выходов циклонов из низких широт в высокие (50 дней в году) и зональная (в среднем 25 дней в году). В среднем 4 дня приходится на циркуляцию «вне типа».

Проанализирована средняя продолжительность групп ЭЦМ по циркуляционным эпохам и периодам внутри третьей эпохи (табл. 1).

Таблица 1

Средняя годовая продолжительность групп циркуляции (дни)

Группы циркуляции	Эпохи и периоды внутри третьей эпохи						
	I эпоха	II эпоха	III эпоха	1957–1969	1970–1980	1981–1997	1998–2018
Зональная	18	35	22	28	32	24	7
Нарушение зональности	109	121	61	76	79	56	38
Блокирующие процессы	225	188	195	211	182	166	219
Выход циклонов из низких широт	3	13	85	47	61	121	101

Общим для всех эпох оказывается преобладание блокирующих процессов. Наибольшая их продолжительность отмечается в начале XX в. (225 дней в году), в начале XXI в. (219 дней) и в период роста продолжительности блокирующих процессов в начале третьей эпохи (211 дней в году). Наименьшей она была в период быстрого роста продолжительности выходов циклонов из низких широт (166 дней).

Продолжительность зональной циркуляции была наибольшей в зональную эпоху (35 дней) и наименьшей в современный период (7 дней). Продолжительность группы нарушения зональности также была наибольшей в зональную эпоху (121 день) и наименьшей в современный период (38 дней). Продолжительность выходов циклонов из низких широт росла с начала XX в. до 1981–1997 г. (121 день), затем начала уменьшаться.

Структура современного периода (1998–2018 гг.) обеспечивает наибольший с 1899 г. межширотный обмен воздушных масс (в среднем 320 дней в году).

Проанализирована суммарная годовая продолжительность ЭЦМ в каждой эпохе. Выделены ЭЦМ, суммарная продолжительность ко-

торых в среднем за эпоху превышает полгода (рис. 6). В первой и второй эпохах, несмотря на их принципиальное различие по отклонениям продолжительности групп циркуляции от средней, наиболее продолжительным оказался один и тот же ЭЦМ 11а с двумя блокирующими процессами в каждом полушарии (39 и 31 день соответственно, рис. 6, а и б). Всего же в число наиболее продолжительных в первой эпохе вошло 7 блокирующих ЭЦМ общей продолжительностью 144 дня и 3 ЭЦМ нарушения зональности (48 дней). Во второй эпохе в число ЭЦМ с суммарной продолжительностью не менее полугодия вошло 7 блокирующих ЭЦМ общей продолжительностью 118 дней, 5 ЭЦМ нарушения зональности (68 дней) и один зональный ЭЦМ (11 дней). В третьей эпохе (рис. 6, в) в число наиболее продолжительных вошли оба ЭЦМ с выходом циклонов из низких широт (85 дней) и 7 блокирующих ЭЦМ (105 дней).

В третьей эпохе, в период увеличения продолжительности блокирующих процессов (1957–1969 гг., рис. 6, з), преобладают блокирующие процессы (7 ЭЦМ, 119 дней), затем оба ЭЦМ с выходом циклонов из низких широт (46 дней) и 2 ЭЦМ нарушения зональности (24 дня).

В период роста продолжительности зональной циркуляции (1970–1980 гг., рис. 6, д) среди наиболее продолжительных лидируют оба ЭЦМ с выходом циклонов из низких широт (61 день), однако по суммарной продолжительности преобладают блокирующие процессы (7 ЭЦМ, 104 дня). В число наиболее продолжительных входит один ЭЦМ нарушения зональности (15 дней) и зональный ЭЦМ (12 дней).

В период быстрого роста продолжительности макропроцессов с циклонами на полюсах и с выходом циклонов из низких широт в трёх-четырёх секторах каждого полушария (1981–1997 гг., рис. 6, е) именно эти два ЭЦМ составили треть продолжительности года (121 день в среднем за год). В группу наиболее продолжительных вошли ещё 5 ЭЦМ с блокирующими процессами, но их суммарная продолжительность составила всего 67 дней в среднем за год.

В современный период (1998–2018 гг., рис. 6, ж) среди наиболее продолжительных ЭЦМ преобладают ЭЦМ с выходом циклонов из низких широт в высокие (2 ЭЦМ, в среднем 101 день), но и суммарная продолжительность блокирующих процессов лишь немного уступает им (3 ЭЦМ, 95 дней). Такое соотношение ещё раз подтверждает наибольший межширотный обмен в современный период.

Обратим внимание на то, что в последние два периода в число наиболее продолжительных входили ЭЦМ только двух групп с противоположным перемещением воздушных масс.

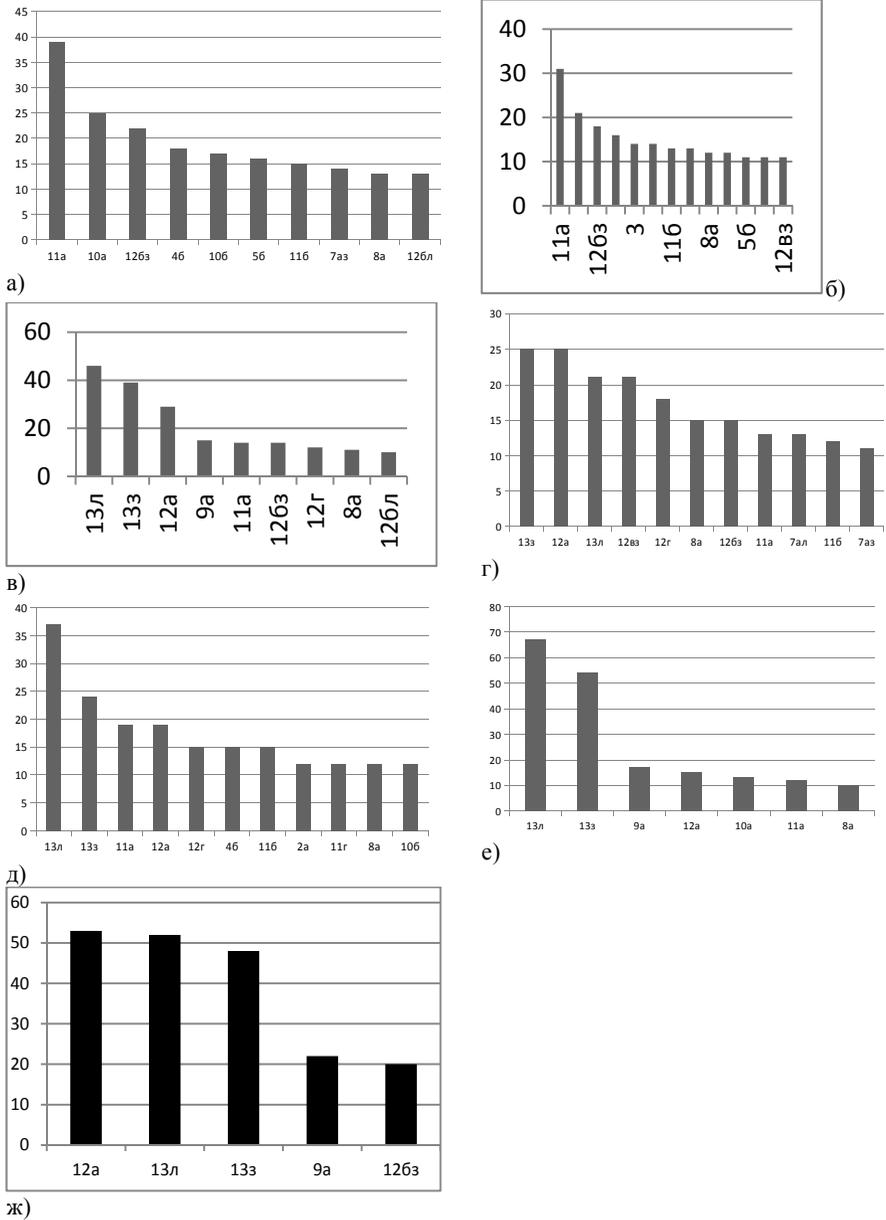


Рис. 6. Наиболее продолжительные (в днях) ЭЦМ, сумма средних значений которых за указанное время составляет более полугодия: а – первая циркуляционная эпоха, б – вторая эпоха, в – третья эпоха, г – 1957–1969 гг., д – 1970–1980 гг., е – 1981–1997 гг., ж – 1998–2018 гг.

Изменение продолжительности циркуляционных процессов сказалось на среднегодовой температуре воздуха ([12], рис. 7). Она понижается при увеличении продолжительности блокирующих процессов (в конце XIX – начале XX в. и в 60-е гг. XX в.) и повышается в периоды роста продолжительности зональной циркуляции (20–30-е гг.) и выходов циклонов из низких широт в высокие (последняя четверть XX в.).

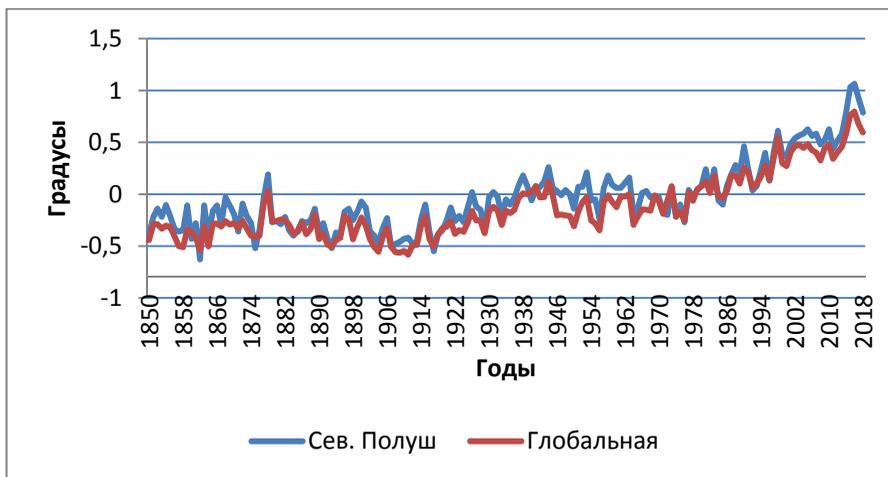


Рис. 7. Отклонения среднегодовой температуры воздуха за 1850–2018 гг. от средней за 1961–1990 гг.

В Северном полушарии с 1850 г. аномалии среднегодовой температуры выросли с $-0,663^{\circ}$ в 1862 г. до $1,064^{\circ}$ в 2016 г. (рис. 7), т. е. среднегодовая температура воздуха Северного полушария повысилась за это время на $1,727^{\circ}$. Средняя аномалия за первую циркуляционную эпоху (1899–1915 гг.) в Северном полушарии составляет $-0,343^{\circ}$ с разбросом от $-0,492^{\circ}$ в 1904 г. до $-0,09^{\circ}$ в 1900 г. Средняя за вторую циркуляционную эпоху (1916–1956 гг.) составляет $-0,085^{\circ}$ с разбросом от $-0,493^{\circ}$ в 1917 г. до $0,192^{\circ}$ в 1953 г. Средняя за третью эпоху (1957 г. настоящее время) составляет $0,216^{\circ}$ с разбросом от $-0,289^{\circ}$ в 1976 г. до $1,064^{\circ}$ в 2016 г. Таким образом, разброс аномалий температуры воздуха составил в первой эпохе $0,483^{\circ}$, во второй – $0,685^{\circ}$, а в третьей – $1,353^{\circ}$.

Глобальные аномалии среднегодовой температуры воздуха выросли с 1850 г. с $-0,553^{\circ}$ в 1911 г. до $0,797^{\circ}$ в 2016 г. (рис. 7), т. е. среднегодовая глобальная температура воздуха повысилась за это

время на $1,35^\circ$, при этом. минимум наступил одновременно с Южным полушарием, а максимум – одновременно с Северным. Средняя аномалия за первую циркуляционную эпоху составила $-0,412^\circ$ с разбросом от $-0,553^\circ$ в 1911 г. до $-0,163^\circ$ в 1915 г. Средняя за вторую циркуляционную эпоху составила $-0,142^\circ$ с разбросом от $-0,477^\circ$ в 1917 г. до $0,1^\circ$ в 1953 г. Средняя за третью эпоху составляет $0,165^\circ$ с разбросом от $-0,238^\circ$ в 1976 г. до $0,797^\circ$ в 2016 г. Таким образом, разброс аномалий температуры воздуха составил в первой эпохе $0,393^\circ$, во второй – $0,577^\circ$, а в третьей – $1,035^\circ$.

Таким образом, самым холодным в XX в. был 1917 г. С него началось первое глобальное потепление, вошедшее в историю как потепление Арктики. Оно продолжалось до 1944-1953 гг. Второе потепление началось в 1976 г. Его интенсивная фаза закончилась в 1998 г., хотя самым тёплым на Земле на сегодняшний день оказался 2016 г.

Заключение

Разработка динамических схем ЭЦМ для Южного полушария позволяет анализировать глобальную циркуляцию атмосферы.

В развитии глобальной циркуляции атмосферы в 1899–2018 гг. отмечаются три циркуляционные эпохи: блокирующих процессов, зональная и выходов циклонов из низких широт в высокие, различающиеся преобладанием определённых макропроцессов.

Колебания глобальной среднегодовой приземной температуры воздуха соответствуют колебаниям глобальной циркуляции атмосферы.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Института географии РАН, проект № . 0148-2019-0009.

Список литературы

1. Дзердзеевский Б. Л. Проблема колебаний общей циркуляции атмосферы и климата / А. И Воейков и современные проблемы климатологии. Л. : Гидрометеоздат, 1956. С. 109–122.
2. Дзердзеевский Б. Л. Сравнение главнейших закономерностей циркуляции атмосферы над Северным и Южным полушариями // Информ. бюл. Сов. Антаркт. экспедиции, 1967. № 65. С. 58–68.
3. Дзердзеевский Б. Л., Курганская В. М., Витвицкая З. М. Типизация циркуляционных механизмов в северном полушарии и характеристика синоптических сезонов // Тр. Науч.-исслед. учреждений Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Сер. 2, Синоптическая метеорология ; вып. 21: Центральный институт прогнозов. М. ; Л. : Гидрометиздат, 1946. 80 с.
4. Колебания циркуляции атмосферы Северного полушария в XX – начале XXI в. URL: <http://www.atmospheric-circulation.ru> (08.02.2019).
5. Кононова Н. К. Влияние циркуляции атмосферы Северного полушария на формирование стихийных бедствий на территории России в XXI в. // ГеоРиск. 2014. № 3. С. 22–27.
6. Кононова Н. К. Изменение характера циркуляции атмосферы и климата за период 1899–2016 гг. // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : тр.

Всерос. науч.-практ. конф. / Геогр. фак. ИГУ ; Иркут. упр. Росгидромета ; Ин-т солнеч.-зем. физики СО РАН. (21–23 марта 2018 г.). Иркутск, 2018. С. 21–30.

7. Циркуляция атмосферы в Антарктике в конце XX – начале XXI в. / Н. К. Кононова, О. В. Луценко, М. Е. Макарова, И. А. Орлов // Материалы гляциологических исследований – 2007. Вып. 103. С. 142–147.

8. Особенности катастрофических природных процессов на Северном Кавказе на рубеже XX–XXI вв. / В. М. Котляков, Д. С. Асоян, Н. К. Кононова, Н. И. Осокин, О. В. Рототаева // Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы 8 т. / пред. ред. кол. Н. П. Лавёров ; РАН. Т. 3: Опасные природные явления на поверхности суши: механизм и катастрофические следствия / отв. ред. В. М. Котляков. М. : ИГ РАН, ИФЗ РАН, 2008. С. 190–209.

9. Мавлюдов Б. Р., Кононова Н. К., Захаров В. Г. Взаимосвязь динамики ледовых катастроф в Антарктике и Арктике с циркуляцией атмосферы Южного и Северного полушарий // Сложные системы. 2015. № 3(16). С. 61–76.

10. Мальнева И. В., Кононова Н. К., Крестин Б. М. Активность селей на Курильских островах в период современных изменений климата // ГеоРиск. 2014. № 3. С. 28–33.

11. Новости погоды [Электронный ресурс]. URL: <http://www.meteonovosti.ru> (08.02.2019).

12. Climatic Research Unit: Data. URL: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/> (HadCRUT4) (08.02.2019).

УДК 551.583

Мониторинг изменений температуры в перигляциальной зоне высокогорья Республики Алтай

Н. А. Кочеева (nina_kocheewa@mail.ru)

В. А. Какорин (wittorio.kakorin@mail.ru)

Горно-Алтайский государственный университет, г. Горно-Алтайск

Аннотация. Рассматриваются особенности температурно-влажностного режима в перигляциальной зоне Республики Алтай. На примере высокогорной долины реки Джело, которая питается тальми водами одноименного ледника, рассмотрено поведение температуры грунта. Обосновывается актуальность и необходимость постоянного мониторинга данных территорий. Основной целью является выявление тенденций к изменению температурных характеристик. В результате установлены некоторые важные особенности поведения температуры в высокогорной зоне Республики Алтай.

Ключевые слова: мониторинг, перигляциальные зоны, Алтай, температура воздуха, температура почвы.

Сегодня уже ни для кого не секрет, что климат нашей планеты меняется. Изменения происходили всегда, в том числе в течение четвертичного периода проявлялись эпохи похолоданий и потеплений. Последнее существенное потепление произошло 10 тыс. лет назад. Однако в этот тёплый период происходили значительные похолодания. Например, Малая ледниковая эпоха, как отмечал П. М. Борисов, проявлялась как «климатическая рябь», но на деятельность людей ока-

зала существенное влияние [1]. Изменение климата и его результаты наблюдаются в разных частях нашей планеты [5–7]. Согласно предположению некоторых исследователей [5], за десятилетие до середины XXI в. произойдет ускоренное повышение общей температуры атмосферы на 0,25 °С, а в последующее десятилетие на 0,36 °С. Тогда как при суммарном повышении температуры, по прогнозной оценке World Meteorological Organization (Всемирная метеорологическая организация) хотя бы на 1 °С приведет к исчезновению 16 % растений, значительному сокращению площади материкового оледенения и повышению уровня мирового океана.

В любом случае, для оценки глобальных изменений очень важно проводить исследования и мониторинг отдельно взятых частей нашей планеты [2]. Т.к. построить картину реальной климатической обстановки нельзя используя лишь общие данные. Основным показателем изменения температуры климата, в наше время, является состояние ледниковых покровов и смежных им территорий, так называемых перигляциальных областей. Именно здесь ряд экологических, геологических и биологических процессов проявляются в наиболее полной мере. Скорость потепления растёт с высотой, что обуславливает разнообразие динамики ландшафтов в высокогорных областях [8]. Это и актуально для обширной высотно-дифференцированной территории Горного Алтая, абсолютный градиент высоты которого составляет более 4 тыс. м. В Горном Алтае соседствуют высокоподнятые горные хребты и вершины с котловинами, с глубоко врезанными долинами больших и малых рек.

Всё это свидетельствует об актуальности наблюдений за характером временной динамики всех компонентов природных комплексов. Особое внимание исследователи уделяют высокогорным областям, где надеются выявить время наибольших изменений и прогнозировать дальнейшее развитие природных комплексов.

Исходя из этих соображений, целью работы авторы видят анализ данных о температурном режиме почв и грунтов в перигляциальной зоне Республики Алтай. В этой связи, задача установления связи температурного режима почв и окружающего воздуха представляется первостепенной. Как уже сказано ранее именно температура воздуха в наибольшей степени влияет на условия функционирования природы в любом регионе планеты.

В Горном Алтае наблюдения за погодой и климатом проводятся уже третье столетие. В специальной литературе появлялись результаты полевых наблюдений. Только в 20-х гг. XX в. был налажен регу-

лярный мониторинг, после открытия в январе 1907 г. первой гидрометеорологической станции в с. Кош-Агач [10], расположенной в Чуйской котловине. Для целей нашей работы важны данные ГМС Кош-Агач, однако она располагается гораздо ниже гипсометрически, чем перигляциальные области хребтов, окружающих котловину. Поэтому авторы участвовали и организовывали наблюдательные пункты за температурой почв в перигляциальной зоне высокогорий. Данные о температуре воздуха были получены на сайте [10].

Температура воздуха ранее уже анализировалась различными авторами [2; 4]. В частности в работе [2] был установлен многолетний линейный тренд повышения температуры воздуха в Кош-Агачском районе на 3°C за 60 лет (период 1955–2015 гг.). Однако для выполнения нашей задачи необходимо привлечение данных о температуре почв. Поэтому датчик был установлен непосредственно в перигляциальной зоне, в долине реки Джело. С целью актуализации и корреляции температурных показателей был проведен анализ данных метеостанции Кош-Агач [9].

Для периода наблюдений авторами использовалась величина среднегодовых показателей температуры воздуха, что позволило выявить линейный тренд повышения температуры на $0,73^{\circ}\text{C}$. В то же время количество осадков, выпадающих в том районе заметно сокращается (рис. 1). Местный климат характеризуется чередованием зим с аномально высокими показателями температуры относительно средних значений предыдущих лет и ранним наступлением оттепели в некоторые года. Подтверждением тому являются ландшафтные индикаторы. В качестве таковых авторы использовали озеро, сформированное талыми водами вышерасположенных ледников и зон снежной аккумуляции. Выше одного из таких озер и был установлен датчик регистрации температуры почвы (дата-логгер фирмы НОВО).

Датчик был размещен в пластиковом тубусе и погружен на глубину 80 см в грунт. На большую глубину пробиться не удалось. С целью лучшего понимания происходящих в той области физических процессов был подробно рассмотрен короткий период с августа 2013 г. по июнь 2016 г. (Регистрация производилась с августа 2013 г. по середину июля 2016 г.) Статистический анализ и корреляции температур воздуха и почвы позволила получить интересные данные, которые представлены на рис. 2.

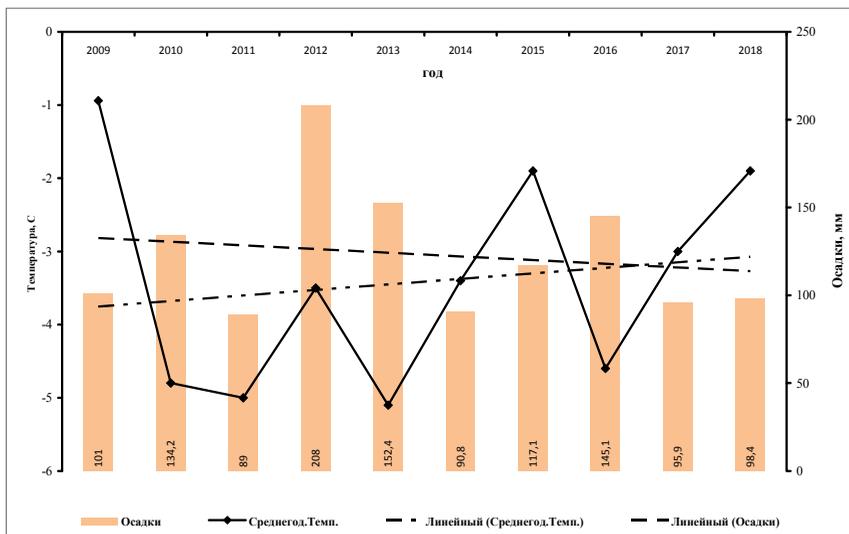


Рис. 1. Среднегодовая температура и сумма осадков (за 10 лет)

Обращает на себя внимание сильная изменчивость от года к году температурно-влажностного режима. Величина вариации количества осадков составляет величину 1434. Корреляции температуры с режимом выпадения осадков не установлено – коэффициент корреляции составил 0,313. Это важный момент исследования, так как от толщины снежного покрова зависит глубина промерзания грунтов. В настоящее время, территория исследования относится к зоне островного распространения многолетнемерзлых пород, что обуславливает ожидания резкого понижения температуры грунта после установления температуры воздуха ниже нуля.

Зависимость температуры почвы от температуры воздуха прослеживается отчетливо (рис. 2). Переход температуры воздуха через ноль характеризуется резкими скачками, что вполне объяснимо в высокогорной зоне Сибири. Данные температурного датчика свидетельствуют о том, что температура грунта изменяется менее резко, она характеризуется большей термостабильностью.

Оттаивание грунта происходит с некоторым запаздыванием по сравнению с переходом температуры воздуха через ноль.

Результаты исследования показали, что температура грунта на глубине 80 см опускается ниже нуля только к весне (табл.), что явилось неожиданностью, так как территория находится на высоте

2256 м. и расположена в 1 км от языка одного из самых крупных ледников Северо-Чуйского хребта.

По мнению авторов, причина может заключаться в том, что метеостанция, которая регистрирует температурно-влажностный режим располагается в котловине, где выпадает крайне мало осадков. Точка наблюдения располагается в долине, защищенной от ветров, что препятствует перераспределению снега и он длительно лежит на поверхности препятствуя глубокому промерзанию грунта. Необходимо учитывать тот факт, что в перигляциальной зоне выпадает значительно больше осадков, чем в котловине. Однако стационарных наблюдений нет и поэтому для однозначного утверждения этого факта нет однозначных численных данных.

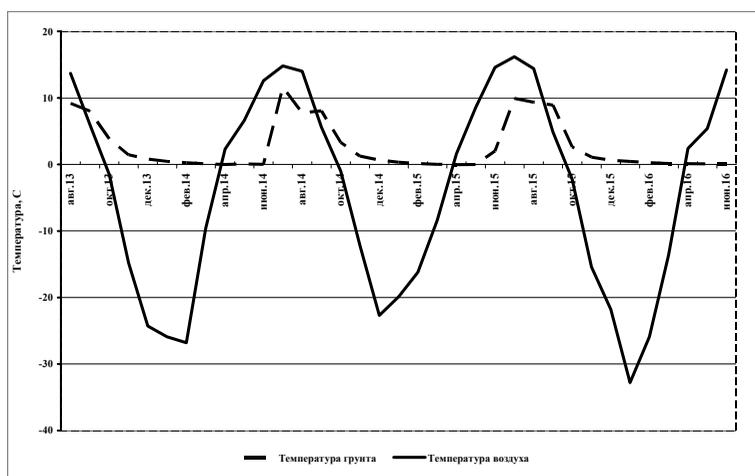


Рис. 2. Среднемесячные температуры воздуха и грунта перигляциальной области

Таблица

Время перехода температуры грунта через ноль

Дата	Янв.15	Фев.15	Мар.15	Апр.15	Май.15	Июн.15
Температура грунта	0,329	0,135	0,024	-0,032	-0,004	2,021

Проделанная работа показала, что в настоящее время существует острая необходимость в мониторинге подобных территорий с помощью ДДЗ. Ведь изменение в любую сторону вызовет необходимость адаптировать систему хозяйствования местного населения.

Список литературы

1. Борисов П. М. К проблеме коренного улучшения климата // Изв. ВГО. 1962. Т. 94, вып. 4. С. 304–320.
2. Кочеева Н. А., Шанкибаева М. Х. Особенности изменения температуры воздуха на границе гор Алтая и равнин Западной Сибири // Вестн. Удмурт. ун-та. Сер. биология. Науки о земле. 2018. Т. 28, вып. 4. С. 407–418.
3. Сухова М. Г., Журавлева О. В. Динамика изменения температуры воздуха и осадков в Чуйской котловине // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Сер. Естеств. Науки. 2017. № 1. С. 124–129.
4. Харламова Н. Ф. Климатические особенности плоскогорья Укок и прилегающих территорий // Изв. АлтГУ. 2004. № 3. С. 71–77.
5. Andreas Gobiet, Sven Kotlarski. 21st century climate change in the European Alps – A review // Science of The Total Environment. 2014. Vol. 493. P. 1138–1151.
6. Janja Vrzec, Ralf Ludwig. Hydrological system behaviour of an alluvial aquifer under climate change // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 649. P. 1179–1188.
7. Ockenden M. C. Changing climate and nutrient transfers: Evidence from high temporal resolution concentration-flow dynamics in headwater catchments // Science of The Total Environment. 2016. Vol. 548–549. P. 325–339.
8. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world / N. Pepin [et al.] // Nature Climate Change. 2015. Vol. 5, N 5. P. 424.
9. URL: <https://rp5.ru> (дата обращения: 15.02.2019).
10. URL: http://cliware.meteo.ru/goskom_cat/list/gm10view.jsp (дата обращения 17.02.2019).

УДК 630.431.1 (571.5)

Климатические и циркуляционные факторы лесных пожаров на территории Байкальского региона

И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru)¹

Е. Л. Макаренко (elmakarenko@bk.ru)²

Е. В. Максютова (emaksyutova@yandex.ru)²

¹ Иркутский государственный университет, г. Иркутск

² Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск

Аннотация. Исследована пространственно-временная динамика пожаров в таежных и степных геосистемах Байкальского региона во взаимосвязи с циркуляционными и климатическими условиями в теплый период (апрель–сентябрь) 2002–2017 гг. Проанализирован вклад процессов антициклогенеза и блокирования в возникновение и распространение лесных пожаров в Байкальском регионе.

Ключевые слова: лесные пожары, геосистемы, Байкальский регион, погода, климат, циркуляция.

Введение

Байкальский регион, площадь которого составляет 1558,1 тыс. км², входят три субъекта Российской Федерации – Иркутская область, Республика Бурятия и Забайкальский край. Значительная

часть его территории входит в водосборный бассейн оз. Байкал. Регион имеет все признаки целостного ландшафтно-экологического и культурно-хозяйственного единства. На его территории представлены разнообразные природные ландшафтные комплексы, осложненные вертикальной поясностью при значительном колебании высот.

Лесами покрыта большая часть территории Байкальского региона: в Иркутской области – 82,6 %, в Республике Бурятия – 64,1 %, в Забайкальском крае – 68,3 % (для сравнения: в России – 46,9 %). В целом, лесопокрытая площадь в Байкальском регионе составляет 14,5 %, а запас древесины – 16,6 % от российских показателей [8]. Леса представлены в значительной степени таежными геосистемами с преобладанием темнохвойных и светлохвойных пород. Распространены они преимущественно в центральной и северной частях Байкальского региона, в южной части региона распространены подтаежные и степные геосистемы.

Особенно негативное влияние пожары оказывают на леса, значительно снижая их пищевую, древесно-сырьевую и экологическую роли. Нарушение в лесных экосистемах водного режима, лесообразовательных, почвообразовательных, микроклиматических, кислородопроизводящих, углероддепонизирующих и иных процессов ведет к значительному снижению средостабилизирующих, средорегулирующих, средоформирующих, средозащитных функций. Последствия пожаров особенно велики для наиболее хрупких лесных экосистем (северо-таежных, горно-таежных), а также для тех, на которые возложена особая комплексная природоохранная роль [11].

На пожары в Байкальском регионе приходится наибольшая доля в общей площади погибших лесов – в среднем 50-70 % ежегодно (за период с 2000 г.). Более чем в 90 % случаев пожары возникают в результате антропогенного фактора, среди природных причин следует рассматривать комплексное воздействие высоких температур в сочетании с отсутствием атмосферных осадков и высокими скоростями ветра. Количество пожаров находится в прямой зависимости от плотности населения и протяженности дорожной сети на единицу площади. С уменьшением плотности населения число пожаров закономерно уменьшается, а с другой стороны увеличивается средняя площадь пожара. Увеличению площади пожаров способствует также труднодоступность значительной части горных районов Байкальского региона, осложняющая работы по тушению пожаров, охватывающих значительные площади в случае, если не удастся их ликвидировать в начальной стадии развития.

Согласно Лесным планам исследуемых субъектов, продолжительность пожароопасного периода в Байкальском регионе за последние 40 лет увеличилась и достигла в среднем 170 дней [4]. Первые пожары приходятся на вторую половину апреля, а последние – на первую декаду октября. Пик пожарной опасности по числу пожаров наступает, как правило, в мае – после активного иссушения почвы и напочвенного покрова под действием усиления ветра в условиях более интенсивного турбулентного перемешивания, при минимальной относительной влажности воздуха (18–20 %) и небольшом количестве атмосферных осадков. Развивающийся в течение лета травяной покров способствует уменьшению числа пожаров и снижению интенсивности уже возникших. Исключение – засушливые годы, когда чрезвычайная пожарная опасность сохраняется в течение лета и более. Основной фактор возгораний в такие годы – высокие температуры при малом количестве атмосферных осадков. В лесах побережья озера Байкал важную роль в возникновении лесных пожаров играет также водный уровень озера Байкал. При его крайне низких показателях, как было, например, в 2014 и 2015 гг. происходит снижение влаги в почве, что способствует высыханию напочвенного покрова и увеличению массы сухих горючих материалов.

Значительное влияние на скорость возгорания и распространение пожара оказывает, пожарная опасность лесорастительного покрова. Она определяется типом леса, характеризующегося ведущей лесообразовательной породой, подлеском, а также составом, количеством и распределением лесных горючих материалов, содержанием влаги в них, иными природными особенностями [5], среди которых доминируют заболоченность и характер рельефа, формирующий выраженные микроклиматические закономерности в горно-котловинном рельефе.

Среди климатических факторов в качестве причин возникновения и распространения лесных пожаров рассматривают малоснежную зиму, длительный (15–20 дней) период без дождя с высокой (выше средней многолетней) средней суточной температурой воздуха и низкой относительной влажностью воздуха, увеличение средней скорости ветра и количества гроз. Поэтому изменения климата могут оказывать воздействие на повторяемость, интенсивность и пространственный масштаб лесных пожаров [6].

Для Байкальского региона характерны низовые пожары (около 90 % от числа всех пожаров). Особенно катастрофичны повальные лесные пожары, в которые чаще всего переходят низовые пожары. Значительная площадь лесов повреждается верховыми пожарами. Не-

значительно, преимущественно в Республике Бурятия, распространенные подземные (торфяные) пожары, являющиеся трудно тушимыми. При неконтролируемости процесса тушения они могут стать причинами лесных пожаров.

Методы исследований

Для анализа характеристик лесных пожаров в работы использованы данные спутникового мониторинга ВЕГА-PRO за 2002–2017 гг. [9]. На территории Байкальского региона определялись общая площадь лесных пожаров за год и средняя площадь одного пожара, а также число случаев возгораний с подразделением территории Байкальского региона на три субъекта (Иркутская область, Республика Бурятия и Забайкальский край).

Характеристика климатических параметров пожароопасного сезона представлена по данным [7]. Для оценки изменения основных климатических параметров пожароопасного сезона (температуры воздуха и атмосферных осадков) привлекались данные наблюдений на отдельных метеорологических станциях Байкальского региона (Иркутск, Улан-Удэ, Чита) [2, 3]. Пространственно-временные колебания климатических характеристик пожароопасного сезона представлены как отклонения от предыдущего многолетнего периода до 1980 г [7] и последующих за ним лет 1981–2017 гг.

Для оценки циркуляционных факторов изменений климата в исследуемый период анализировалась многолетняя динамика метеорологических величин на территории Байкальского региона, рассчитывались отклонения метеорологических параметров от климатической нормы (1981–2010 гг.) по данным Реанализа NCEP/NCAR за 1948–2018 гг.

Результаты исследований

Из анализа размещения очагов пожаров за исследуемый период (с 2002 по 2017 гг.) наиболее частым пожарам на территории Иркутской области подверглись следующие типы растительности [1]:

1. Равнинные среднетаежные сосново-лиственничные, местами с примесью темнохвойных кустарничково-мелкотравно-зеленомошные леса на водоразделах, склонах и террасах и их антропогенная серия (светлохвойно-мелколиственная бруснично-мелкотравно-зеленомошная).

2. Равнинные южнотаежные смешанные темнохвойные леса (ель, пихта, кедр) с лиственницей травяно-кустарничково-зеленомошные на

водораздельных поверхностях и их дренированных склонах разных экспозиций; сосновые, лиственнично-сосновые лиственничные и сосново-лиственнично-разнотравные леса на водоразделах и их склонах.

3. Равнинные подтаежные сосновые и лиственнично-сосновые с подлеском из рододендрона и душейки кустарничково-травяные на выровненных поверхностях и склонах в сочетании со злаково-разнотравными лесами на сухих песчаных террасах, орляково-крупнотравные на низких водоразделах и их склонах и багульниковоголубичные в нижних частях склонов и по берегам рек и их антропогенная серия (светлохвойно-мелколиственная с подлеском из рододендрона кустариничко-травяная).

На территории Республики Бурятия наиболее часто пожары возникали в таких типах растительности как:

1. Горно-таежные смешанные темнохвойные (ель, кедр, пихта) с лиственницей с подлеском из душейки и рябины кустарничково-травяно-зеленомошные в нижних частях склонов.

2. Горно-таежные кедрово-лиственничные и лиственничные с кедром местами с подлеском из рододендрона мелколистного и березки круглолистной травяно-кустарничкового-зеленомошные леса в сочетании с лиственничными и сосново-лиственничными лесами на выровненных поверхностях, пологих и крутых склонах разных экспозиций и на склонах к речным долинам.

3. Горно-таежные лиственничные с подлеском из ерника и душейки местами с подлеском из рододендрона даурского кустарничково-травяно-зеленомошные леса в нижних и средних частях склонов разных экспозиций.

На территории Забайкальского края наиболее часто пожары возникали в таких типах растительности как:

1. Лесо-степные горные комплексы лиственничных и сосновых, нителистниковых степей, остепненно-разнотравных лугов и кустарниковых зарослей на узких выровненных поверхностях и их склонах и по речным террасам.

2. Лесо-степной равнинный комплекс сосновых остепненных редкотравных лесов и степных формаций, на выпуклых водоразделах, их пологих склонах.

4. Лугово-степные комплексы разнотравно-злаковые, полынно-разнотравные с кустарниками, богато-разнотравно-осоково-злаковые на выровненных поверхностях, на склонах к речным долинам.

Следует сказать, что большая часть перечисленных типов лесорастительного покрова располагаются в районах, имеющих наиболь-

шее хозяйственное развитие и антропогенную нагрузку на природные ландшафты. В отдельные, наиболее засушливые годы, пожарами охватывались и иные типы растительного покрова, расположенные на более удаленных участках, а также менее подверженные к возгоранию в обычные и тем более влажные годы. К ним можно отнести: горно-таежные лиственничные с подлеском из кедрового стланика и золотистого рододендрона мелко травно-зеленомошно-лишайниковые места с багульниковым лесом в верхней части лесного пояса на выпуклых поверхностях и крутых склонах разных экспозиций (Бурятия); горно-таежные пихтово-кедровые и елово-кедровые с лиственницей кустарничково-травяно-зеленомошные на вершинах высоких водоразделов, пологих склонах, речных террасах, а также склонах к речным долинам леса и их антропогенные серии (мелколиственная с кедром, елью, пихтой, лиственницей и светлохвойная с кедром, елью и пихтой кустарничково-травяно-зеленомошные) (Иркутская область), а также иные типы лесорастительного покрова, расположенные в межгорных понижениях, заболоченных долинах, на склонах теневых экспозиций.

Как показало исследование, в 2002–2017 гг. по всем трем регионам по числу возгораний мы наблюдаем несколько максимумов (пиков) – в 2003, 2007–2008, 2011, 2014–2015 гг. (рис. 1). По показателям площади, пройденной пожарами, единовременные пики для всех трех регионов характерны только для 2003 и 2015 гг., в остальные годы пиковые значения по регионам несколько смещены (1–2 года). При этом с 2002–2003 гг. наблюдается слабовыраженная тенденция снижения общего годового числа возгораний в Байкальском регионе, что, скорее всего, связано с некоторыми профилактическими мерами, предпринимаемых на уровне лесного хозяйства. Лидером по числу случаев возгораний в большинстве лет является Иркутская область, по площади возгораний за исключением 2016 и 2017 гг. Забайкальский край, где климатические условия в большей степени способствуют быстрому распространению лесных пожаров на фоне более выраженной засушливости климата данного региона.

Один из информативных показателей размеров пожарного бедствия – средняя площадь одного пожара (рис. 1 *с*, 2 *с*). Наиболее сильно по данному показателю выделяется 2014 г. и 2015 г., когда максимальные значения были достигнуты во всех трех субъектах. Высокое значение площади одного пожара сохраняется для Забайкальского края и в 2017 г. Развитие засушливых условий в Байкальском регионе в целом было столь велико, что при схожем уровне числа возгораний в 2011, 2014, 2015 гг. площадь одного пожара относительно 2011 г.

увеличилась в 2014 г. в 3,2 раза, а в 2015 г. в 5,2 раза (рис. 2 *a, b, c*). В 2016 и 2017 гг. размер одного пожара в Байкальском регионе за счет Иркутской области сохраняется на высоких отметках даже при снижении числа возгораний в эти годы.

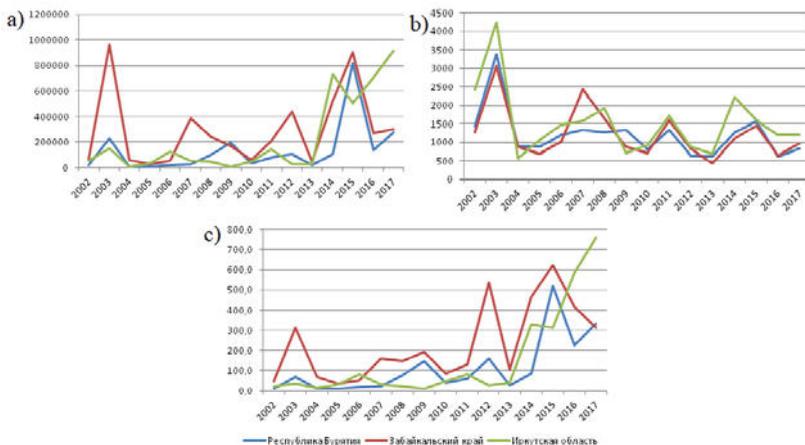


Рис. 1. Общая площадь (га) за год, пройденная пожарами (*a*), число случаев (ед.) возгораний за год (*b*) и средняя площадь (га) одного пожара за год (*c*) в 2002–2017 гг.

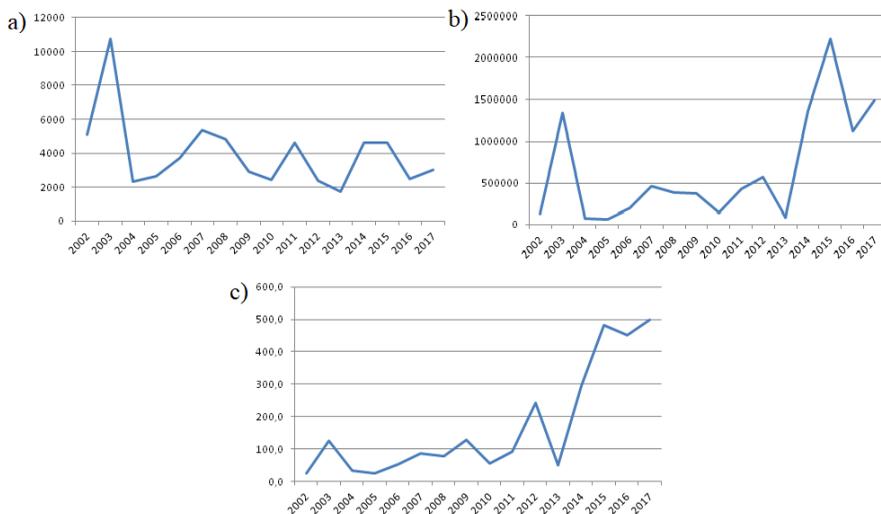


Рис. 2. Годовые число случаев (ед.) возгораний (*a*); общая площадь (га), пройденная пожарами (*b*); средняя площадь (га) одного пожара (*c*) в Байкальском регионе в 2002–2017 гг.

В работе проведен анализ климатических и циркуляционных факторов возникновения лесных пожаров на исследуемой территории в 2002–2017 гг. По многолетним данным на большей части рассматриваемой территории снежный покров появляется с первой-второй декады октября, а сходит с третьей декады апреля по вторую декаду мая [7]. Под действием увеличенного прихода солнечной радиации и усиленного испарения повышенные участки рельефа быстро освобождаются от влаги и становятся сухими. Поэтому пожары возникают уже в апреле-мае, сразу после схода снежного покрова. Температурный режим в пожароопасные месяцы характеризуется увеличением средней месячной температуры воздуха с апреля по июль, а затем убыванием к сентябрю. В июле средние температуры воздуха составляют 16–19°C, а средние максимальные ее величины достигают 24–26 °C. Суточные амплитуды температур с апреля по сентябрь составляют порядка 10–12 °C [10].

Режим увлажнения рассматриваемой территории характеризуется тем, что в апреле – мае выпадает наименьшее количество атмосферных осадков, максимум которых чаще всего отмечается в августе (~60–100 мм). К сентябрю количество выпавших осадков вновь уменьшается на всей рассматриваемой территории (30–50 мм). К концу апреля и в мае отмечается минимальная относительная влажность воздуха, связанная с наименьшим количеством атмосферных осадков и резким повышением температуры воздуха. Поэтому в этот период в дневные часы наблюдается наибольшее количество сухих дней (10–14 в апреле и 17–23 в мае) с относительной влажностью в один из сроков наблюдений $\leq 30\%$.

Сочетание высокой температуры с низкой относительной влажностью воздуха в мае и в начале июня при усилении скорости ветра приводит к возникновению суховеев и засух, которые способствуют повышению пожароопасности. Преобладающими ветрами в течение всего пожароопасного сезона являются северо-западные и ветры южной составляющей. За пожароопасный период наибольшие скорости ветра приходятся на апрель-май (до 4,5 м/с). Наибольшее среднее число дней с ветром >15 м/с наблюдается также в апреле-мае (до 7 дней).

Многолетние изменения температурного режима последних десятилетий (1981–2017 гг.) характеризуются ростом температур воздуха во все месяцы теплого периода (апрель-сентябрь). Максимальных значений положительные отклонения средних месячных температур воздуха на территории Байкальского региона достигают в апреле и в

мае (табл. 1). В изменениях месячных сумм атмосферных осадков нет четко выраженных закономерностей.

Таблица 1

Отклонения средней месячной температуры воздуха (°С) и сумм атмосферных осадков (%) в пожароопасные месяцы за 1981–2017 гг. от предыдущего многолетнего периода (1881–1980 гг.) в Байкальском регионе

Станция	Месяцы					
	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Отклонения средней месячной температуры воздуха						
Иркутск	1,9	1,7	1,0	0,9	1,1	1,1
Улан-Удэ	1,4	1,9	1,3	0,8	1,3	1,0
Чита	1,4	1,4	1,1	1,2	1,1	1,1
Отклонения сумм атмосферных осадков						
Иркутск	6	8	-13	10	1	-1
Улан-Удэ	-16	26	13	-13	1	-9
Чита	32	17	24	-15	9	-3

Насколько значим вклад климатических и циркуляционных факторов в изменениях характеристик лесных пожаров на территории Байкальского региона можно проследить на примере многолетней динамики метеорологических величин (рис. 3). Увеличение площади лесных пожаров в последние десятилетия на территории рассматриваемого региона происходит на фоне уменьшения влагосодержания воздуха и сумм выпавших осадков в теплый период года (апрель – сентябрь), которое наблюдается в условиях роста температур и преобладания положительных аномалий приземного давления и геопотенциала в средней тропосфере, т. е. адвективно-динамических факторов антициклогенеза.

Представляет интерес исследование погодных и климатических факторов в годы с наиболее высокими и низкими показателями пожароопасности в Байкальском регионе в исследуемый период. Как годы с наиболее высокими значениями выбраны 2003 и 2015 гг., а с наиболее низкими значениями 2004 и 2013 гг. На рисунке 4 показано изменение аномалий средних суточных значений температуры воздуха и осаждаемой влаги в Байкальском регионе (51–64°с. ш. и 95–122°в. д.). Видно, что в годы с высоким уровнем пожароопасности чаще отмечались положительные аномалии температуры воздуха и отрицательные аномалии атмосферных осадков.

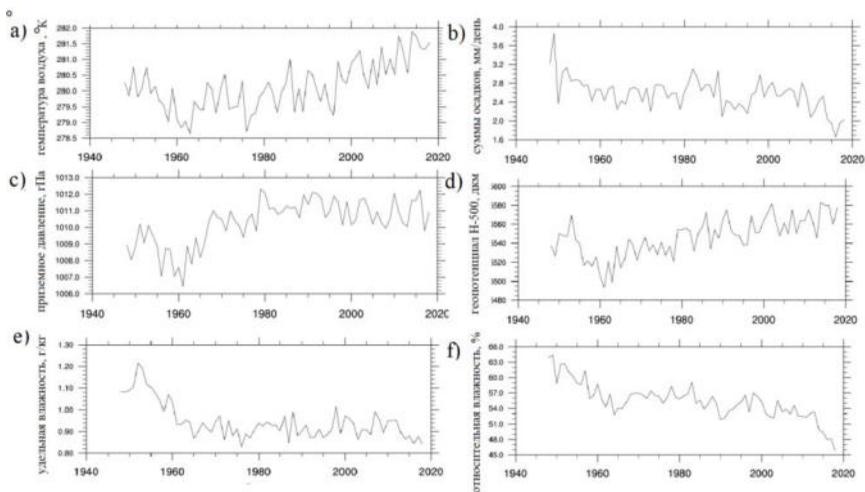


Рис. 3. Изменение температуры воздуха у поверхности Земли (а), сумм атмосферных осадков (б), приземного давления (с), геопотенциала на уровне АТ-500 гПа (д), удельной (е) и относительной влажности (ф) воздуха у поверхности Земли в 1948–2018 гг.

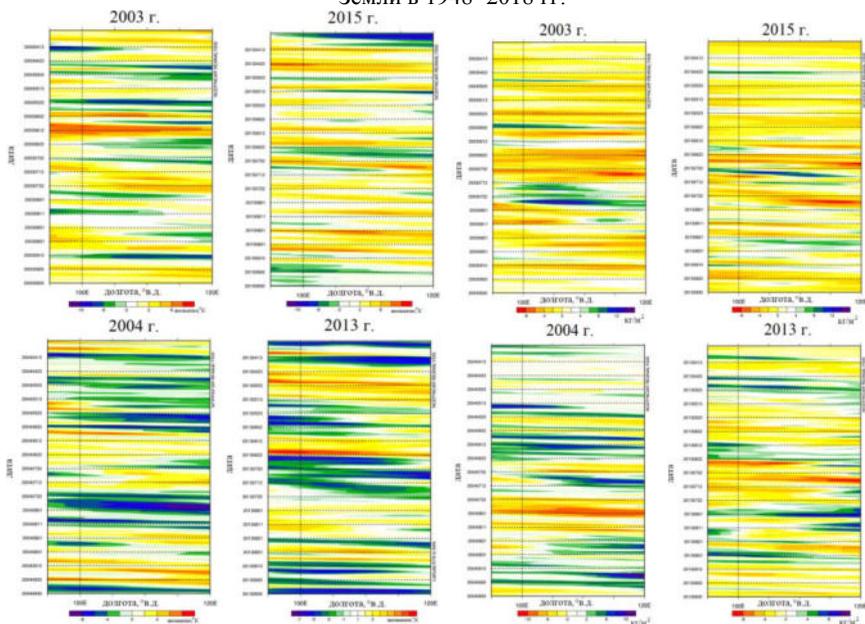


Рис. 4. Аномалии средних суточных значений температуры воздуха (левая панель) и суточных значений осажженной влаги (правая панель) в Байкальском регионе в период с 1 апреля по 30 сентября в различные годы

Учитывая, что засушливые условия в значительной степени определяются синоптическими и циркуляционными факторами, были проанализированы изменения средних месячных полей геопотенциальных высот в средней тропосфере (500 гПа) и приземного давления. Выявлено, что в годы с высоким уровнем пожароопасности (2003 и 2015 гг.) в теплый период (апрель-сентябрь) на территории Байкальского региона отмечались положительные аномалии геопотенциала (до +46 дкм), которые сопровождалась преобладающими тенденциями роста давления у поверхности Земли (до +3 гПа) (рис. 5 *a, b*). В годы с минимальным количеством и площадью лесных пожаров в исследуемый нами период, наоборот, на территории Байкальского региона преобладали отрицательные аномалии в поле геопотенциала (до -40 дкм) и атмосферного давления (до -2 гПа) (рис. 5 *c, d*).

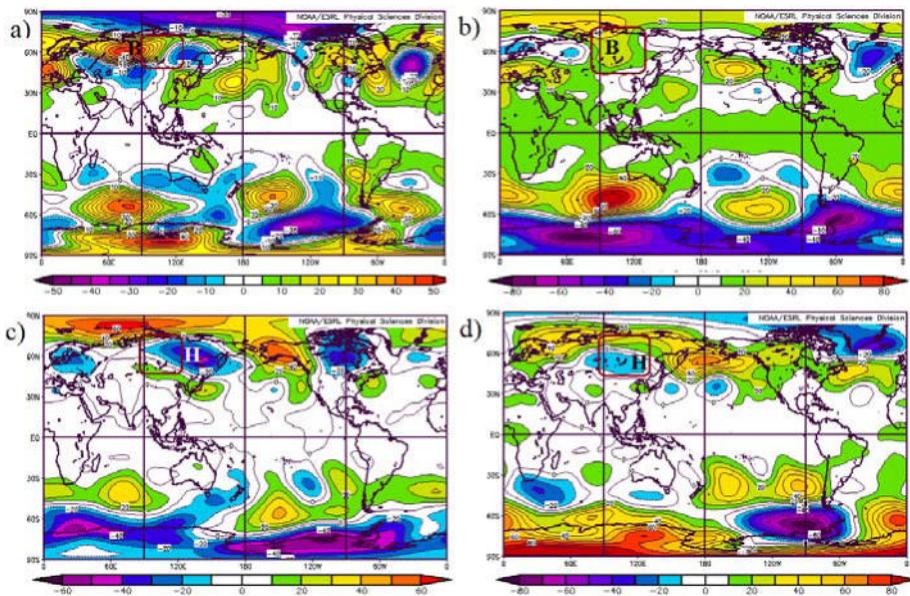


Рис. 5. Аномалии средних месячных значений геопотенциала АТ-500 гПа (дкм) в теплый период (апрель-сентябрь) 2003 г. (*a*), 2015 г. (*b*), 2004 г. (*c*) и 2013 г. (*d*)

Выводы

Леса Байкальского региона выполняют важную защитную роль в поддержании экологического равновесия, особенно в прибрежной полосе озера Байкал. Губительное воздействие на них оказывают, преж-

де всего, пожары. Их действие усугубляется высокой пожарной опасностью лесов, представленной хвойными древостоями, а также природными особенностями территории, способствующими, например, быстрым и направленным распространением пожаров в горно-котловинном рельефе, характеризующимися труднодоступностью удаленных участков, что затрудняет ликвидацию пожаров в начале их развития.

Климатические особенности Байкальского региона в теплый период года, такие как высокие значения максимальных температур воздуха и подстилающей поверхности, высокая вероятность засушливых периодов, особенно весной, создают условия, благоприятные для возникновения и распространения лесных пожаров.

В исследуемый период 2002–2017 гг. по показателям общей площади лесных пожаров в Байкальском регионе выделяется Забайкалье, на территории которого по сравнению с Иркутской областью и Республикой Бурятия в большей степени проявляется негативное влияние засушливых условий при высокой вероятности сочетания положительных аномалий температур и средней скорости ветра. По числу случаев возгораний выделяется Иркутская область, что можно объяснить большей плотностью населения по сравнению с регионами Бурятии и Забайкалья и более высокими показателями лесистости.

Современные тенденции изменения климатических и циркуляционных условий на территории Байкальского региона в теплый период года проявляются в увеличении вероятности засушливых периодов на фоне проявления адвективно-динамических факторов антициклогенеза, что определяет высокий уровень пожароопасности в регионе. Наглядно влияние погодных факторов и синоптических условий в изменениях характеристик лесных пожаров отражают аномалии метеорологических полей. В качестве прогностических предикторов лесных пожаров в Байкальском регионе следует рассматривать аномалии полей приземного давления и геопотенциала в средней тропосфере, отражающих вклад подвижного циклогенеза и процессов блокирования в возникновение и распространение лесных пожаров.

Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 17-29-05068.

Список литературы

1. Белов А. В., Лопаткин Д. А. Экологический атлас Байкальского региона. 2017. карта (60) [Электронный ресурс]. URL: <http://atlas.isc.irk.ru> (дата обращения 10.03.2019).
2. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394 [Электронный ресурс] /

О. Н. Булыгина, В. Н. Разуваев, Н. Н. Коршунова, Н. В. Швец. URL: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения 20.03.2019).

3. Описание массива данных о среднемесячной температуре воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485 / О. Н. Булыгина, В. Н. Разуваев, Л. Т. Трофименко, Н. В. Швец. URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных>. (дата обращения 20.03.2019).

4. Евдокименко М. Д. Факторы горимости байкальских лесов // География и природ. ресурсы. 2011. № 3. С. 51–57.

5. Лесная энциклопедия. В 2 т. Т. 2 / гл. ред. Г. И. Воробьев ; ред. кол.: Н. А. Анучин [и др.]. М. : Сов. энцикл., 1986. 631 с.

6. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М. : Росгидромет, 2012. 509 с.

7. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Л. : Гидрометеоздат, 1989–1998. Вып. 17, № 20–23.

8. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2018 : стат. сб. / Росстат. М., 2018. 1162 с.

9. Спутниковый сервис анализа вегетации ВЕГА-PRO [Электронный ресурс]. URL: <http://pro-vega.ru> (дата обращения 11.01.2019).

10. Структура и ресурсы климата Байкала и сопредельных пространств. Новосибирск : Наука, 1977. 272 с.

11. Фуряев В. В. Роль пожаров в процессе лесообразования. Новосибирск : Наука, 1996. 253 с.

УДК 551.578.465

Структура снежного покрова и особенности зимнего сезона 2018–2019 гг. в Московском регионе

В. В. Литвиненко (vl.litv7@mail.ru)¹

Д. М. Фролов (denisfrolov@mail.ru)²

¹ МПГУ, г. Москва

² МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва

Аннотация. Приведены результаты снегомерных наблюдений в г. Москве и Московской области, дана попытка оценки общего хода зимнего сезона 2018–2019 гг. в Московском регионе на основе собственных наблюдений авторов и данных метеостанций Москвы и области.

Ключевые слова: снежный покров, снег, структура, плотность, Московский регион, Москва.

Согласно метеоданным, температура зимнего сезона (ноябрь – март) 2018/19 г. в Москве была $-2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Архив погоды на метеостанции ВДНХ [1]). Это немного выше, чем в предыдущий 2017/18 ($-3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$) и 2016/17 год ($-3,4\text{ }^{\circ}\text{C}$), но ниже, чем в еще предыдущие два года 2015/16 и 2014/15 (около $-1,86\text{ }^{\circ}\text{C}$). Количество осадков в сезон 2018/19 составило 212 мм. Это меньше, чем количество осадков в сезоны 2017/18, 2016/17, 2015/16 (294, 279, 291 мм), но больше, чем в

предыдущие сезоны 2014/15 и 2013/14 (205 и 189 мм осадков), но меньше, чем в 2012/13 сезон (308 мм) (рис. 1) (данные согласно [4; 6–8]).

Снежный покров в зимний сезон 2018/19 окончательно установился в нормальные сроки – около 22 ноября, и достиг мощности порядка 25 см к концу декабря.



Рис. 1. Изменение температуры, осадков и толщины снежного покрова сезона 2018–2019 гг.

Декабрь и январь 2018–2019 гг. отличается малым количеством и продолжительностью оттепелей. Температура в этот период понижалась до -20° и ниже (в Московской области) [1].

Прирост снежного покрова в этот период проходил в целом равномерно и достиг своего пика в конце января. По данным регулярных наблюдений на метеоплощадке Географического факультета Московского педагогического государственного университета (район Алексеевский, г. Москвы) максимальная зафиксированная мощность снежного покрова составила 54 см 28.01.19 (рис. 2), тогда как максимальная высота снега, зафиксированная на метеостанции ВДНХ Росгидромета составила 49 см [1]. Такое расхождение, вероятно объясняется местными микроклиматическими условиями, связанными с плотной застройкой в районе метеоплощадки МПГУ. В этот же период, по данным Росгидромета и Белгидромета снежный покров достиг максимальной площади покрытия в Европейской части России в изучаемом

сезоне (рис. 3), что на месяц раньше среднего многолетнего периода. Последовавшая в феврале затяжная оттепель привела к значительному сокращению мощности и площади снежного покрова в Московском регионе и ЕТР в целом. Так, 21.02.2019 мощность снежного покрова на метеоплощадке МПГУ снизилась до 39 см, на метеостанции ВДНХ его высота уменьшилась до 30 см [1].

В целом, мощность снежного покрова в феврале по данным метеостанции ВДНХ была 33 см. Это меньше, чем в предыдущий год 2017/18 (46 см), но больше, чем в сезоне 2016/17 года (30 см).



Рис. 2. Динамика снегонакопления по данным наблюдений метеоплощадки Географического факультета МПГУ

Наблюдения за высотой, плотностью и структурой снежного покрова проводились нами в четырёх парках г. Москвы, расположенных в разных природных районах (рис. 4), а также на территории г.о. Подольск и Ногинского района Московской области.

Плотность снега в начале декабря в Московском регионе колебалась в пределах $0,08\text{--}0,12\text{ г/см}^3$. Структурно в этот период снежный покров состоял из 1–2 слоев: нижнего состоящего из мелких ледяных кристаллов диаметром 0,5 мм и верхнего свежевывавшего слоя состоящего преимущественно из снежинок и их обломков. Плотность снежного покрова в начале зимы (1–10 декабря) в Ногинском районе колебалась от $0,07$ до $0,12\text{ г/см}^3$, а мощность изменялась в диапазоне от 4 см в ельниках до 13 см на открытых пространствах.

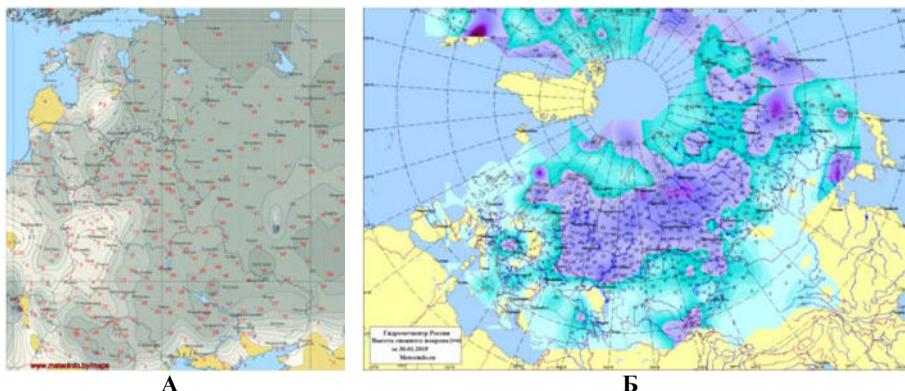
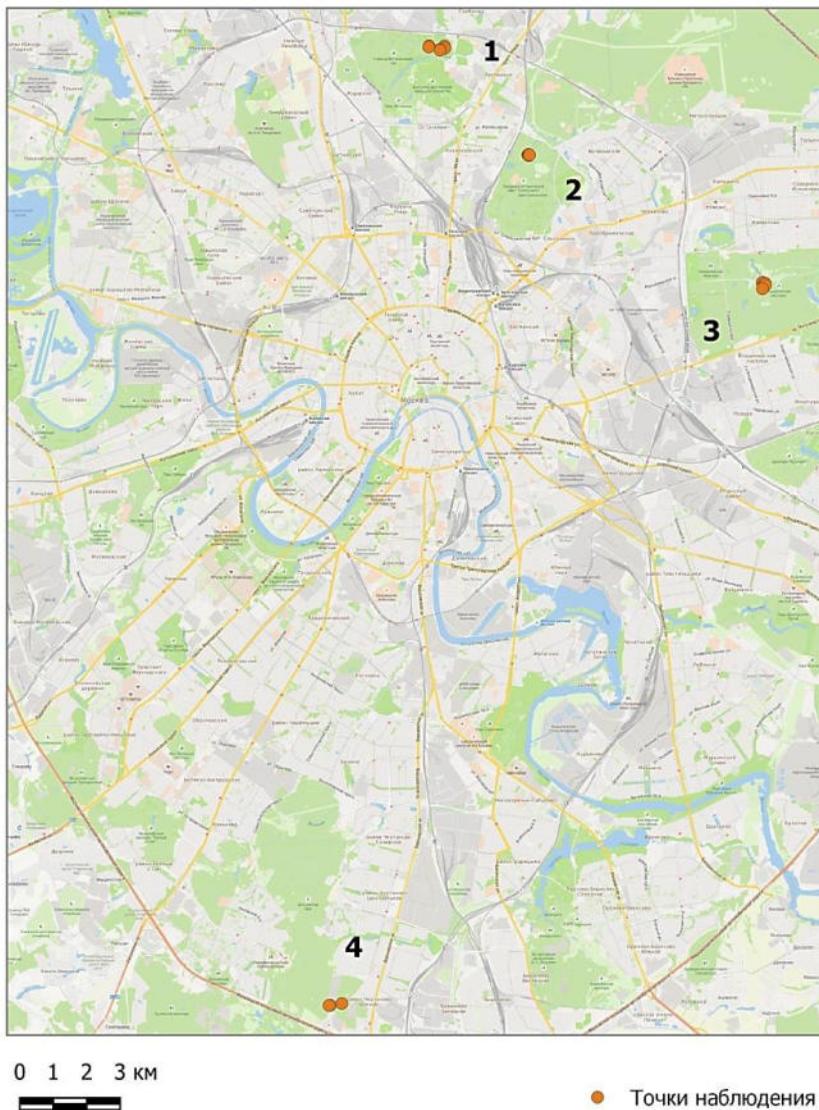


Рис. 3. Карты распределения мощности снежного покрова по состоянию на 30 января 2019 г. подготовленные Белгидрометом (А) [2] и Гидрометцентром России (Б) [3]

Проведенные нами 16 декабря наблюдения за пространственным распределением мощности снежного покрова на исследуемом участке Битцевского природно-исторического парка площадью 3,4 га (включающего в себя участок поляны с сухим высокотравьем, опушку и часть смешанного леса), показали стандартное пространственное изменение мощности снега. Наибольшая мощность была обнаружена в районе поляны – 25–26 см, плавно уменьшаясь по мере углубления в лес, за исключением участков рядом с дорогами и тропами, а также с «окнами» разреженного древостоя. На основе полученных данных, с использованием ГИС была построена карта высоты снежного покрова, представленная на рис. 5.

Структура снежного покрова в Битцевском парке в середине января (рис. 6) в смешенном лесу представлена 5 слоями, а в поле 4 (за исключением воздушной прослойки). Структура снега в лесу и поле резко отличается, что обусловлено различными микроклиматическими условиями, а также различием интенсивности физических процессов, протекающих в снежном покрове, в том числе процессов перекристаллизации снега. На рис. 7 представлены фотографии кристаллов из двух слоев полученные нами с использованием цифрового микроскопа. Основные отличия между полем и лесом помимо структуры и мощности, заключаются в плотности снега, а также количеством обнаруженных погребенных ледяных корок. Интегральная плотность снега в этот период изменялась от 0,2 (лес) до 0,17 (поле) г/см³.



1:320000

Рис. 4. Карта точек наблюдения в парках г. Москвы. 1 – Главный Ботанический сад РАН; 2 – Парк «Сокольники»; 3 – Измайловский природно-исторический парк; 4 – Битцевский природно-исторический парк

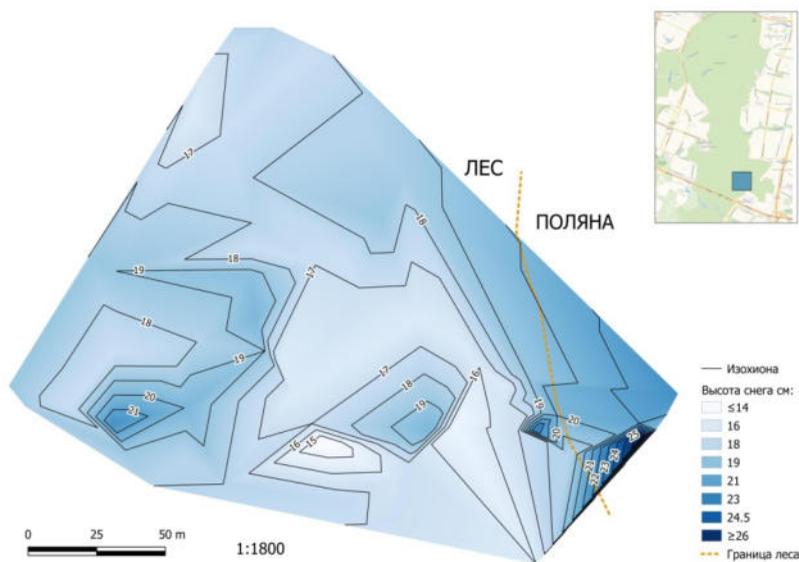


Рис. 5. Карта распределения высоты снежного покрова участка Битцевского природно-исторического парка г. Москвы 16 декабря 2018 г.

В начале марта, структура снежного покрова в тех же точках Битцевского парка закономерно изменилась (рис. 8), исчезла воздушная прослойка на поляне, помимо этого заметно возросло количество обнаруженных ледяных корок, что связано с метеорологическими условиями второй половины сезона, в том числе периодом продолжительной оттепели, время от времени сменявшейся непродолжительными похолоданиями и возвращениям температуры воздуха к показателям близким к многолетней норме.

Плотность снега в этот период составляла от 0,24 в лесу до 0,18 г/см³ на поляне. Несмотря на значительное увеличение мощности снежного покрова, плотность снега изменилась не значительно, особенно в поле. Что можно объяснить, в частности большим количеством воздуха находящегося в пустотах (особенно вокруг крупных стеблей травы) в снежном покрове. Однако к концу марта (23.03.2019), плотность снежного покрова значительно изменилась. Она практически выровнялась между лесом и поляной и составила 0,35 в лесу и 0,33 г/см³ в поле.

ки), 0,29 (Ботанический сад), 0,30 (парк Измайлово), в лиственном лесу плотность составила от 0,34 Ботанический сад РАН до 0,28 в Измайловском парке. В сосновой роще Ботанического сада плотность снега равна 0,30 г/см³, а мощность 25 см.

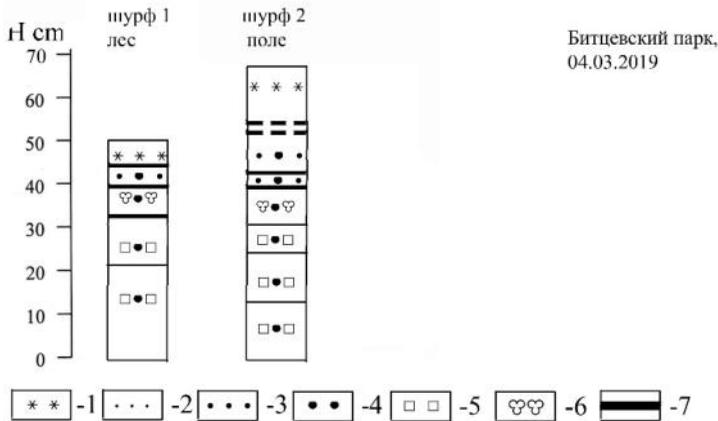


Рис. 8. Наблюдаемый разрез снежного покрова в Битцевском парке 4 марта 2019 г.
Условные обозначения: 1 – свежесыпавший снег, 2 – мелкозернистый снег (0,1–0,5 мм), 3 – среднезернистый снег (0,5–1 мм), 4 – крупнозернистый снег (1–3,5 мм); 5 – оgranённые кристаллы; 6 – сmерзшиеся кристаллы 7 – ледяная корка

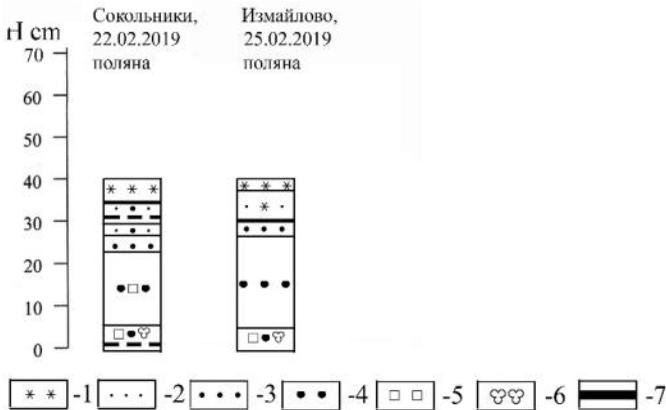


Рис. 9. Наблюдаемый разрез снежного покрова в Сокольниках 22 февраля и в Измайлово 25 февраля 2019 г.
Условные обозначения: 1 – свежесыпавший снег, 2 – мелкозернистый снег (0,1–0,5 мм), 3 – среднезернистый снег (0,5–1 мм), 4 – крупнозернистый снег (1–3,5 мм); 5 – оgranённые кристаллы; 6 – сmерзшиеся кристаллы 7 – ледяная корка

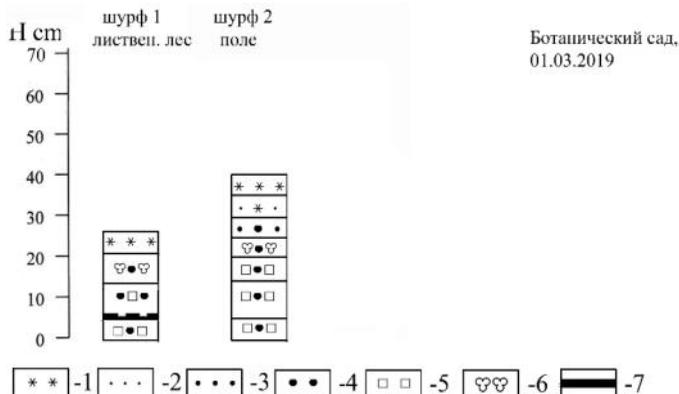


Рис. 10. Наблюдаемый разрез снежного покрова в Ботаническом саду 1 марта 2019 г.

Условные обозначения: 1 – свежевывапавший снег, 2 – мелкозернистый снег (0,1–0,5 мм), 3 – среднезернистый снег (0,5–1 мм), 4 – крупнозернистый снег (1–3,5 мм); 5 – оgranённые кристаллы; 6 – смерзшиеся кристаллы 7 – ледяная корка

При этом водозапас на максимум снегонакопления в снежном покрове по метеоданным на конец февраля составил 156 миллиметров, а по результатам измерений на поле в Битцевском парке и в Ботаническом саду 130 и 115 мм воды. В прошлом зимнем сезоне 2017/18 расчетный водозапас составил 151 мм и при этом в Битцевском и Измайловском лесопарках он также составлял около 150 мм при средней плотности $0,33 \text{ г/см}^3$ и толщине снежного покрова около 45 см, что согласуется. В предыдущий зимний сезон 2016/17 было также много осадков и непрерывное накопление водозапаса снежного покрова без таяния в середине зимы. При этом водозапас на максимум снегонакопления в снежном покрове по нашим наблюдениям, в конце зимы на севере и востоке столицы в 2016/17 год колебался от 106 до 174 мм воды [5–8].

Список литературы

1. Архив погоды [Электронный ресурс]. URL://http://rp5.ru/ (дата обращения: 31.03.2019).
2. Метеосайт Республики Беларусь [Электронный ресурс]. URL: http://www.meteoinfo.by.
3. Гидрометцентр России : офиц. сайт [Электронный ресурс]. URL://https://meteoinfo.ru.
4. Голубев В. Н., Петрушина М. Н., Фролов Д. М. Межгодовые вариации строения снежного покрова на территории России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География № 3. С. 16–25.
5. Литвиненко В. В., Петрушина М. Н., Фролов Д. М. Особенности распределения снежного покрова на территории Московской области зимой 2009/10 года // Материалы X Международного семинара «Геология, геоэкология, эволюционная география», 2010. Санкт-Петербург, 2010. С. 215–218.
6. Литвиненко В. В., Фролов Д. М. Анализ климатических условий и строения снежного покрова в Москве зимой 2016/17 гг. // Индикация состояния окружающей среды: теория, практи-

ка, образование : тр. V Междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 30 нояб. – 3 дек. 2017 г.). М. : Буки-Веди, 2017. С. 166–170.

7. *Литвиненко В. В., Фролов Д. М.* Зимний сезон 2017–2018 гг. в Москве. Динамика и структура снежного покрова // Труды шестой международной научно-практической конференции «Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование», (Москва, 29 ноября – 1 декабря 2018 г. М. : Буки-Веди, 2018. С. 205–209.

8. *Фролов Д. М., Петрушина М. Н., Литвиненко В. В.* Особенности метеорологических условий и строение снежного покрова в геосистемах г. Москвы // Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли: климат и экология Северных территорий и Байкальского региона : материалы I-й Междунар. науч.-практ. конф. (26–29 июня 2017 г., г. Иркутск, п. Хужир, о. Ольхон, оз. Байкал). Иркутск : ИРНТУ, 2017. С. 151–155.

УДК 551.51

Методы и результаты оценки современных региональных изменений климата

В. А. Лобанов (lobanov@EL6309.spb.edu)

С. А. Маммедов (sap9292@mail.ru)

Ж. К. Наурызбаева (naurozbaeva.zhanar@mail.ru)

Фань Сяо Цинь

¹ *Российский государственный гидрометеорологический университет,
г. Санкт-Петербург*

Аннотация. Дается обоснование важности оценки региональных изменений климата. Приводятся методы и модели для выявления и моделирования региональных изменений климата, которые включают в себя формирование региональной базы данных, оценку ее качества и однородности, моделирование временных рядов и оценку эффективности нестационарных моделей, пространственные обобщения показателей нестационарности и оценку будущего климата. Обсуждаются полученные результаты оценок региональных изменений на примере, внутренних областей азиатского континента и региона Каспийского моря.

Ключевые слова: региональные изменения климата, методы, модели, результаты.

Актуальность темы

Современное изменение климата уже не вызывает сомнений и споры ведутся только о преобладании антропогенных или естественных факторов в этих изменениях. Для оценки вкладов факторов и будущих проекций климата в настоящее время разрабатываются и применяются полные трехмерные модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), в которые включаются также химические и биологические блоки, что расширяется эти модели до уровня моделей системы Земля [8]. Вместе с тем имеется много проблем, как при разра-

ботке таких моделей, так и при их применении, как в целом для Земли, так и, особенно, к отдельным ее регионам. Прежде всего, основная проблема в том, что климатическая система – тонкая пленка, третье измерение которой очень мало и распределение энергии по спектру двухмерной жидкости принципиально отличается от распределения в трехмерной и применяемая теория турбулентности Колмогорова по передаче и рассеиванию энергии от крупного масштаба к мелкому не корректна. Фактически энергия крупных вихрей и атмосферных образований генерируется из энергии множества мелких, которые пока не научились считать.

Из-за этой и множества других методологических, теоретических и информационных проблем МОЦАО пока еще не достаточно эффективны и отличаются друг от друга. Аналогичным образом, еще большая неопределенность имеет место и при оценке будущих проекций климата, как показано на рис. 1 из 5-го оценочного доклада МГЭИК [8]. Еще большая неоднозначность и неопределенность имеет место не для глобальной температуры, а для климатических характеристик отдельных регионов Земли. И если для температуры воздуха результаты еще как-то совпадают с данными наблюдений, то для осадков неопределенность очень большая. При переходе на региональный уровень и в отдельные пункты наблюдений несовпадение и неопределенность еще более возрастают. Для моделей климата здесь характерны две особенности:

1) они не могут воспроизводить естественную межгодовую климатическую изменчивость (коэффициенты корреляции между многолетними рядами наблюдений и данными моделирования современного климата на основе исторического эксперимента в проекте СМIP5 очень низкие, статистически незначимые и только в отдельных случаях достигают своих наибольших величин равных всего 0,5–0,6);

2) модели климата ориентированы на сглаженные широтные закономерности и не могут воспроизводить локальные особенности климата (завышение январских температур воздуха в Верхоянске по моделям достигает 18 °С, а на Аравийском полуострове модели занижают фактическую температура до 5–6 °С).

В сложившихся условиях с математическим моделированием климата, актуальным становится развитие методов и моделей региональной климатологии.

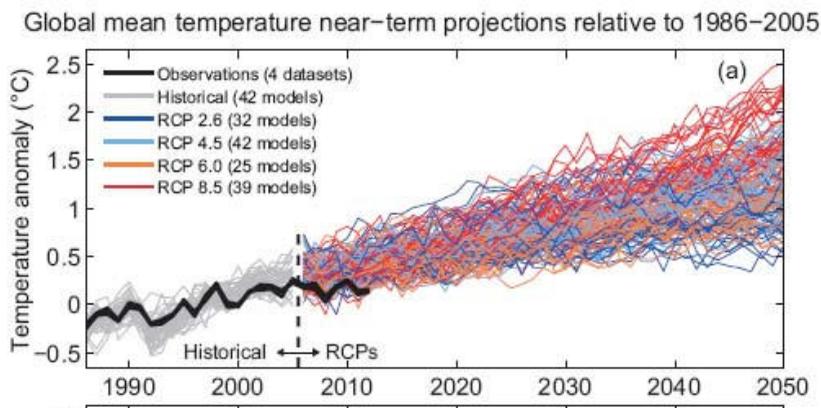


Рис. 1. Неопределенность моделей и сценариев RCP при описании современного и будущего климата [8] (для глобальной температуры в отклонениях от средней за период 1986–2005 гг.)

Задачи, методы и модели

К задачам региональной климатологии можно отнести следующие.

1. Определение параметров климатических характеристик (среднее, СКО), расчетных значений редкой повторяемости и установление их пространственных закономерностей и взаимосвязей.
2. Оценка климатических изменений и их обобщение по территории.
3. Выбор эффективной климатической модели для региона и определение на ее основе сценарных значений климатических характеристик.
4. Оценка проявления изменения климата в климатических индикаторах и установление региональных взаимосвязей между климатическими характеристиками и климатическими индикаторами для оценки их возможных изменений в будущем.

Для реализации поставленных задач разрабатываются следующие, в основном эмпирико-статистические, методы:

- 1) оценки однородности и стационарности параметров временных рядов, восстановления пропусков и приведения к единому многолетнему периоду;
- 2) определения параметров и расчетных климатических характеристик и их обобщения по территории;
- 3) построения и оценки эффективности нестационарных моделей временных рядов, сезонных изменений и полей и обобщения их параметров по территории;

4) выбора наиболее эффективной климатической модели для региона и корректировки проекций климата;

5) оценки проекций климатических индикаторов на основе установленных зависимостей с климатическими характеристиками.

К основным разрабатываемым моделям относятся:

– статистические модели нестационарного среднего для однородных временных рядов;

– статистические модели внутригодовых колебаний и пространственные статистические модели;

– статистические модели декомпозиции разномасштабного процесса;

– регрессионные региональные зависимости между климатическими индикаторами и климатическими характеристиками.

В качестве примера рассмотрим простые статистические модели нестационарного среднего [7]. Для того чтобы ответить на вопрос, если ли климатические или какие-либо иные изменения по временному ряду, можно ограничиться самой простой моделью: случайные колебания + нестационарность среднего значения:

$$Y(t) = \varepsilon_t + Y_{cp}(t), \quad (1)$$

где: $Y(t)$ – изменение климатической характеристики Y во времени t , ε_t – случайная составляющая, $Y_{cp}(t)$ – неслучайная составляющая или функция изменения среднего значения во времени.

Модель типа (1) является простой и предполагает, что колебания процессов межгодовых и десятилетних масштабов являются случайными, а сумма процессов столетнего масштаба (и других масштабов) и антропогенного воздействия проявляется в нестационарности среднего значения во времени.

На уровне рассмотрения простых моделей проявление изменений климата в многолетних временных рядах может быть двух основных видов:

1) монотонные изменения в виде тренда или цикла,

2) ступенчатые изменения, характеризующие переходы от одного стационарного состояния к другому.

Эти два вида климатических изменений отражают разные физические механизмы, действующие в климатической системе Земли. Трендовые или циклические изменения имеют место в слабо инерционной или равновесной системе, которая быстро откликается на внешние воздействия. Механизм ступенчатых изменений или триггерный механизм характеризует неравновесную систему, которая мо-

жет компенсировать внешние воздействия и сопротивляться им до тех пор, пока эти воздействия не превышают порогового значения, после чего система быстро переходит на новый, обычно также квазистационарный, уровень. Стационарный временной ряд может быть частным случаем существования как равновесной, так и неравновесной систем. В первом случае это проявление случайных внешних воздействий, во втором – период стабильного состояния, пока величина внешнего воздействия не превысила критического порога. В данном случае нестационарность, проявляющаяся в виде тренда и в виде цикла, соответствует одной природе – равновесной. Фактически же можно считать, что тренд является частью цикла, так как бесконечных трендов в природе не существует и для нее характерны циклические колебания, что, например, отражено и в теории пульсирующей Вселенной. Ступенчатые изменения также являются проявлением циклических колебаний, но при особой функции циклов – ступенчатой, связанной с другим типом внутренней системы – инерционной.

В случае модели (1) процесс моделирования временных рядов включает три основные стадии:

- расчет параметров моделей;
- оценка эффективности нестационарных моделей по отношению к стационарной;
- оценка статистической значимости нестационарных моделей по отношению к стационарной.

Каждая из приведенных моделей аналитически представляется следующим образом. Прежде всего, базовая стационарная модель характеризуется неизменностью во времени основных параметров ряда (среднего значения и среднего квадратического отклонения), что выражается условиями:

$$Sr(t) = \text{const}, \sigma(t) = \text{const}, \quad (2)$$

где Sr и σ – среднее значение ряда и среднее квадратическое отклонение (СКО), t – время.

Наиболее распространенной при исследовании климатических изменений в настоящее время является модель линейного тренда, которая представляет собой однофакторное регрессионное уравнение климатической характеристики (Y) от времени (t):

$$Y(t) = b_1 t + b_0, \quad (3)$$

где b_1 , b_0 – коэффициенты уравнения регрессии, определяемые методом наименьших квадратов (МНК):

Статистическая значимость модели линейного тренда оценивается по статистической значимости коэффициента b_1 или коэффициента корреляции R зависимости (3), который рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})(t_i - t_{cp})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})^2 \sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2}}. \quad (4)$$

Статистическая значимость R определяется из условия $R \geq R^*$, где R^* – критическое значение коэффициента корреляции, определяемое по таблице при заданном числе степеней свободы (ν) и уровне значимости (α), где $\nu = n - 2$, n – объем ряда, $\alpha = 5\%$.

Еще одним классом модели временного ряда, которая пока еще широко не распространена в климатологии, является модель ступенчатых изменений. Эта модель аналогична двум (или нескольким) стационарным моделям для двух (или нескольких) частей временного ряда, что характеризуется неизменностью во времени среднего значения и среднего квадратического отклонения для каждой части ряда:

$$\begin{aligned} Sr_1(t_1) &= \text{const}1, \sigma_1(t_1) = \text{const}1, \\ Sr_2(t_2) &= \text{const}2, \sigma_2(t_2) = \text{const}2, \end{aligned} \quad (5)$$

где Sr_1, σ_1 – среднее значение и среднее квадратическое отклонение первой части ряда при изменении t_1 от 1 до t_n , Sr_2, σ_2 – среднее значение и среднее квадратическое отклонение второй части ряда при изменении t_2 от $t_n + 1$ до n , n – объем ряда.

Момент ступенчатых изменений (t_n) определяется визуально или на основе дополнительной информации о факторе и дате нарушения стационарности (например, изменение индекса атмосферной циркуляции, даты смены регистрирующих приборов), а также может быть определен итерациями при достижении минимального значения сумм квадратов отклонений двух частей временного ряда:

$$\sigma_1^2(n_1 - 1) + \sigma_2^2(n_2 - 1) = \min, \quad (6)$$

где n_1, n_2 – объемы каждой из двух частей временного ряда.

При этом следует задать минимальный объем первой части ряда, например, $n_1 = 10$ для которого $n_2 = n - n_1$ и затем последовательно увеличивать n_1 до $m = n - 10$ при котором $n_2 = 10$, т. е. $n_1 = 11, 12, \dots, m$. Иначе эту процедуру можно назвать методом расширяющегося окна

Пример модели ступенчатых изменений показан на рис. 2 для ряда сумм осадков за январь на метеостанции Октябрьская (Западная Сибирь), для которого ступенчатые изменения обусловлены сменой регистрирующих приборов.

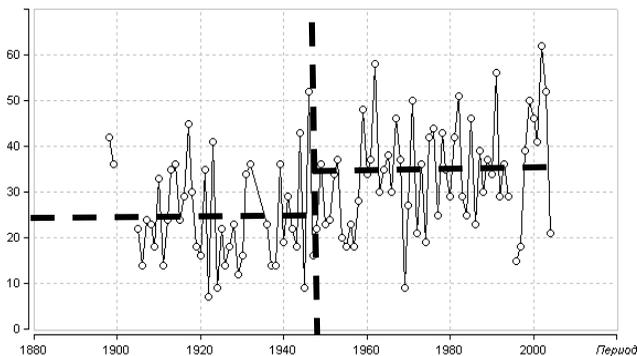


Рис. 2. Многолетний ряд сумм осадков января на метеостанции Октябрьская

Следующим шагом является оценка эффективности нестационарных моделей по отношению к стационарной модели. Наиболее распространенной в регрессионном анализе мерой оценки эффективности любой модели является ее остаточная дисперсия, т. е. та доля исходной вариации, которую не удалось объяснить с помощью модели и чем она меньше и больше отличается от исходной вариации, тем модель лучше.

Обычно среднее квадратическое отклонение или дисперсия остатков сравниваются с аналогичными характеристиками выборки и по этому соотношению определяется какая доля исходного рассеяния не объяснена моделью. Наиболее наглядно это выражено в следующем известном соотношении:

$$\sigma_{\varepsilon}^2 / \sigma_Y^2 = 1 - R^2, \quad (7)$$

где: σ_{ε}^2 , σ_Y^2 – дисперсия остатков и дисперсия выборки (временного ряда) соответственно, R – коэффициент корреляции или R^2 – коэффициент детерминации для построенной модели.

В соотношении (7) по полученному коэффициенту корреляции можно сделать вывод о той части исходного рассеяния, которая не объяснена моделью, т. е. о погрешности модели. Так, если $R = 0,8$, то правая часть (7) будет равна 0,36, т. е. модель не объяснила 36 % исходной вариации, при $R = 0,9$, $\sigma_{\varepsilon}^2 / \sigma_Y^2 = 19 \%$ и т. д.

Для временного ряда базовой или исходной моделью является модель стационарной выборки, т. е. случайных отклонений относительно среднего значения. Тогда стандарт остатков этой модели равен стандартному отклонению временного ряда, т. е. σ_y . Поэтому когда закономерности во временном ряду полностью отсутствуют, он представим в виде постоянного среднего, а необъясненная часть исходного рассеяния равна исходной вариации σ_y .

Для модели линейного тренда стандартное отклонение остатков, вычисляется по формуле:

$$\sigma_\varepsilon = \sigma_y \sqrt{1 - R^2}, \quad (8)$$

где σ_y – стандартное отклонение исходного ряда (модель стационарного среднего); σ_ε – стандартное отклонение остатков относительно модели линейного тренда; R – коэффициент корреляции уравнения линейного тренда (3).

Для модели ступенчатых изменений стандарт остатков вычисляется по информации за два интервала времени по формуле:

$$\sigma_{\text{ступ}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 n_1 + \sigma_2^2 n_2}{(n_1 + n_2 - 1)}} \quad (9)$$

где $\sigma_{\text{ступ}}$ – стандартное отклонение остатков относительно модели ступенчатых изменений; σ_1, σ_2 – стандартные отклонения отрезков временного ряда, на которые разбивается ряд наблюдений по дате ступенчатых изменений; n_1, n_2 – объемы стационарных частей ряда наблюдений в годах.

Для количественной оценки отличий модели тренда, модели ступенчатых изменений и гармонической модели от модели стационарного среднего рассчитываются относительные погрешности или отклонения от стационарной модели по формулам:

$$\Delta_{\text{тр}} = \left(\frac{\sigma_y - \sigma_\varepsilon}{\sigma_y} \right) 100\%, \quad (10)$$

$$\Delta_{\text{ступ}} = \left(\frac{\sigma_y - \sigma_{\text{ступ}}}{\sigma_y} \right) 100\%, \quad (11)$$

где $\Delta_{\text{тр}}$, $\Delta_{\text{ступ}}$ – относительные погрешности или отличия (в %) модели тренда и модели ступенчатых изменений от модели стационарной выборки; $\sigma_{\text{ост}}$ – стандартное отклонение остатков относительно гармонической модели.

В первом приближении можно принять, что любая модель будет эффективнее модели стационарной выборки, если $\Delta \geq 10\%$, т. е. отличие между моделями гарантированной превышает погрешность процесса или погрешность рассматриваемой характеристики.

Следующим шагом является оценка статистической значимости нестационарных моделей по отношению к стационарной. Полученные относительные отклонения моделей $\Delta\%$ от стационарной могут и превышать 10 %, но насколько это отличие является не только достаточным, но и статистически значимым можно установить только на основе статистического критерия. Для этой цели достаточно эффективным является известный критерий Фишера для оценки однородности дисперсий и если дисперсии неоднородны, то данная нестационарная модель статистически значимо отличается от модели стационарной выборки. Статистики критерия Фишера для каждой из двух конкурирующих моделей по отношению к модели стационарной выборки вычисляются по формулам:

$$F_{\text{ТР}} = \frac{\sigma^2_{\text{Y}}}{\sigma^2_{\text{э}}} \quad (12)$$

$$F_{\text{СТУП}} = \frac{\sigma^2_{\text{Y}}}{\sigma^2_{\text{ступ}}} \quad (13)$$

В числителе всегда будет дисперсия исходного ряда наблюдений, так как она является наибольшей или, по крайней мере, равна остаточной дисперсии конкурирующей модели. В случае если расчетное значение статистики Фишера оказывается больше критического, то дисперсии двух моделей имеют статистически значимое различие и соответствующая модель (тренда, гармоническая или ступенчатых изменений) статистически эффективнее, чем модель стационарной выборки.

Результаты оценки региональных изменений климата

1. Территория Центральной Азии

Для исследования была выбрана 61 метеостанция с продолжительными наблюдениями за среднемесячной температурой воздуха на территории Туркменистана, Ирана и Узбекистана. Географически этот

регион можно обозначить как Центральная Азия. Для оценки современного изменения климата была сформирована региональная база данных среднемесячных температур воздуха за весь период наблюдений по данным архива Метеорологического королевского института Нидерландов. Многолетние ряды имели разную продолжительность наблюдений от 34–36 лет на некоторых метеостанциях на территории Ирана до 124–136 лет на метеостанциях Байрам-Али, Фергана, Ташкент (Туркменистан, Узбекистан).

Для выявления долгопериодных изменений климата рассматривалась эффективность моделей нестационарного среднего двух видов: линейного тренда и ступенчатых изменений по отношению к базовой стационарной модели. В работах [1–5] было установлено, что модель ступенчатых изменений среднего значения является более эффективной, чем модель линейного тренда и такие переходы от одного стационарного режима к другому обусловлены сменой типов атмосферной циркуляции [6].

Как следует из приведенных на рис. 3 графиков наиболее продолжительных наблюдений, ступенчатые изменения средних значений характерны и для территории Центральной Азии.

При этом имеют место два стационарных периода: с начала наблюдений с самым ранним годом – 1878-м по начало – середину 1970-х и следующий стационарный период по настоящее время с более высокими средними значениями температур. При этом даже предварительный визуальный анализ свидетельствует, что модель ступенчатых изменений средних значений больше соответствует структуре ряда, чем модель тренда, хотя и она также может быть статистически значимой.

В результате приведения к многолетнему периоду продолжительность большинства рядов составила 120–130 лет и можно оценить средний вклад нестационарных моделей (Δ , %) в разные периоды времени. Для этой цели задавались разные начала временных рядов: с 1900, с 1920, с 1940 и с 1960 г. по один и тот же год окончания наблюдений – 2016-й. Такая процедура позволяет оценить устойчивость показателей нестационарности во времени. Отдельно был задан вариант временных рядов с начала наблюдений только по 1960 г. для того, чтобы оценить имела ли место нестационарность в предыдущий период времени до резкого подъема глобальной температуры во второй половине XX в. Результаты расчета средних для всех рядов показателей нестационарности для модели ступенчатых изменений приведены в табл. 1 в виде процента нестационарных рядов (при $\Delta \geq 10\%$) по от-

ношению к общему числу рассматриваемых рядов за каждый интервал времени. При этом, красным цветом выделены ситуации, когда процент нестационарных рядов растет при изменении начала наблюдений от прошлого к настоящему.

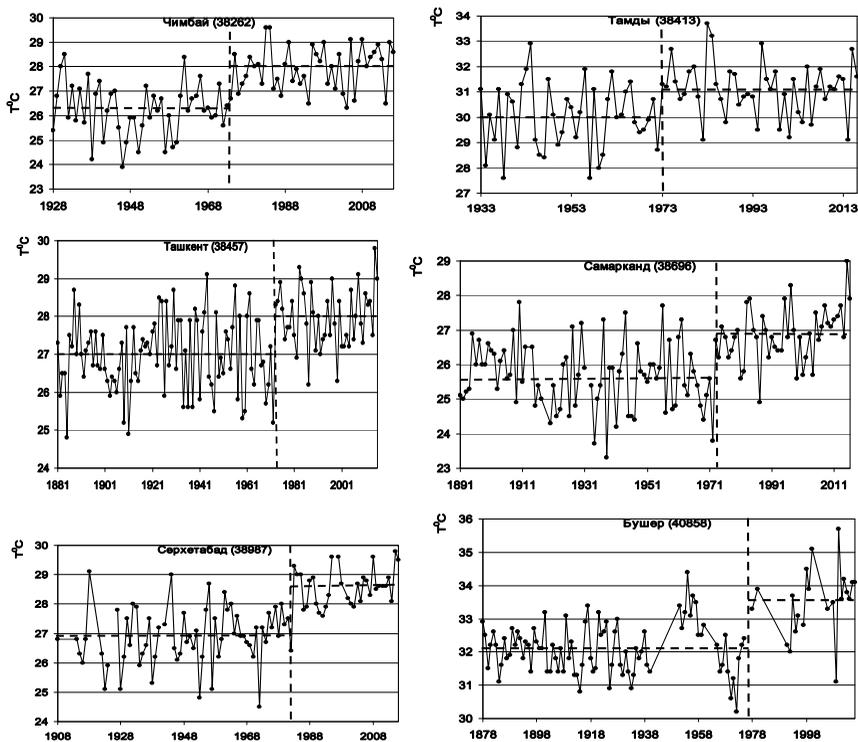


Рис. 3. Примеры многолетних рядов среднемесячных температур июля и их представление в виде модели ступенчатого изменения средних

Из анализа результатов табл. 1 можно получить следующие выводы:

1) число нестационарных моделей за холодный период с ноября по февраль мало и практически не зависит от заданной даты начала наблюдений;

2) в месяцы теплого периода года процент нестационарных рядов, как правило, увеличивается при смещении заданной даты начала наблюдений из прошлого к настоящему и достигает максимума при 1960-м начальном годе наблюдений, что свидетельствует о том, что наибольшие изменения произошли во второй половине XX в.;

3) процент нестационарных моделей достигает 70–80 % в месяцы с мая по сентябрь при рассмотрении отрезка временного ряда с 1960 г., т. е. нестационарность в теплые месяцы года имеет место для большинства рядов;

4) есть месяцы, в которые процент нестационарных рядов постепенно и существенно увеличивается при смещении даты начала наблюдений к настоящему времени (апрель, май, июнь, июль), а в другие месяцы число нестационарных рядов практически не зависит от начальной даты (август, сентябрь);

5) для периода наблюдений до 1960 г. число нестационарных моделей очень мало и в теплые месяцы года (максимум до 18–22 % в августе и сентябре), что подтверждает вывод о проявлении нестационарности средних значений температур только во второй половине – последней трети XX в.

Таблица 1

Число рядов с нестационарными моделями ступенчатых изменений в % от общего числа рядов при разном начальном годе наблюдений

Месяц	Начало рядов наблюдений				
	с 1900 г.	с 1920 г.	с 1940 г.	с 1960 г.	до 1960 г.
Январь	0	11,6	2	4,9	0
Февраль	1,7	0	0	4,9	5,1
Март	8,5	37,3	50,8	77	3,4
Апрель	30,8	38,5	42,3	45,9	3,8
Май	32,8	50,9	50,8	73,8	6,7
Июнь	59,5	60	71,7	72,1	13,6
Июль	50	39,5	45,5	65,6	4,7
Август	71,2	69,4	80	80,3	22,2
Сентябрь	74,4	75,5	77,6	77,1	18,4
Октябрь	36,4	36,4	42,6	63,9	10,6
Ноябрь	7,5	17,9	19	9,8	7,1
Декабрь	0	7,8	14,8	3,3	5,6

2. Территория Каспийского моря

Проведен фоновый анализ климатических изменений температур воздуха холодного периода года с привлечением данных по 29 метеостанциям, представленных в окрестностях Каспийского моря. Применены аппроксимации двумя моделями нестационарного среднего для многолетних рядов с 1936-м начальным годом, т. е. рассматривались климатические изменения за последние 80 лет. Результаты показывают, что практически для всех рядов статистически значимы коэффициенты корреляции линейного тренда (21 ряд из 28), за исключением

северо-кавказских метеостанций, находящихся к востоку от Каспийского моря (Ставрополь, Пятигорск, Минеральные воды, Буденовск, Дербент, Махачкала), в которых зимы не устойчивы. Кроме того, во всех случаях эти коэффициенты отрицательны, что свидетельствует о падении сумм отрицательных температур и потеплении зим.

Для температур самого нестационарного месяца – марта модель ступенчатых изменений эффективна в 23 случаях (82 %), а модель линейного тренда в 13 случаях (46 %) из 28, что подтверждает полученный ранее вывод о том, что нестационарность проявляется в виде ступенчатых переходов от одних стационарных условий к другим. Также получено, что год ступенчатых изменений группируется в виде двух дат: 1988 (89) г. и 1999 г. (1997–2000 гг.). Метеостанции с 1988 г. ступенчатого роста температур марта расположены в западной части рассматриваемой территории, а с 1999 г. ступенчатого перехода – в восточной части и линия раздела идет по метеостанциям (с юго-запада на северо-восток): Махачкала, Кызан, Пешной, Махамбет и Карабау.

По полученным годам ступенчатого подъема температур (1988 и 1999 г.) было осуществлено разделение временных рядов на две подвыборки, для каждой из которых рассчитаны средние и определена их разность (ΔT). При оценке по критерию Стьюдента во всех случаях получен вывод о нестационарности средних значений температур за два полупериода при уровне значимости $\alpha = 1\%$. Результаты картирования ΔT представлены на рис.4. где также проведена линия, разделяющая территорию на подрайоны с двумя разными датами ступенчатого роста температур.

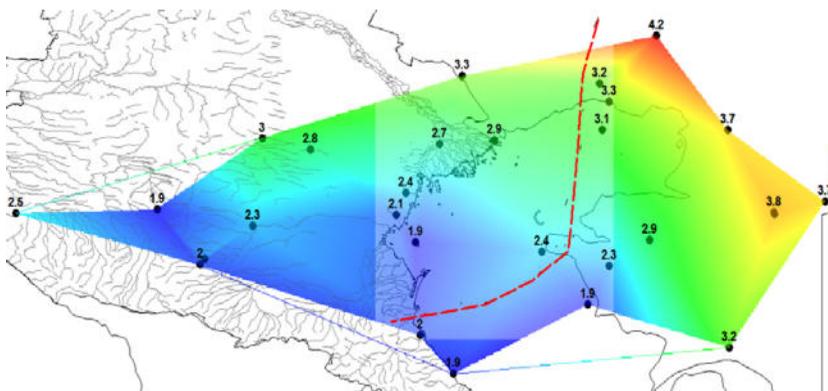


Рис. 4. Прирост средних многолетних температур марта (ΔT), в °C (красная пунктирная линия – граница районов с разными датами ступенчатого роста температур)

Выводы

Многочисленные региональные исследования [1–7] свидетельствуют, что нестационарность присутствует в большинстве многолетних рядов температур воздуха. В основном она проявляется в весенние месяцы: март – апрель, что и приводит к более значимой нестационарности в среднегодовых температурах воздуха, являющейся своеобразным «фильтром» в выделении нестационарного «сигнала» при осреднении. Из класса нестационарных моделей наиболее эффективными являются модели ступенчатых изменений по сравнению с моделями тренда. Как правило, ступенчатый рост температуры приходится на конец 1980-х гг., что связано с изменением атмосферной циркуляции и в Северном полушарии (его восточная часть) – со ступенчатым увеличением индекса Северо-Атлантического колебания и усилением западного переноса.

Список литературы

- 1 Анисимов О. А., Лобанов В. А., Ренева С. А. Анализ изменений температуры воздуха на территории России и эмпирический прогноз на первую четверть XXI в. // *Метеорология и гидрология*. 2007. № 11. С. 90–101.
- 2 Лобанов В. А., Шадурский А. Е. Применение эмпирико-статистических методов для моделирования и анализа климатических изменений // *Учен. зап. РГГМУ*. 2010. № 14. С. 73–88.
- 3 Лобанов В. А., Шадурский А. Е. Выделение зон климатического риска на территории России при современном изменении климата : монография. СПб. : Изд. РГГМУ, 2013. 123 с.
- 4 Лобанов В. А., Шукри О. А. Оценка климатических изменений температуры воздуха и осадков на Аравийском полуострове // *Учен. зап. РГГМУ*. № 37. С. 72–83.
- 5 Кириллина К. С., Лобанов В. А. Оценка современных климатических изменений температуры воздуха на территории республики Саха (Якутия) // *Учен. зап. РГГМУ*. 2015. № 38. С. 137–151.
- 6 Лобанов В. А., Тоцакова Г. Г. Особенности и причины современных климатических изменений в России // *Геогр. вестн. Перм. ун-та*. 2016. № 3(38). С. 79–89.
- 7 Лобанов В. А. Лекции по климатологии. Ч. 2: Динамика климата. СПб. : Изд-во РГГМУ, 2016. Кн. 1. 332 с.
- 8 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change). The physical science basis. In Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda M. B. Tignor, Simon K. Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, Pauline M. Midgley (eds). Cambridge University Press : Cambridge, 2013. P. 1552.

УДК 551.51

Основные климатические характеристики и ледовый режим Каспийского моря

Ж. К. Наурозбаева (naurozbaeva.zhanar@mail.ru)

В. А. Лобанов (lobanov@EL6309.spb.edu)

МКОА РГГМУ, г. Санкт-Петербург

Аннотация. В статье проведен анализ основных климатических параметров Прикаспийского региона, а также характеристик ледового режима на акватории моря. В ходе исследования были привлечены данные 29 гидрометеорологических станций Казахстана и Российской Федерации. Собрана единая база данных, восстановлены пропуски, проведен анализ корреляционной зависимости между среднесуточной температурой воздуха, суммой отрицательных температур и суточной толщиной льда, проанализирован временной ход ледового периода, его продолжительность, изменения основных дат ледового режима. В результате были получены выводы о сокращении продолжительности ледового периода, корреляционной зависимости температур и толщины льда при нарастании льда.

Ключевые слова: Каспийское море, изменение климата, ледовый режим, среднемесячные температуры воздуха, максимальная толщина льда.

Введение

Каспийское море является внутренним морем с ледовым покровом в холодный период времени года. На сегодняшний день его разделяют пять государств. Первые стационарные гидрометеорологические наблюдения на Каспийском море были выполнены еще в XVIII в. военным врачом И. Лерхе, который в 1732 г. провел их в Астрахани, Баку, Дербенте, Низовой Пристани и в устье р. Сулак. Затем были открыты и метеорологические станции (1827–1830 гг.). С 1856 по 1867 г. на Каспийском море работала гидрографическая экспедиция под руководством Н. А. Ивашинцева. По материалам этой экспедиции были составлены подробные высокоточные навигационные карты моря, выполнена промеры в открытых районах и составлена первая батиметрическая карта. В 1904 г. по инициативе и на средства Общества рыболовства и рыбоводства и Департамента земледелия при содействии Русского географического общества на Каспии более трех месяцев работала экспедиция по исследованию сельдяного промысла, которой руководил Н. М. Книпович. В нынешнее время изучение моря продолжают ученые России [1–3; 5], Казахстана [7–9], Ирана, Азербайджана, Туркменистана и других стран. Интерес проявляют и европейские ученые и ученые Турции, Афганистана, Таджикистана и др.,

так как море является уникальным, с неповторимой флорой и фауной [5; 10].

Цель работы и исходные материалы

Целью работы является: проанализировать климатические изменения в Прикаспийском регионе, корреляционную зависимость между температурой воздуха и толщиной льда, провести анализ данных по продолжительности ледового режима.

Для достижения поставленных целей были привлечены данные гидрометеорологических станций России и Казахстана. По ледовой информации использовались данные только прибрежных станций и станций непосредственно на акватории моря: Атырау, Пешной, о. Кулалы, Форт-Шевченко, о. Тюлений, о. Искусственный, Лагань, и в одной гидрометеорологической станции в г. Астрахань с данными по ледовому режиму в устье р. Волги.

Схема пунктов наблюдений за ледовым режимом на Северном Каспии и за климатическими характеристиками на ближайших метеостанциях приведена на рис. 1, а информация по продолжительности наблюдений – в табл. 1.

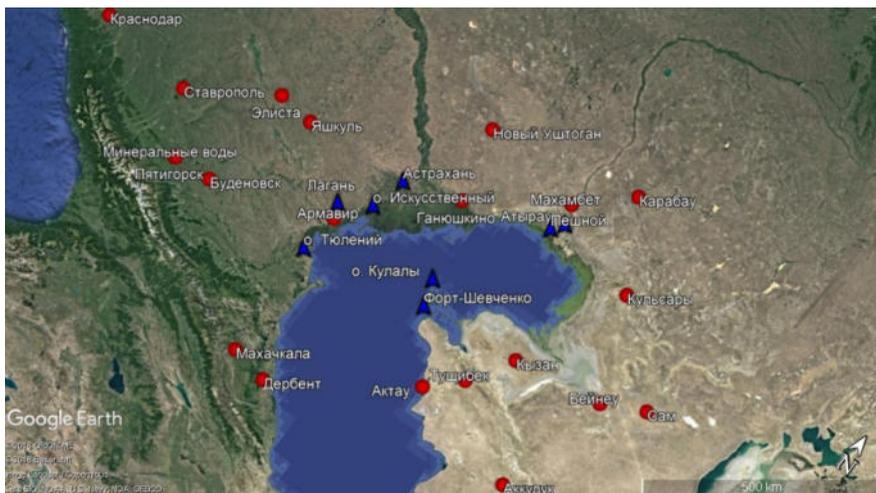


Рис. 1. Расположение гидрометеорологических станций и постов (синие треугольники – наблюдение за толщиной льда и температурой воздуха, красные кружки – только наблюдения за температурой воздуха)

Таблица 1

 Характеристики рядов наблюдений за максимальной толщиной льда
и среднемесячной температурой воздуха

№	Индекс	Наименование станции	Температура воздуха		Толщина льда	
			Период наблюдений	Количество лет	Период наблюдений	Количество лет
1	97048	Пешной	1940–2016	75	1929–2016	67
2	34880	Астрахань	1936–2016	81	1946–2015	57
3	35700	Атырау	1895–2016	119	1944–2015	69
4	37089	о. Тюлений	1959–2016	58	1941–2014	48
5	97039	Лагань	1959–2016	58	1952–2015	19
6	97040	о. Искусственный			1941–2012	49
7	97059	Кулавы, остров	1936–2016	79	1941–2015	54
8	97060	Форт–Шевченко	1882–2016	133	1955–2013	37
9	34691	Новый Уштоган	1951–2016	66	—	—
10	34798	Ганюшкино	1933–2016	83	—	—
11	35514	Карабау	1947–2016	70	—	—
12	35605	Махамбет	1970–2016	47	—	—
13	35715	Кульсары, АМСГ	1968–2016	49	—	—
14	35925	Сам	1947–2016	70	—	—
15	35927	Бейнеу	1949–2016	68	—	—
16	38002	Кызан	1955–2016	62	—	—
17	38008	Тушибек	1955–2016	62	—	—
18	38232	Аккудук	1949–2016	68	—	—
19	97061	Актау	1960–2016	57	—	—
20	34861	Элиста	1936–2016	81	—	—
21	34866	Яшкуль	1933–2016	82	—	—
22	34927	Краснодар	1936–2016	80	—	—
23	34949	Ставрополь	1936–2016	81	—	—
24	37031	Армавир	1932–2016	85	—	—
25	37050	Пятигорск	1891–1997	107	—	—
26	37054	Минеральные воды	1938–2016	79	—	—
27	37061	Буденовск	1940–2016	73	—	—
28	37470	Дербент	1930–2016	87	—	—
29	37472	Махачкала	1882–2016	122	—	—

В результате были сформированы две региональные базы многолетних рядов: максимальных толщин льда по 8 пунктам (4 на территории России и 4 на территории Казахстана) и база данных среднемесячных температур воздуха с октября по март по 28 пунктам наблюдений (13 в России и 15 в Казахстане).

В связи с тем, что ряды имели пропуски наблюдений, было осуществлено восстановление пропусков и приведение к многолетнему

периоду по уравнениям связи с рядами в пунктах-аналогах на основе известной методики [6; 15]. При этом для толщин льда минимальное значение коэффициента корреляции задавалось $R_{\min} = 0,7$, так как они были достаточно слабо связаны по территории, а для среднемесячных температур воздуха $R_{\min} = 0,85$. Следует отметить, что в рядах максимальных толщин льда отсутствие данных имело место и по естественным причинам: льда не наблюдалось или лед был недостаточной толщины для проведения измерений и в эти годы восстановление данных не проводилось.

В результате приведения к многолетнему периоду и восстановления пропусков удалось получить практически непрерывные ряды максимальных толщин льда с 1940–1950-х гг. по 2015–2016 гг. В среднем продолжительность рядов увеличилась на 12 лет, хотя в российском секторе на северо-западе Каспия связанность данных была выше и продолжительность увеличилась на 23 года, тогда как в казахстанском секторе — в среднем всего на 1,5 года (от 0 до 3 лет). Ряды наблюдений за температурой воздуха были изначально и более продолжительными и лучше связаны по пространству поэтому их рассматриваемый период составил от 80 до 132 лет в зависимости от месяца и пункта наблюдений с датой окончания 2016–2018 гг.

Зависимости между температурой воздуха, суммой отрицательных температур и толщиной льда

Первоначально для определения зависимостей были проведены статистические расчеты и анализ данных по температуре воздуха по всем станциям, рассчитаны суммы отрицательных температур за весь холодный период. Для того чтобы посмотреть зависимость между данными параметрами и толщиной льда, была выбрана станция Пешной (как наиболее репрезентативная и имеющая продолжительный ряд ежедневных наблюдений за нарастанием льда и его уменьшением).

Рассмотрены ледовые периоды с 2007 по 2017 г. Ледовый период взят от даты установления устойчивого ледового покрытия до даты прекращения измерения толщины льда. Входными параметрами были: толщина льда, см; температура воздуха, °С; сумма отрицательных температур за холодный период (октябрь-март), абсолютные значения.

Расчеты проводились для всего периода наблюдения, для периода нарастания льда и уменьшения толщины ледового покрова (табл. 2). В дополнение были проведены те же расчеты, но с одним входным параметром – суммой отрицательных температур.

Результаты расчетов за весь период: вклад суммы более значимый, чем самой температуры воздуха. Коэффициент корреляции был за некоторые годы незначительным. Следует учесть момент что, к концу ледового периода, когда среднесуточная температура воздуха возрастает, а лед еще не тает или толщина уменьшается медленно – расчеты могут быть недостаточно удовлетворительными (табл.3).

Таблица 2

Результаты расчета ледового периода

Годы	b_1	Вклад $ \Sigma T $	b_2	Вклад T	b_0	R^2	R	n
2007–2008	-0,068712	99,9	0,85845	0,1	15,034	0,97	0,98	77
2008–2009	-0,053548	64	0,17817	36	17,7831	0,09	0,30	81
2009–2010	-0,032537	97	0,21202	3	12,7691	0,92	0,96	94
2010–2011	-0,017505	88,56	0,08122	11,44	24,9664	0,86	0,93	28
2011–2012	-0,042255	99,4	0,15545	0,6	13,3294	0,98	0,99	111
2012–2013	-0,02912	98,7	0,10533	1,3	18,5422	0,42	0,65	85
2013–2014	-0,11099	99,9	-0,1638	0,003	9,10601	0,95	0,97	26
2014–2015	-0,038688	99,5	0,92565	0,48	12,0013	0,9	0,95	109
2015–2016	-0,096039	86,4	-0,0358	13,4	16,3045	0,13	0,36	56
2016–2017	-0,029472	99,9	-0,2205	0,05	9,65895	0,84	0,92	103

Годы	b_1	Вклад $ \Sigma T $	b_0	R^2	R	n
2007–2008	-0,05084	100	20,4737	0,7	0,84	77
2008–2009	-0,0091435	100	20,1381	0,32	0,57	81
2009–2010	-0,028758	100	14,7183	0,79	0,89	94
2010–2011	-0,012877	100	24,6058	0,77	0,88	28
2011–2012	-0,042534	100	12,0067	0,97	0,98	111
2012–2013	-0,03298	100	16,9973	0,41	0,64	85
2013–2014	-0,1112	100	9,14275	0,96	0,98	26
2014–2015	-0,038797	100	11,5373	0,89	0,94	109
2015–2016	-0,031958	100	10,4159	0,17	0,41	56
2016–2017	-0,029505	100	9,75798	0,84	0,92	103

b_1 – сумма отрицательных температур, b_2 – температура воздуха, b_0 – остаток, R – коэффициент корреляции, n – продолжительностей ледового периода в днях.

Таблица 3

Результаты расчета нарастания ледового покрова

Годы	b_1	Вклад $ \Sigma T $	b_2	Вклад T	b_0	R^2	R	n
2007–2008	-0,068712	99,9	0,85845	0,1	15,034	0,97	0,98	53
2008–2009	-0,013657	94	0,98728	6	16,9779	0,39	0,62	53
2009–2010	-0,032537	97	0,21202	3	12,7691	0,92	0,96	85
2010–2011	-0,017505	88,56	0,081223	11,44	24,9664	0,86	0,93	28
2011–2012	-0,043362	98,8	0,21145	1,1	13,5392	0,98	0,99	102
2012–2013	-0,028606	91,7	0,34849	8,3	20,605	0,68	0,82	79
2013–2014	-0,011151	99,9	0,1203	0,1	9,10834	0,93	0,96	21
2014–2015	-0,040109	99	0,13815	8,8	12,0025	0,9	0,95	102
2015–2016	-0,051064	95,9	0,087937	4,1	8,97304	0,72	0,85	52
2016–2017	-0,030885	99,9	0,22041	0,05	9,70021	0,91	0,95	96

Годы	b_1	Вклад $ \Sigma T $	b_0	R^2	R	n
2007–2008	-0,0675	100	16,5429	0,97	0,98	53
2008–2009	-0,0114	100	18,2442	0,37	0,61	53
2009–2010	-0,0325	100	14,1752	0,89	0,94	85
2010–2011	-0,0129	100	24,6058	0,77	0,88	28
2011–2012	-0,0429	100	11,9322	0,97	0,98	102
2012–2013	-0,0404	100	15,6703	0,62	0,79	79
2013–2014	-0,0113	100	9,12017	0,93	0,96	21
2014–2015	-0,0396	100	11,4158	0,89	0,94	102
2015–2016	-0,0593	100	15,6849	0,39	0,62	52
2016–2017	-0,0307	100	9,61512	0,91	0,95	96

b_1 – сумма отрицательных температур, b_2 – температура воздуха, b_0 – остаток, R – коэффициент корреляции, n – продолжительностей ледового периода в днях.

Результаты расчетов за период нарастания льда получились более значимыми. Холодный период 2008–2009 гг. отличился в обоих случаях. Толщина льда варьировала от 12 до 23 см, продолжительность 81 день. Согласно классификации зим (Бухарицин П. И. по градусодней) – зима была теплой [5].

Таблица 4

Результаты расчета уменьшения ледового покрова

Годы	b_1	Вклад $ \Sigma T $	b_0	R^2	R	n
2007–2008	-0,55028	100	-302,224	0,94	0,97	24
2011–2012	-0,226	100	-146,458	0,84	0,92	10

b_1 – сумма отрицательных температур, b_0 – остаток, R – коэффициент корреляции, n – продолжительностей ледового периода в днях.

Из-за отсутствия данных по уменьшения толщины льда, были выявлены только два зимних периода, когда наблюдалось более продолжительное время уменьшения толщины льда. Результаты проведенных расчетов не дали хороших значений. Наиболее лучшим методом будет рассмотрение нарастание льда.

Типизация зим

На следующем этапе исследования была проведена типизация зим. Как известно, для низовьев Волги и Северного Каспия разработано несколько вариантов классификации зим по степени их суровости. Для этого использовались различные характеристики: площадь ледяного покрова; толщина или объем льда; сумма градусо-дней мороза, как по всей акватории, так и по одному пункту, признанному характерным (показательным) для всей акватории. Наиболее объективной и доступной, в плане получения оперативной информации, является классификация П. И. Бухарицина, где в качестве суровости зим, используется сумма градусо-дней мороза (табл. 5) [5; 7].

Таблица 5

Классификация П. И. Бухарицина

Очень суровая зима	Суровая зима	Умеренная зима	Мягкая зима	Очень мягкая зима
> 900	900–700	700–400	400–100	< 100

Согласно данным 29 станций, была посчитана сумма отрицательных температур. На графике (рис. 2) приведены для примера станции Астрахань и Пешной, как характерные для северо-западной и северо-восточной части акватории моря.

По всем исследуемым станциям наблюдается уменьшение повторяемости суровых и очень суровых зим, увеличение повторяемости мягких зим в последние десятилетия.

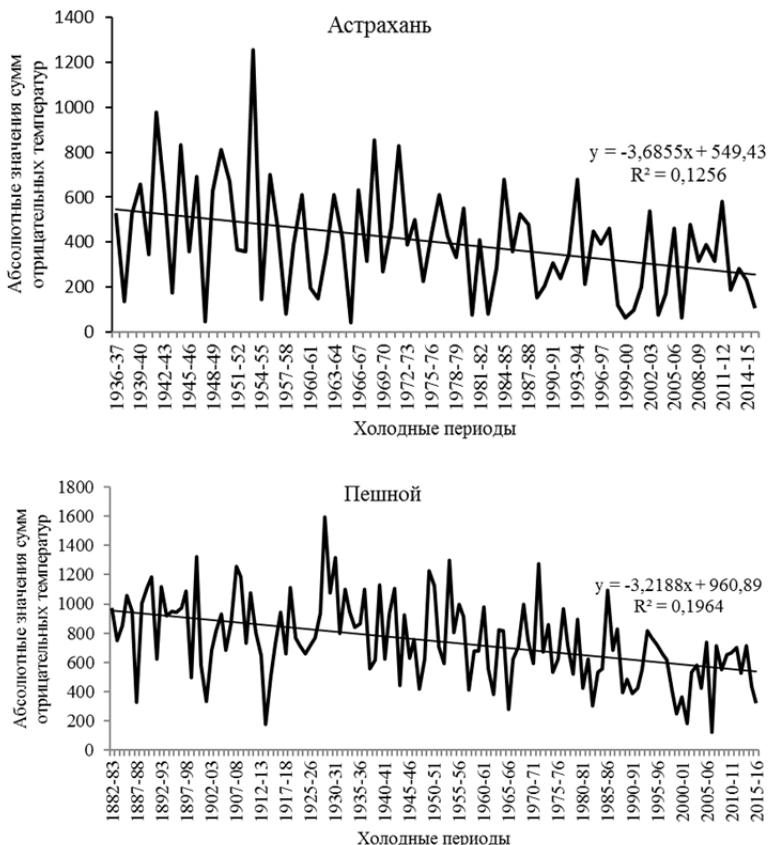


Рис. 2. Временной ход абсолютных значений сумм отрицательных температур на МС Астрахань и М Пешной

Продолжительность ледового периода

Период начала ледообразования на Каспийском море определяется атмосферными процессами в предзимье, обусловленных сезонной перестройкой барических полей на высотах и у поверхности земли, и в некоторой степени, от притока тепла из средней части моря. Раннее ледообразование происходит, когда над Западной Сибирью находится глубокий высотный циклон с ориентированной ложбиной на запад Казахстана и Малую Азию. Наличие ложбины, ориентированной с северных районов Атлантики на Англию и Италию, обуславливает вынос теплого воздуха с южных районов Средиземного моря на север

Скандинавии по западной периферии гребня. В тыл другой, более глубокой ложбины, ориентированной с Таймыра на запад Казахстана и Малую Азию, холодный воздух устремляется с северо-востока на юго-запад.

Распространение на Каспий холодных арктических воздушных масс (АВМ) сопровождается усилением северных ветров и резким понижением температуры воздуха до $-5^{\circ}\text{C} \dots 7^{\circ}\text{C}$. В случае сохранения морозов через 1–2 дня лед образуется на мелководьях обычно в середине или в первой декаде ноября. Процесс ледообразования в большинстве случаев начинается с северо-восточной части моря, иногда с северо-западной или вдоль всего северного побережья одновременно. Необходимо отметить, что особо опасно раннее появление льда в годы с ранним и резким похолоданием (во второй половине октября), когда при штилевой погоде, на поверхности воды образуется тонкий прозрачный молодой лед-резун, толщиной 5–7 см. Подобное раннее появление льда-резуна было отмечено на М Пешной 17 октября 1976 г. Вероятность ледообразования в Северном Каспии во второй декаде октября составляет менее 7%, а в третьей декаде – 10–22%. Лед раннего ледообразования в виде сала и заберегов неустойчив и с наступлением потепления, подвергаясь тепловым и динамическим воздействиям (ветер, волнение), быстро разрушается. В случае мощных затоков холодного арктического воздуха на акваторию моря и распространения его к югу возможно интенсивное охлаждение водных масс до температуры замерзания в закрытых мелководных бухтах и заливах восточного побережья Среднего Каспия.

В годы, когда ледообразование начинается в сроки, близкие к норме глубокий циклон располагается над Средним Уралом (севернее 55° с. ш.), ложбина его ориентирована на Нижнюю Волгу. Высотный гребень над Западной Европой направлен с запада Средиземного моря на Данию и Исландию. При таком барическом поле обеспечивается достаточно сильный перенос холодного воздуха со Скандинавии через центральные районы европейской части России на Нижнюю Волгу. В случае вторжения АВМ со Скандинавии очаги холода стационарируют в северо-западной части моря. Ледообразование, начинающееся на взморье Волги, к концу октября распространяется на северо-восточные мелководные акватории [1; 2; 4; 8; 9].

Таблица 6

Сроки ледообразования в период 1981–2016 гг.

Акватория	Первый лёд				Устойчивое ледообразование			
	ранняя		поздняя		ранняя		поздняя	
	дата	год	дата	год	дата	год	дата	год
Северный Каспий	М Пешной							
	6.11	1988	14.12	1989	14.11	1993	30.12	2015
	МГ Кулалы, остров							
	14.11	1993	25.02	2007	1.12	1993	08.02	2005
Средний Каспий	МГ Форт-Шевченко							
	3.12	1993	6.03	1983	8.12	1993	17.02	1993
	МГ Актау							
	28.11	1993	15.02	1984	Не наблюдалось			

Сильному ночному выхолаживанию воды на мелководье, сопровождаемому кратковременным образованием начальных видов льда (ледяные иглы, сало), способствует установление ясной погоды со слабым ветром при температуре воды, близкой к «точке замерзания» [4].

По данным табл. 6 можно заметить, что раннее появление ледовых явлений отмечались в период конец 80-х и начало 90-х гг. Поздние даты также в этот период, за исключением 2007 г. на острове Кулалы. Устойчивое ледообразование – ранние даты в 1993 г. Поздние сместились на начало 2000-х. По Пешному поздняя дата ранее было 22 декабря 1988 г., затем сместилась на 30 декабря 2015 г.

Климатические изменения оценивались по эффективности двух моделей нестационарного среднего (линейный тренд и ступенчатые изменения среднего значения при переходе от одного стационарного периода к другому) по отношению к модели стационарной выборки. В качестве показателя эффективности нестационарной модели (Δ) принята относительная разность стандартных отклонений остатков модели стационарной выборки (σ_0) и нестационарной модели ($\sigma_{\text{нест}}$) в %:

$$\Delta = (\sigma_0 - \sigma_{\text{нест}}) / \sigma_0 \cdot 100 \% \quad (1)$$

Результаты оценки наличия нестационарности средних значений в виде показателей эффективности для модели линейного тренда ($\Delta_{\text{тр}}$) и ступенчатых изменений ($\Delta_{\text{ст}}$) приведены в табл.7 для наблюдаемых данных и для рядов, приведенных к многолетнему периоду. В табл. 7 даны также коэффициенты корреляции модели линейного тренда (R), объемы рядов (n) и год ступенчатых изменений среднего ($T_{\text{см}}$) и жир-

ным шрифтом отмечены ситуации $\Delta > 10\%$ и статистически значимых R при уровне значимости $\alpha = 5\%$ [11–14].

Таблица 7

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей максимальных толщин льда

Код	Данные наблюдений				
	$\Delta_{пр}$	$\Delta_{ст}$	$T_{ст}$	R	n
Дата появления первого льда	2,3	8,4	1999	0,22	35
Дата установления устойчивого льда	9,8	7,7	2005	0,43	35
Дата полного очищения ото льда	2,5	8,9	1998	-0,22	35

Для совместного анализа результатов моделирования и их графического представления были построены графики многолетних колебаний с разделением на периоды квазистационарных средних значений по $T_{ст}$, которые приведены на рис. 2.

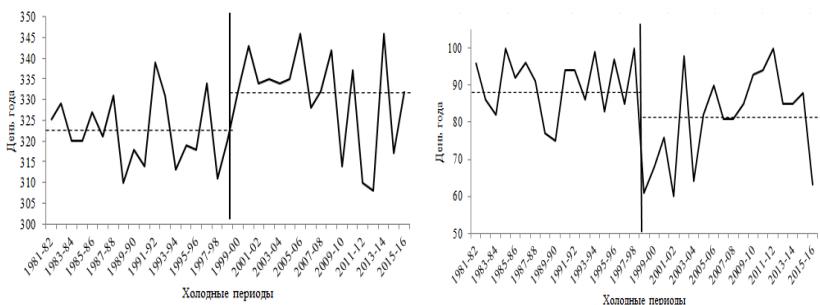


Рис. 3. Многолетние ряды дат появления первых ледовых явлений и полного очищения моря ото льда и их аппроксимация стационарными и нестационарными средними

Так согласно, расчетам модели, наблюдается смещение основных дат ледового режима. Ступенчатое изменение отмечено в период 1998–1999 гг., если в период с 1981 по 1999 г. первые ледовые явления в среднем появлялись 19 ноября, то в период с 2000 по 2016 г. – уже 27 ноября. Устойчивое покрытие льдом также сместилось с 3 декабря к 14 декабря. Очищение моря ото льда происходит раньше. Смещение составило 7 дней: с 30 марта до 23 марта. В последние годы отмечается сокращение ледового периода как в Северном Каспии, так и в Среднем. Даже в отдельные последние годы в районе Среднего Каспия становление устойчивого ледового периода не отмечается. Наблюдается дрейф льда, принесенного с северных регионов. Дрейф

льда как правило начинается в период разрушения мощного ледового покрова северной части акватории моря.

Заключение

Из проведенной исследовательской работы можно сделать следующие основные выводы:

- 1) наблюдается уменьшение сумм отрицательных температур, соответственно, увеличивается повторяемость умеренных и мягких зим в последние десятилетия;
- 2) наиболее значимый вклад при нарастании льда вносит сумма отрицательных температур;
- 3) в последние годы отмечается сокращение ледового периода как в Северном Каспии, так и в Среднем. Даже в отдельные последние годы в районе Среднего Каспия становление устойчивого ледового периода не отмечается;
- 4) наблюдается смещение основных дат ледового режима.

Список литературы

- 1 Бухарицин П. И. Характерные особенности ледовых процессов в мелководной северной части Каспийского моря ISBN 978-5-9908460-0-5 // Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования : материалы молодеж. науч. конф. (г. Севастополь, 25–29 апр. 2016 г.). Севастополь : ФГБУН МГИ, 2016. С. 13–20. URL: http://mhi-ras.ru/news/news_201605201055.html.
- 2 Бухарицин П. И. Обледенение на Каспийском море // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. 2007. № 6(41). С. 154–156.
- 3 Бухарицин П. И. Особенности ледового режима и методы прогноза ледовых условий северной части Каспийского моря : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Л., 1986. 20 с.
- 4 Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 6: Каспийское море ; вып. 1: Гидрометеорол. условия. СПб. : Гидрометеоиздат, 1992. 359 с.
- 5 Думанская И. О. Ледовые условия морей Европейской части России. М. : Гидрометцентр России, 2014. 608 с.
- 6 Закс Л. Статистическое оценивание. М. : Статистика, 1976. 598 с.
- 7 Ивкина Н. И., Наурызбаева Ж. К. Изменение характеристик ледового режима казахстанской части Каспийского моря, в связи с изменением климата // Гидрометеорология и экология. 2015. № 2. С. 28–35.
- 8 Ивкина Н. И., Наурызбаева Ж. К., Саиров С. Б. Экстремально холодные зимние периоды на Казахстанской части Каспийского моря за последние десятилетия // Водные ресурсы Центральной Азии и их использование : материалы науч.-практ. конф., посвящ. подведению итогов объявленного ООН десятилетия «Вода для жизни» (22–24 сент. 2016 г.). Алматы, 2016. Кн. 2.
- 9 Ивкина Н. И., Наурызбаева Ж. К., Клове Б. Влияние изменения климатических условий на ледовый режим Каспийского моря, 2017. 15 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.waterca.org/article/2589> (12.11.2017).
- 10 Исследования льдов южных морей СССР / под. ред. К. К. Гюль, С. И. Кан, В. Л. Цуриков. М. : Наука, 1973. 58 с.
- 11 Лобанов В. А., Смирнов И. А., Шадурский А. Е. Практикум по климатологии : учеб. пособие. СПб., 2011. Ч. 1. 144 с.
- 12 Лобанов В. А., Шадурский А. Е. Применение эмпирико-статистических методов для моделирования и анализа климатических изменений // Учен. зап. ПГТМУ. 2010. № 14. С. 73–88.

13 Лобанов В. А., Смирнов И. А., Шадульский А. Е. Практикум по климатологии : учеб. пособие. СПб., 2012. Ч. 2. 141 с.

14 Лобанов В. А., Наурузбаева Ж. К. Климатические изменения толщины льда на северо-востоке Каспия // Учен. зап. РГГМУ. 2018. № 53. С. 172–187 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/issue53/>.

15 Малнин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб. : Изд. РГГМУ, 2008. 408 с.

УДК 551.465

Климатические изменения в Арктике и их прогностические оценки на основе комбинированного сценария

И. В. Соломонова (_iren@mail.ru)¹

Н. А. Дианский (nikolay.diansky@gmail.com)^{2,3,4}

А. В. Гусев (anatoly.v.gusev@gmail.com)^{3,5}

¹ Институт водных проблем РАН, г. Москва

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва

³ Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН, г. Москва

⁴ Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова, г. Москва

⁵ Институт океанологии им. П. П. Шириова РАН, г. Москва

Аннотация. Рассмотрены происходящие климатические изменения в Арктике. Предлагается комбинированный сценарий оценок климатических изменений, базирующийся на композиции «парникового» и «циклического» эффектов. С его помощью уточнен сценарий изменения климата Арктики в XXI в. и приведен сценарий изменения состояния ледового покрова Арктики на долгосрочную перспективу. Последнее даст возможность оценить перспективы развития Северного морского пути.

Ключевые слова: Арктика, Северный морской путь, Атлантика, морской лёд, прогноз, климатические изменения, парниковый эффект, колебания.

Введение

Ученые активно исследуют вопрос о будущих изменениях климата Арктики.

Температура воздуха в полярной зоне растет (рис. 1). Пик среднегодовых значений аномалий приземной температуры воздуха в зоне 64–90° с. ш. за период наблюдений с 1880 по 2018 г. пришелся на 2016 г. 3,1 °С. Однако в последние два года (2017 и 2018 гг.) аномалии температуры начали снижаться – 2,2 °С и 1,9 °С соответственно.

За последние 40 лет протяженность ледяного покрова в Арктике уменьшается (см., например, рис. 2, а и б). Наиболее заметные изменения зафиксированы (по данным National Snow and Ice Data Center) в конце летнего сезона таяния (рис. 2, в). В сентябре скорость измене-

ния протяженности ледяного покрова за 1979–2018 гг. составила 12,8 % за десятилетие. Минимальная протяженность морского льда в сентябре зафиксирована в 2012 г. (3,57 млн км²). Однако сентябрь 2017 г. и 2018 г. стоят уже на 8-м (4,82 млн км²) и 7-м (4,71 млн км²) местах в ранжированном ряду наблюдений соответственно. Что согласуется с изменением температуры воздуха в данном регионе. Поскольку тонкий морской лед растет быстрее, чем толстый морской лед при тех же атмосферных условиях, зимний морской лед обычно быстро возвращается к предыдущим значениям. Мартовский морской лед в 2013 г. и 2014 г. быстро восстановился после падения 2012 г. и уже был 12-м и 9-м в ранжированном ряду. Но обращает на себя внимание тот факт, что в последние три года (с 2016 по 2018 г.) зимние значения (с января по март) протяженности ледяного покрова (рис. 2, а) занимали первую тройку в ранжированном ряду наблюдений (не смотря на снижение температуры воздуха в 2017 и 2018 гг.). Т. е. происходит резкое снижение протяженности «старого» льда. Многолетний морской ледяной покров, его протяженность, является интегратором климата на протяжении десятилетий, его потеря является чувствительным индикатором изменения климата в Арктике.

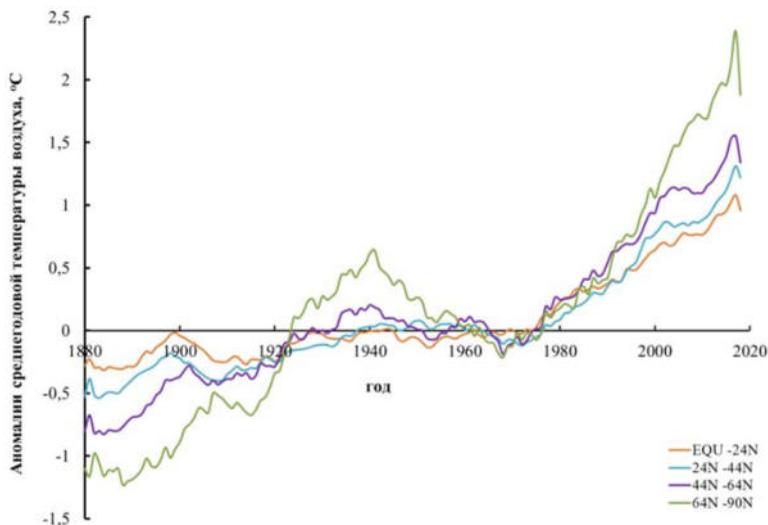


Рис. 1. Среднегодовые аномалии приземной температуры воздуха над сушей (сглаженные по девяти годам) за 1880–2018 гг., осредненные в полосе: оранжевая кривая – от экватора до 24° с. ш., голубая – 24–44° с. ш., фиолетовая – 44–64° с. ш., зелёная – 64–90° с. ш. (по данным The NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS))

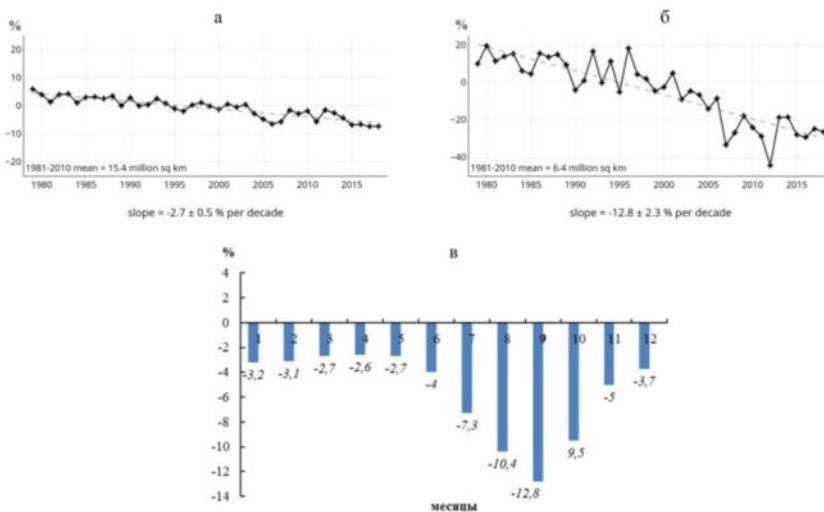


Рис. 2. Аномалии протяженности льда в Арктике за март (а) и сентябрь (б) за 1979–2018 гг. в виде временного ряда процентной разницы протяженностью льда за рассматриваемый месяц и средним значением за этот месяц (на основе данных с января 1981 по декабрь 2010 г.). Знак плюс – точки данных аномалий, пунктирная серая линия – линия тренда. Скорость изменения протяженности льда в Арктике (в) по месяцам за десятилетие за 1979–2018 гг. Цифры – скорость изменения в % (по данным National Snow and Ice Data Center)

До сих пор нет согласия в оценках будущих изменений климата Арктики и ледовитости Северного Ледовитого океана (СЛО).

Прогноз изменения температуры в рамках сценариев Пятого оценочного доклада (AR5) [13] Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) международного проекта CMIP5 для сценариев RCP 8.5, 4.5, 2.6 показывает монотонное увеличение среднеглобальной аномалии среднегодовой температуры поверхности к концу века до $4,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно [13, табл. SPM.2] (рис. 3, а). В те же будущие годы повышение температуры в Арктике, особенно зимой, значительно больше, чем глобальные изменения средней температуры (рис. 3). Наблюдаемое и прогнозируемое среднегодовое арктическое потепление (к северу от 60° с. ш.) примерно вдвое превышает глобальное среднее значение (рис. 3, а и б). Также мы видим, что во второй половине XXI в. прогнозы различных RCP значительно расходятся из-за различных сценариев выбросов.

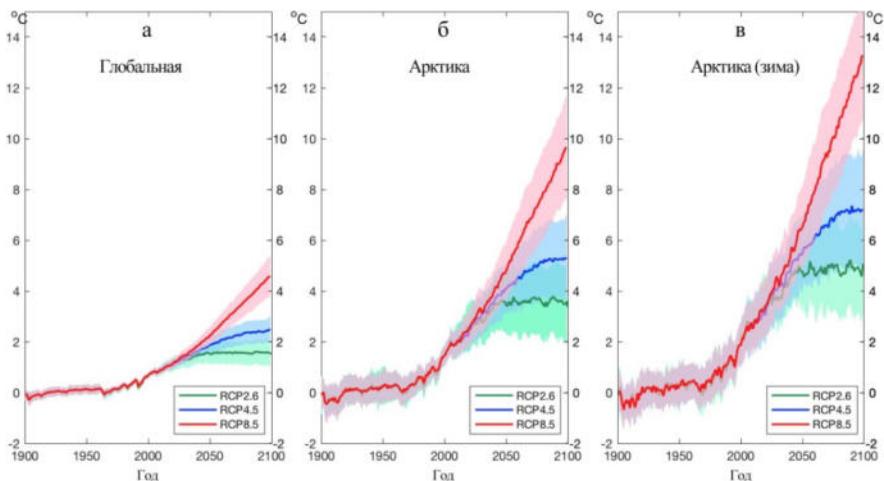


Рис. 3. Прогнозы аномалий температур приземного воздуха (относительно 1900–1950 гг.), усредненные по глобальным климатическим моделям CMIP5 по [16]: а) глобальные, б) в Арктике (60–90 °с. ш.), в) в Арктике за зиму (декабрь – февраль). Синяя линия – сценарий RCP 4.5, зеленая – RCP 2.6, красная – RCP 8.5. Заштрихованные области обозначают \pm одно стандартное отклонение среди моделей от среднего по ансамблю

Изменения температуры воздуха в Арктике приводят к изменениям в состоянии арктических льдов. По прогнозам МГЭИК [13] средние значения глобальных климатических моделей для сценария RCP 4.5 (рис. 4, синяя линия) приближаются к свободному от морского льда СЛО в конце лета ближе к концу столетия. Некоторые модели предполагают, что в соответствии с экстраполяцией последних тенденций сезонно-свободный ото льда СЛО может возникнуть уже в течение следующих нескольких десятилетий (см., например, [16; 17] и рис. 4 (черная горизонтальная пунктирная линия обозначает значение, которое указывает на почти свободную ото льда летнюю Арктику)). Однако проведенные в Институте физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН исследования продолжительности навигационного периода Северного Морского Пути (СМП) в XXI в., выполненные в серии работ [7–9] (по результатам с ансамблями прогностических расчетов по современным климатическим моделям земной системы (МЗС) в рамках международного проекта CMIP5 при сценарии умеренных антропогенных воздействий RCP 4.5 [13]), показали, что к концу XXI в. продолжительность навигационного периода может составить около пяти месяцев.

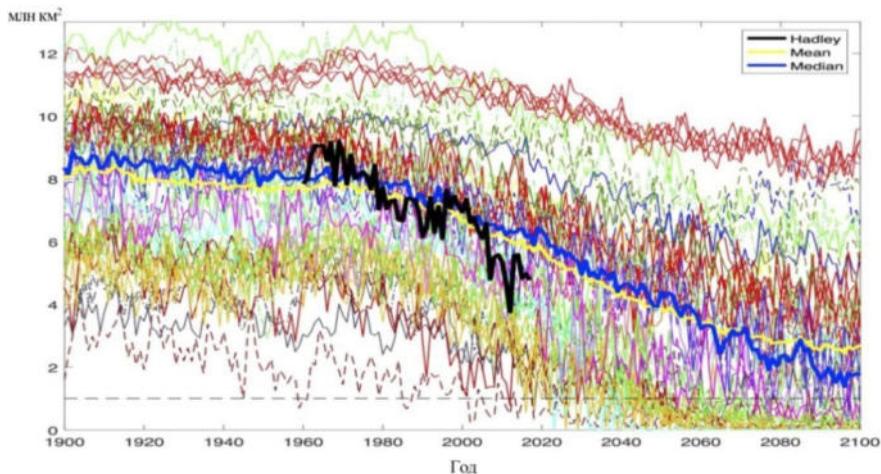


Рис. 4. Протяженность морского льда в сентябре по [16] по 82 членам ансамбля из 36 моделей CMIP5 по сценарию RCP 4.5. Каждая тонкая цветная линия представляет одного члена модели. Показано до пяти членов на модель. Толстая желтая линия – среднее арифметическое всех членов ансамбля; синяя – среднее значение; черная линия – наблюдения, основанные на скорректированном анализе морского льда HadISST; черная горизонтальная пунктирная линия обозначает значение $1,0 \text{ млн км}^2$, которое указывает на почти свободную ото льда летнюю Арктику

Таким образом, как отмечается в [16], отсутствие согласия в модельных прогнозах протяженности морского льда (рис. 4), даже для ретроспективных, указывает на высокую степень неопределенности в модельном представлении не только протяженности морского льда, но и других арктических процессов (атмосфера, океан и криосфера), которые влияют на морской лед. Однако некоторые модели могут быть более реалистичными, чем другие, но показатели для выбора моделей остаются противоречивыми.

Как видно, объяснения вариации векового хода, как региональной температуры, так и протяженности морского льда пока не существует. Большинство климатических моделей нового поколения показывает монотонное увеличение среднеглобальной аномалии среднегодовой температуры поверхности (рис. 3), не учитывая циклическую составляющую, которая более заметно проявляется в Арктике, чем в других широтных зонах (см., например, [2; 10–12]) (рис. 1). Неясно, в какой степени это несоответствие обусловлено некорректным внешним форсингом или некорректным модельным откликом на него, например, за счет недостаточного учета внутренней изменчивости климата в современных МЗС, или случайными факторами [4; 11; 16;

17]. Однако при предписанных вариациях солнечной радиации в МЗС вполне удается воспроизвести вынужденное потепление 1940-х гг. с последующим похолоданием до 1970 г. [16].

Проблема прогнозирования изменения температуры воздуха, ледового покрова Арктики и продолжительности навигации СМП актуальна и по сегодняшний день. До сих пор недостаточно изучены климатически значимые процессы и обратные связи, действующие в климатической системе Арктики. Снижение существующего уровня неопределенности является необходимым условием уточнения оценок будущих изменений климата и их последствий.

Учитывая все выше сказанное, мы предлагаем использовать сценарий, основанный на композиции климатических изменений, вызванных внешними факторами антропогенного или естественного характера и собственными колебаниями в совместной системе атмосфера – океан – суша.

Материалы и методы

В колебаниях температуры воздуха Арктики более четко, по сравнению с другими широтами, прослеживаются несколько периодов: потепления (1915–1949 гг. и 1971 – по н.в.) и похолодания (1950–1970 гг.) (рис. 1). Такое поведение температуры воздуха хорошо согласуется и с изменением ледового покрова Арктики. В [1, с. 132; 5] на основе анализа исторических данных о морских арктических льдах показано четыре стадии развития морских арктических льдов: две стадии разрастания (1900–1918 гг. и 1938–1968 гг.) и две стадии сокращения ледяного покрова (1918–1938 гг. и 1968–1999 гг.). В [10] показано, что в значительный вклад в Арктический климат в XX в. вносят циклические изменения температуры (около 60 лет). Это подтверждается в работах [7; 9; 1]. В них отмечается, что во внутривековых температурных полушарных, глобальных и региональных изменениях (в частности, в Северной Атлантике (СА) и атлантическом секторе Арктики), а также в изменениях ледовитости арктических морей значимо проявляются вариации с периодом около шести десятилетий. Такие же колебания характерны и для Атлантической мультидекадной осцилляции (АМО), в свою очередь, связанной с термохалинной циркуляцией океана.

Такое поведение климатических изменений, произошедших за последние полтора века, позволило Г. Н. Панину [10] предложить простую аппроксимацию климатических изменений на основе композиции «парникового» и «циклического» эффектов (*комбинированный*

сценарий оценок климатических изменений). Под парниковым изменением климата подразумеваются климатические изменения, вызванные внешними факторами антропогенного или естественного (извержения вулканов, изменение солнечной постоянной и т. д.) характера. Под циклическими изменениями климата понимаются собственные колебания в совместной системе атмосфера-океан-суша. При этом полагалось, что главная частота наиболее сильных циклических колебаний климата соответствует периоду колебаний в 60 лет, а парниковые изменения климата определяются линейным трендом

$$\Delta T \approx \Delta T_{\text{IPCC}} + k \sin \omega t, \quad (1)$$

где ΔT – прогнозируемая аномалия температуры приземного воздуха; ΔT_{IPCC} – аномалия температуры, прогнозируемая с помощью МЗС МГЭИК; ω – циклическая частота приблизительно 60-летних колебаний климата; t – время; $k(\lambda, \varphi)$ – эмпирический коэффициент, зависящий от координат (более подробно см. [11]).

Анализ тенденций изменения ледовитости Арктического бассейна был проведен на основе модельных расчетов по модели общей циркуляции океана INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model). В этой модели на основе полной системы уравнений гидротермодинамики океана рассчитываются все параметры циркуляции и термодинамического состояния вод океана, включая динамику и термодинамику морского льда [3]. Прогностический сценарий атмосферного воздействия для INMOM на период 2010–2071 гг. строится на основе комбинации «парникового» (внешнее воздействие в виде линейного тренда) и «циклических» (внутренняя изменчивость климатической системы с характерным периодом 60 лет) эффектов (согласно формуле (1)), которая даёт общую долгопериодную тенденцию климатических изменений. На эту тенденцию накладываются межгодовые, сезонные и синоптические аномалии, полученные из реального атмосферного воздействия базы CORE (Datasets for Common Ocean-ice Reference Experiments) [13] за период с 1948 по 2009 г. Эти данные [13], основанные на реанализе NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research), характеризуются высоким качеством, достоверностью и сбалансированностью (что особенно важно для приходящей к поверхности Земли радиации), так как специально подготовлены для использования в моделях общей циркуляции океана. Используя эти данные, с помощью модели

общей циркуляции океана INMOM были проведены ретроспективные и прогностические расчёты по воспроизведению термохалинной циркуляции и морского льда в Атлантическом и Северном Ледовитом океанах на период 2010–2071 гг.

Результаты

Проведенные расчеты показали, что похолодание Арктики в 1950–1970-х гг. происходило при снижении интенсивности АМО и Атлантической меридиональной циркуляции (АМЦ) в этот период. А рост интенсивности АМЦ в последние три десятилетия XX в. вместе с антропогенным воздействием мог способствовать значительному потеплению в Арктике. Эти изменения, по-видимому, привели и к увеличению продолжительности навигационного периода СМП. Изменчивость индекса АМО, а также индекса интенсивности АМЦ (который отражает климатические изменения в потоке тепла с поверхности СА в атмосферу в средних широтах) и связанного с ним результирующего потока тепла между СА и атмосферой характеризуется значительными долгопериодными колебаниями, что дает основание использовать эти индексы для оценки непосредственного влияния изменения климата СА на вариации климата в Северной Евразии и Арктике. По крайней мере, активизация таяния льда в Арктике в 1990–2000-х гг. согласуется с ростом этих индексов. [4; 11].

Тенденции изменения ледовитости СЛО находятся в противофазе с вариациями АМЦ и индекса АМО (см. [11]). Снижение активности термохалинной циркуляции в СА в период с 1948 г. до середины 1970-х гг. согласуется с ростом ледовитости СЛО в этот период (см. [1; 5]). Рост интенсивности АМЦ и АМО с середины 1970-х гг. до конца столетия сопровождался изменением распределения пресной воды в верхнем слое и уменьшением площади морского льда СЛО. Результаты расчётов циркуляции Мирового океана показали заметное падение интенсивности АМЦ в конце XX в., которое проявляется также и для эволюции меридионального переноса тепла (МПТ) в океане [2; 11]. Так как именно за счет АМЦ формируется МПТ в океане, являющийся главным климатообразующим фактором климатической системы Земли.

Проведенные расчеты эволюции морского льда в СЛО, с помощью INMOM, показывают (рис. 5) ближе к 2020-м гг. смену тенденций в ледовитости с падения на рост до середины 2030-х. А далее опять происходит быстрое уменьшение площади морского льда в СЛО. Значительное рассогласование модельных величин и данных наблюдений для марта до 1987 г. на рис. 5, а вызвано тем, что до этого

года лед Охотского моря не учитывался в наблюдениях, а затем его площадь присовокуплялась к площади льда Северного Ледовитого океана. Отсюда для площади сентябрьского льда (см. рис. 5, б) этого рассогласования нет, так как в это время Охотское море свободно ото льда. Детрендриванная корреляция наблюдаемой и рассчитанной площадей морского льда в Арктическом бассейне для марта составляет 0,81, для сентября – 0,87 (с трендами эти значения были бы еще выше), что является очень неплохим показателем воспроизведения не только трендов, но и межгодовой изменчивости ледового покрова СЛО. Такое поведение изменчивости площади морского льда в Арктике находится в полном соответствии с ходом приповерхностной температуры в высоких широтах [4], когда имеет место падение среднегодовой температуры с начала 2020-х по середину 2030-х гг. В сезонном разрезе падение температуры начинается немного раньше, с 2007 г. в зимний сезон и с 2016 г. в летний. Также можно заметить, что рост площади льда в 2020–2030 гг. весьма значителен (рис. 5), и на 2026 г. почти соответствует состоянию, наблюдавшемуся при локальном похолодании 1970-х. При этом средняя температура локального похолодания 1960-х гг. была приблизительно на 1,5 °С ниже, чем в 2020-х гг. Таким образом, обнаружен нелинейный эффект в эволюции льда в СЛО, когда при значительно разных климатических ситуациях площадь льда в СЛО сравнима.

Сценарии развития морских льдов, полученные при помощи численного моделирования (см., например, [6–9; 13]), показывают уменьшение площади ледяного покрова, что улучшит возможности навигации на трассе СМП и деятельности на шельфе в других частях Арктики.

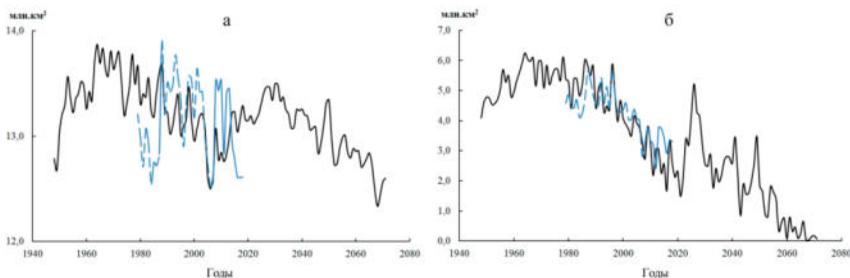


Рис. 5. Результаты расчетов по INMOM площади арктического льда в марте и сентябре (комбинированный сценарий) с 1948 до 2070 г. (черная линия) и данные наблюдений The NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS) в период с 1979 по 2018 г. (синяя линия): пунктир – 1979–2007 гг., сплошная линия – 2008–2018 гг.) (а) – для марта, (б) – для сентября

Проведенные нами расчеты продолжительности навигационного периода (ПНП), с использованием предложенного *комбинированного сценария*, показали следующее.

Для определения ПНП по комбинированному сценарию за 1948–2071 гг. использовались различные значения для предельной концентрации морских льдов в океанических модельных ячейках. В том числе, определялось количество суток в году с концентрацией морских льдов, не превышающей 15 % (85 % площади с открытой водой). Для сравнения, результаты сопоставлялись со спутниковыми данными (SMMR) за 1980–2013 гг., полученными в [8; 9] (рис. 6).

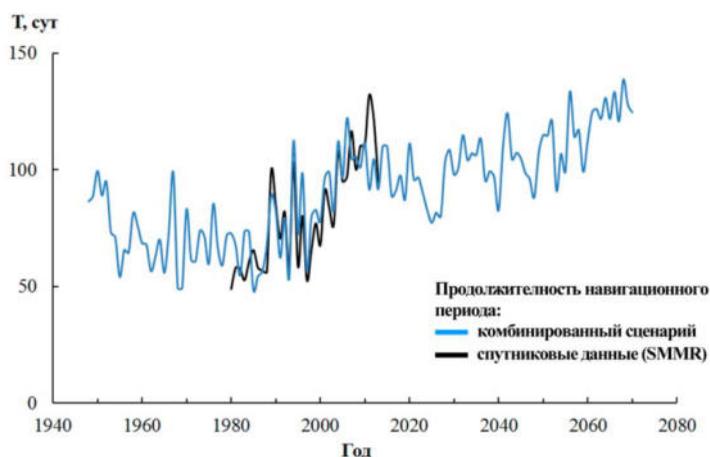


Рис. 6. Межгодовые вариации продолжительности навигационного периода T (сут) при доле морских льдов не более 15 %: голубая линия – по комбинированному сценарию за 1948–2071 гг.; чёрная линия – спутниковые данные (SMMR) за 1980–2013 гг. по [8]

Как видно из рисунка 6, комбинированный сценарий даёт очень хорошее соответствие с данными наблюдений. Коэффициент корреляции между ПНП по комбинированному сценарию и данным со спутника составляет 0,5. На фоне общей тенденции увеличения ПНП отмечается большая межгодовая изменчивость. В отдельные периоды заметно уменьшается ПНП в XXI в. По нашим расчетам, продолжительность навигации по СМП при концентрации морских льдов (степени покрытия акватории льдом) 15 % может составить к 40-м гг. XXI в. около 3,5–4 месяцев, а к 70-м гг. – около 4,5–4,7 месяцев (рис. 6).

Таким образом, проведённый анализ тенденций изменения ледовитости СЛО на основе ежедневных данных модельных расчетов (по комбинированному сценарию) показывает возможное похолодание в Арктике и соответствующее снижение продолжительности навигационного периода СМП в ближайшие 15 лет.

Выводы

Для описания процессов, происходящих в полярных областях и прилегающих к ним районам, основываясь на предложенной Г. Н. Паниным [10] аппроксимации климатических изменений на основе композиции «парникового» и «циклического» эффектов, предложено использование модели с так называемой циклической составляющей для оценки возможных перспектив Северного морского пути [11]. Этот подход позволяет описывать не только рост температуры, вызванный эмиссией парниковых газов, но и изменчивость климата (в частности наблюдавшееся похолодание в 1950–1970-х гг.).

Проведено исследование взаимосвязей между климатическими процессами Северной Атлантики и Арктики. Это позволило оценить вклад термохалинной циркуляции в формирование североатлантического меридионального переноса тепла в высокие широты Северного полушария, оценить роль циклических особенностей климатических изменений СА и Арктики, а также изменение состояния ледяного покрова Арктики.

Предложенный комбинированный сценарий климатических изменений показывает возможное похолодание в Арктике и соответствующее снижение продолжительности навигационного периода Северного морского пути в ближайшие 15 лет. Начиная приблизительно с 2035 г. вплоть до 2070 г. опять начнётся потепление, причём более стремительное, чем было в конце XX в. Обнаружен нелинейный эффект в эволюции льда, когда при значительно разных климатических ситуациях 1980-х и прогнозируемых 2020-х гг. площадь льда в Арктике сравнима.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 18-05-60111-Арктика.

Список литературы

1. Алексеев Г. В., Большаинов Д. Ю., Радионов В. Ф., Фролов С. В. 95 лет исследований климата и криосферы Арктики в ААНИИ / Г. В. Алексеев, Д. Ю. Большаинов, В. Ф. Радионов, С. В. Фролов // Лёд и снег. 2015. Т. 55, № 4. 14 с.

2. Гусев А. В., Дианский Н. А. Воспроизведение циркуляции Мирового океана и ее климатической изменчивости в 1948–2007 гг. с помощью модели INMOM // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 1. 12 с.
3. Дианский Н. А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М. : Физматлит, 2013. 272 с.
4. Дианский Н. А., Соломонова И. В., Гусев А. В. Оценка перспектив навигации по Северному морскому пути на основе комбинированного прогностического сценария // Тр. Гос. океанограф. Ин-та. ФБГУ «ГОИН», 2018. № 219. 19 с.
5. Захаров В. Ф. Похолодание Арктики и ледяной покров арктических морей // Тр. ААНИИ. ГНЦ РФ ААНИИ Росгидромета, 1976. Т. 337. 96 с.
6. Научные исследования в Арктике. Т. 3. Дистанционное зондирование морских льдов на Северном морском пути: изучение и применение / О. М. Йоханнесен [и др.]. СПб. : Наука, 2007. 512 с.
7. Мохов И. И. Современные изменения климата в Арктике // Вестн. РАН. ФГБУ «РАН», 2015. Т. 85, № 5-6. 7 с.
8. Мохов И. И., Хон В. Ч. Продолжительность навигационного периода и ее изменения для Северного морского пути: модельные оценки // Арктика: экология и экономика. ФБГУН «ИБРАЭ РАН», 2015. № 2 (18). 7 с.
9. Мохов И. И., Хон В. Ч., Прокофьева М. А. Новые модельные оценки изменений продолжительности навигационного периода для Северного морского пути в XXI в. // Докл. Акад. наук. 2016. Т. 468, № 6. 6 с.
10. Панин Г. Н. Об изменениях климата в полярных зонах Земли в XX и XXI столетиях // Докл. Акад. наук. 2009. Т. 427. 6 с.
11. Оценка климатических изменений в Арктике в XXI столетии на основе комбинированного прогностического сценария / Г. Н. Панин, Н. А. Дианский, И. В. Соломонова, А. В. Гусев, Т. Ю. Выручалкина // Арктика: экология и экономика. 2017. № 2(26). 18 с.
12. Семенов В. А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике // Докл. Акад. наук. 2008. Т. 418, № 1. 4 с.
13. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner et al (eds.)]. Cambridge ; N. Y. : Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
14. Large W., Yeager S. The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set // Climate Dynamics. Springer Science, Business Media, 2009. Vol. 33. 24 p.
15. Tipping elements in the Earth's climate system / T. M. Lenton [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. US National Academy of Sciences. 2008. Vol. 105 (6). 8 p.
16. The urgency of Arctic change / J. Overland [et al.] // Polar Science. Elsevier. 2018. 28 p.
17. Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations / J. C. Stroeve [et al.] Geophysical Research Letters. AGU. 2012. Vol. 39. 7 p.
18. External forcing of the early 20th century Arctic warming / L. Suo [et al.] // Dynamic Meteorology and Oceanography. Tellus. 2013. Vol. 65. 14 p.
19. The Guardian [Электронный ресурс].
<https://www.theguardian.com/environment/2016/aug/21/arctic-will-be-ice-free-in-summer-next-year>
 (дата обращения 04.03.2019).

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

UDK 551.50:629.130

Typical meteorological situations in the Little Carpathian Mountain range from the perspective of aviation

L. Gaál (ladislav.gaal@microstep-mis.com)¹,
O. Vorobyeva (olga.vorobyeva@microstep-mis.com)^{1,2},
P. Nechaj (pavol.nechaj@microstep-mis.com)^{1,2}

¹ *MicroStep-MIS, Bratislava, Slovakia;*

² *Faculty of Mathematics, Physics and Informatics of the Comenius University in Bratislava, Bratislava, Slovakia*

Abstract. Observation of dangerous meteorological phenomena and timely issued warnings are crucial in reducing risks of losses on property and human lives practically in all areas of human activities, from water management through agriculture to transportation. In aviation, it is the low level wind shear that may seriously affect the flight conditions: abrupt changes in the wind speed and/or wind direction may dramatically influence aerodynamic circumstances of the flight, and may threaten the safety of the aircraft landing or take-off. Wind shear can either be detected by a traditional methodology by means of a multitude of wind anemometers, or by a more advanced lidar technology. The company MicroStep-MIS has – as the first in Central Europe – purchased a Leosphere lidar and installed at the Bratislava Airport with a long term plan to develop an automated system for wind shear detection and alerting. As a first step towards this goal, we analyze typical and/or dangerous meteorological situations that occur in the close neighborhood of the airport (in a circle with a radius of 6–7 km which is the maximum range of the lidar). The target area is highly influenced by the vicinity of the Little Carpathian ridge, approximately 10–12 km from the airport, with peaks reaching to 400 m in height over the leeward plain. Lidar observations with high temporal and spatial resolutions (~100 m horizontally, scans in every 2 minutes) allow us to analyze the evolution of meteorological situations with a high potential of wind shear occurrence, such as vertical discontinuities in the wind field.

Keywords: wind speed, low level wind shear, aviation, lidar, Bratislava, Little Carpathians.

1. Introduction

Atmospheric lidar is an instrument aimed at distant observation of different properties of the atmosphere. Similarly, to the meteorological radar, it emits pulses of electromagnetic signal and detects reflected pulses from the targets, but unlike the radar, it uses laser beams, which are expected to be scattered back from atmospheric pollutants (aerosol, dust, salt etc.). Doppler lidars allow for estimating radial velocities of wind.

One of the key functions of meteorological lidars is the detection of wind shear, which is a hazardous phenomenon for the aircrafts at lower levels of the atmosphere. Abrupt changes in the wind speed and/or wind direction may dramatically influence aerodynamic circumstances of the flight, and may threaten the safety of the aircraft landing or take-off. Lidars, due to their compactness and the ability to provide high resolution scans are ambitious competitors of the traditional method of wind shear detection, which is based on a system of anemometers installed in the vicinity of runways.

Beyond the wind shear detection and alerting, Doppler lidars proved to be useful in further aviation applications such as wind shear forecast, turbulence alerting and forecast, detection of wake vortices, 2D or 3D wind retrieval, visibility and mixing height monitoring etc. (e.g., [1–4]).

The issue of low level wind shear is of a great importance also in the fields of interest of MicroStep-MIS, a company with 25 years of experience in manufacturing software, hardware and database systems in meteorology, hydrology, aviation and environmental sciences. Therefore, as a first private company in Central Europe, we purchased a Leosphere lidar of a type Windcube 200S, with a long-term goal to develop our own automated system for wind shear detection and alerting, within a 4-year long (2016–2020) scientific project. In the first approach, our attention has been focused on observation, description and analysis of selected meteorological situations that are typical for the site of the lidar, i.e. the Bratislava Airport, and that have considerable potential of wind shear occurrence. Situations like that involve gust fronts, stable vertical vortices from the nearby mountain range, or vertical discontinuities in the wind field. The latter will be presented herein, while the other situations will be dealt with in our upcoming publications.

2. Low level wind shear in aviation

In aviation, one is generally interested in changes of the headwind or tailwind (the longitudinal component of the wind) since, generally, the importance of the headwind/tailwind tends to predominate over the crosswind (lateral component). Moreover, calculations of wind shear over the airport must take into account the orientation of the runways, which means resolving all shear vectors to the runway headings [5].

The general recommendations for the estimation of the low level wind shear originate from the LLWAS (*Low Level Windshear Alert System*) system. It is a system comprising of several sensors (at least 6, at most 32 anemometers), which cover the runways and their vicinity out to 3 nautical

miles ($\sim 5,4$ km) from their edges. Observations of wind speed are collected from individual anemometers, and the LLWAS algorithm calculates divergence in triangles of three sensors and on triangle edges between the sensors. These results are resolved into components along the runway headings and headwind/tailwind gain/loss estimates [5]. Wind shear alerts or microburst alerts are then issued to the pilots on the basis of the magnitude of the headwind gain or loss over a 4-km flight path. An alert “*wind shear with loss*” is issued when the headwind loss exceeds 30 km/h (15 kt) but equal to, or less than, 60 km/h (30 kt). Microburst alert is then issued when a headwind loss of more than 60 km/h (30 kt) over 4 km is observed. A headwind gain of 30 km/h (15 kt) or more over 4 km, indicated as “*wind shear with gain*”, usually appears ahead of and along a gust front [5]. Wind shear that is detected along a distance over the nominal 4 km is considered of reduced risk since the change in the wind is less abrupt.

3. Geographical and climatological settings of the Bratislava Airport

Climate and especially wind conditions in Bratislava are highly influenced by the locality of the city among the surrounding geographical systems, which are the Alps, the Carpathians and the Pannonian Basin. From a closer perspective of the Bratislava Airport (112 m above the sea level), the Little Carpathian ridge is the dominant geomorphological unit. It is about a 100-km long mountain range extending from Bratislava in a south-western to north-eastern direction. The highest peaks of the Little Carpathians reach over 750 m a.s.l.; however, peaks near Bratislava reach only up to 400 m in height over the leeward plain. The Bratislava Airport is located approximately 10–12 km from the Little Carpathian ridge, in the south-eastern direction (Fig. 1).

Wind climate of Slovakia has been analyzed and published in a number of monographs in the past; the latest one is the Climate Atlas of Slovakia [6]. Polčák and Šťastný examined the relationship between the topography and the prevailing winds in Slovakia [7] and later in Bratislava and its proximity [8]. Both studies were based on observations from the period 2000–2009.

The average wind speed in the Bratislava area is a bit higher than in Slovakia in general, as a consequence of a jet effect, stemming from the mutual configuration of the Carpathians and the Alps as well as of the Danube River valley [8]. The average wind speed at the Bratislava Airport is 3,7 m/s. The dominant wind directions are the NW, W and N, with average wind speeds exceeding 4,0 m/s in either directions (Fig. 1 in [8]) – clearly

due to the leeward effect of the SW–NE oriented ridge of the Little Carpathians. The most frequent wind direction is the NW with a frequency exceeding 25 % of all wind occurrences; NE is at the second rank with a frequency as of 15–20 % (Fig. 2 in [8]).

4. The lidar at the Bratislava Airport

The Bratislava Airport (officially: M. R. Štefánik Airport; IATA: BTS; ICAO: LZIB) is the main international airport in Slovakia with over 2,2 million of passengers and over 30 thousand of landings and take-offs in the year 2018 [9]. It is located in the NE parts of the city, approximately 9 km from the city center. The airport has two perpendicular runways with concrete surface. The main runway is RWY 13–31 (directions 130° and 310°) with a length (width) of 3,190 m (45 m). The second one is RWY 04–22 (directions 40° and 220°), with a length (width) of 2,900 m (60 m) [10].



Figure. 1. Bratislava Airport and the Little Carpathians mountain range at a screenshot taken from Google Earth. The virtual position of the viewpoint is at an elevation of 2,3 km

The lidar is located near the cross of the two runways, in the quadrant between 220° and 310° , in a distance of 254,3 m (298,0 m) from the center-line of RWY 13–31 (RWY 04–22).

The basic scanning mode of the lidar is a PPI regime where the elevation angle is set to 3° . In the scanning mode PPI (*Plan Position Indicator*), the optics of the lidar is set to a constant elevation angle, while it keeps rotating around its vertical axe from 0° to 360° . The result of a single scan is a cone surface, which is displayed in a 2D perspective as a circle. The elevation angle of 3° corresponds with the angle of the glide path of landing aircrafts, thus the lidar can provide information on possible wind shear situations that pilots can encounter during the phase of landing.

The current settings of the lidar PPI 3° scans are as follows: the optics rotates with a speed of $3^\circ/\text{s}$, and since the accumulation time is 1.0 s, a full 360° scan is achieved exactly in 2 minutes. The minimum measured range is 200 m from the lidar, and the display resolution is set as of 100 m. Consequently, a single cell of a lidar scan has a width of 3° , and has a length of 100 m.

As it can be seen on the lidar pictures (Fig. 2), there are two blind spots where the lidar beams in the PPI 3° regime are blocked by the surrounding obstacles on the airport. The first area lies between the directions $\sim 225^\circ$ and $\sim 255^\circ$, and it is caused by the headquarters of the airport fire station. The building is not very tall indeed, but it lies very close to the lidar (~ 200 m). The second blind area is delimited by the directions $\sim 310^\circ$ and $\sim 325^\circ$, and it is caused by the tower of the meteorological observatory.

The total angular sum of the two invisible areas makes up approximately 45° , which is about $1/8$ of a full circle. Nevertheless, we think that this is not a considerable drawback for the planned wind shear monitoring and alerting since (i) RWY 22 and the corresponding approach corridor are completely seen by the lidar, and (ii) the approach corridor of RWY 31 is the least frequently used one for landing at the Bratislava Airport.

Each lidar figure of wind field (Fig. 2) contains a number of fixed reference points, indicated by small crosses, for a better orientation for the reader. The position of the lidar is marked by the cross in the center of the figures. Furthermore, there are 4×4 more symbols (crosses) displayed, four along the direction of each runway. In each case, they indicate the end of the runway in the corresponding direction, and distances of 1, 2 and 3 NM from the end, respectively, in line with the LLWAS methodology [5]. Note that the cross in the SE corner of the figures is missing.

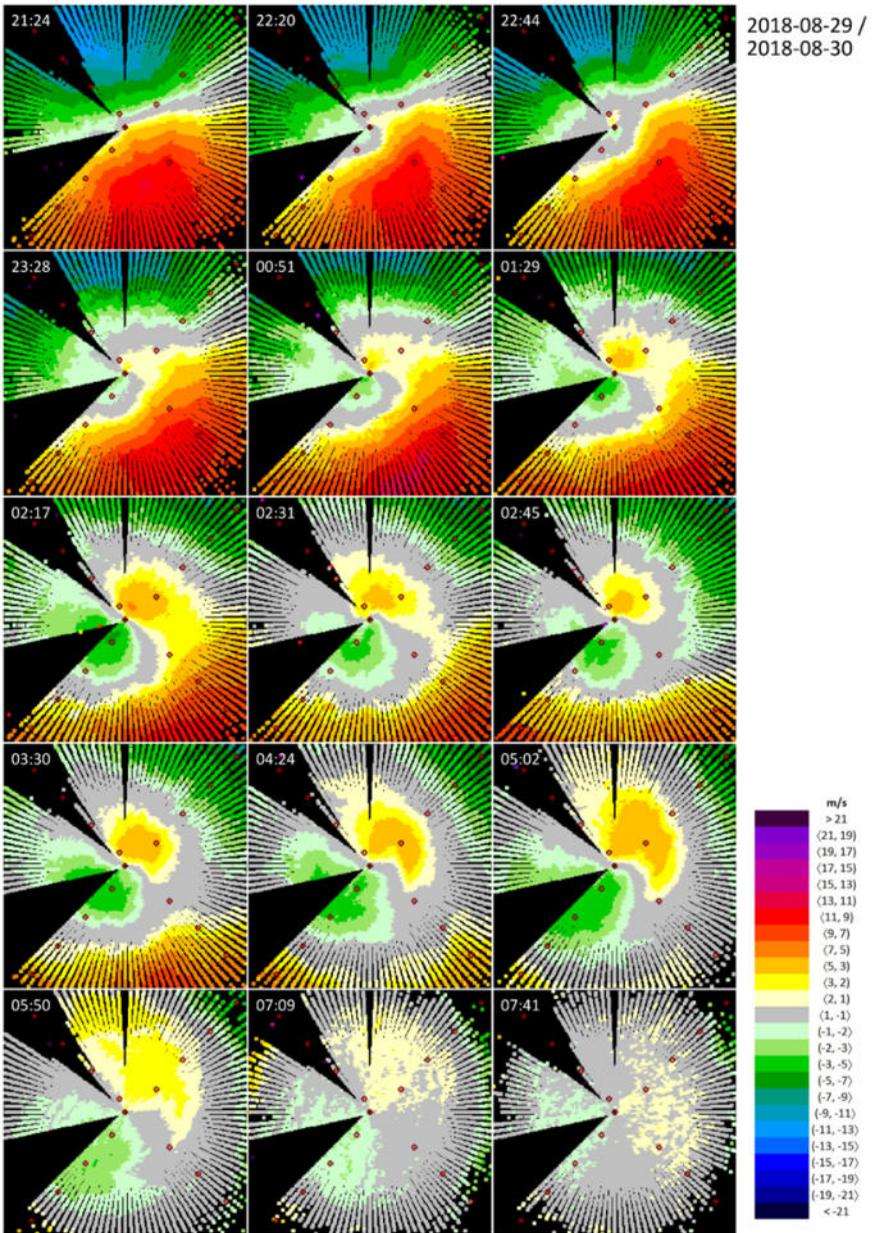


Figure 2. Meteorological situation from ~21 PM of August 29, 2018 until ~8 AM of August 30, 2018, seen by the lidar at the Bratislava Airport, located at the center of each figure. Winds blowing towards the lidar are defined as positive

Table 1 presents a summary of the distances and altitudes of each reference point relative to the lidar position. It indicates that the PPI 3° scan reaches up to a distance of 6–7 km from the lidar, and this maximum range corresponds to an elevation of 300–350 m over the surrounding horizontal terrain.

Table 1

Distances and altitudes of the reference points (crosses) in the lidar figures. Abbreviations: RWY = Runway, 0 NM = runway end, *d* – horizontal distance from the lidar, *H* – altitude over the surrounding terrain

RWY	0 NM		1 NM		2 NM		3 NM	
	<i>d</i> [m]	<i>H</i> [m]						
04	1,770	93	3,570	187	5,370	281	7,170	376
13	2,590	136	4,390	230	6,190	324	7,990	419
22	1,200	63	3,000	157	4,800	252	6,600	346
31	670	35	2,470	129	4,270	224	6,070	318

5. A selected meteorological situation seen by the lidar

To demonstrate the usefulness of the lidar in monitoring hazardous events in a relatively high spatial and temporal resolution, we selected a meteorological situation that is typical for the target area and bears a potential of occurring considerable low level wind shear. This is a situation when two different layers are stretched over the area of the airport, each with considerably different circulation patterns.

The evolution of the selected situation is documented in Fig. 2. It all starts on August 29, 2018, in the evening hours, after 21 PM. At this time, a wind of a constant SSE direction is blowing over the target area, with its speed gradually increasing with elevation, and reaching magnitudes up to 13 m/s (~26 kt) in the heights of 220–320 m over the runways. A little bit later, this stable situation is perturbed: a kind of a wave seems to appear in the center of the lidar figure (22:20), which results in widening the area of light winds near the surface; however, the wind is of an opposite direction compared to that in the upper levels (22:44). In the next couple of hours, the situation evolves in the way as follows. The wind in the surface layer gets stronger (up to 5 m/s), changes its direction to NNE or NE, and the thickness of this layer increases. At the same time, areas with the highest wind speeds are pushed out to higher elevations and out of the maximum range of the lidar. The existence of stronger winds in higher altitudes is underpinned by PPI 1.5° scans of the Doppler radar of the Slovak Hydrometeorological Institute installed at the nearby hill of Malý Javorník (Fig. 3).

At the time 03:30 AM, there are two atmospheric layers over the airport, which are distinctively separated from each other by a boundary that

lies approximately in the elevation of 150–180 m over the runways. In these two layers, the radial components of the wind show a completely different character: they are – in rough estimation – of an opposite direction.

In the next hours, the lower layer further increases its thickness, but the wind in it stays unchanged. Consequently, the upper layer is gradually pushed to higher altitudes. After 05:50, the meteorological situation starts falling apart: the wind in the bottom layer gets weaker, while there are only negligible fragments of the upper layer near the maximum range of the lidar beams.

6. The same meteorological situation seen by other instruments

One of the four meteorological radars of the Slovak Hydrometeorological Institute is installed at the hill Malý Javorník, at an elevation of 584 m above the sea level, and approximately in a horizontal distance of 10.2 km from the lidar at the Bratislava Airport.

Due to its proximity, the radar can monitor the space above the airport; however, there is no intersection between the lowest elevations reached by the radar and the highest elevations reached by the lidar. The altitude difference between the locations of the two instruments is 472 m. When the radar provides PPI scans at one of the lowest elevation angles $1,5^\circ$, the radar beams get elevated by ~ 140 m at the closest reference point of the lidar (3 NM to the end of RWY 31, 5,2 km from the radar), and by ~ 470 m at the furthest reference point (3 NM to the end of RWY 13, 17.9 km from the radar). It means that the radar beams are at the elevations from ~ 610 to ~ 940 m above the extended area of the airport (runways + approach corridors of length of 3 NM), while the corresponding elevations of the lidar beams are ~ 320 to ~ 420 m (Tab. 1). Consequently, the measurements of lidar and radar cannot be compared directly; the radar scans may only serve as supplementary information to the lidar figures.

The evolution of the selected meteorological situation seen by the radar is documented in Fig. 3, approximately in 2-hour intervals. During the first hours, one can see relatively stable winds of speed of 6–10 m/s blowing from the direction S or SSE in the area of the airport (indicated by ‘LZIB’ in Fig. 3). This finding is completely in line with the lidar figures. After 1:00 PM, the circulation pattern gradually changes: the wind changes its direction to SSW and SW, and at the same time, its speed drops. Note that this information cannot be derived from the lidar figures since it happens in the upper layer beyond the maximum range of the lidar beams. At the end of the examined period (after 4:00 AM), the meteorological situation diminishes and a completely new one takes over (at 6:00 in Fig. 3).

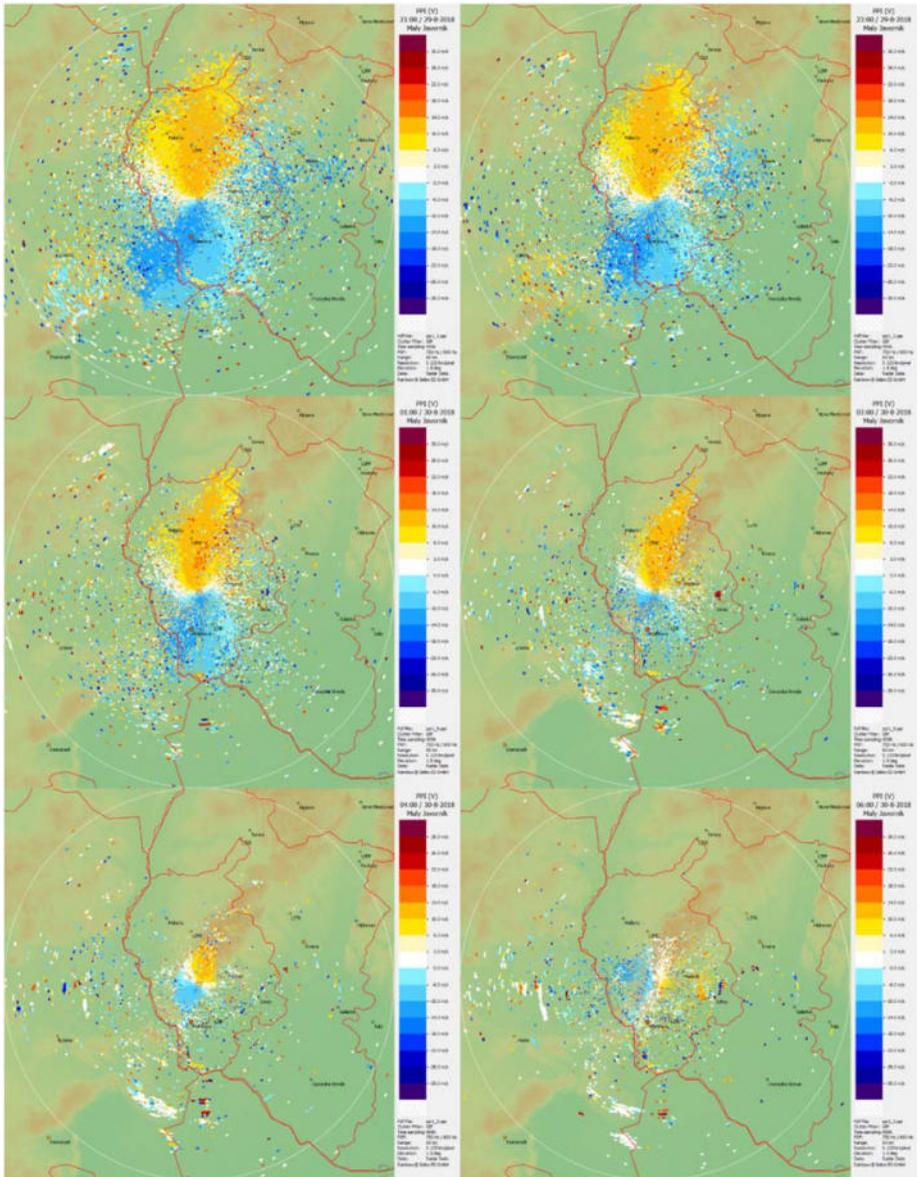


Figure 3. The same meteorological situation as in Fig. 2, seen by the radar at Malý Javorník. Note that in contrast with the lidar, winds blowing towards the radar are defined as negative. The location of the Bratislava Airport is indicated by 'LZIB', in the SSE direction from the radar

Stronger southern wind at higher levels is also indicated by the wind barbs on the midnight upper air soundings from Vienna (Fig. 4), which is the closest one to Bratislava (~50 km). Note that the vertical wind profile from the Vienna sounding does not yield as significant difference in the wind direction in the bottom vs. upper layers as in Bratislava. It may be explained by the fact that the circulation patterns near the ground may be different, due to the effect of the topography.

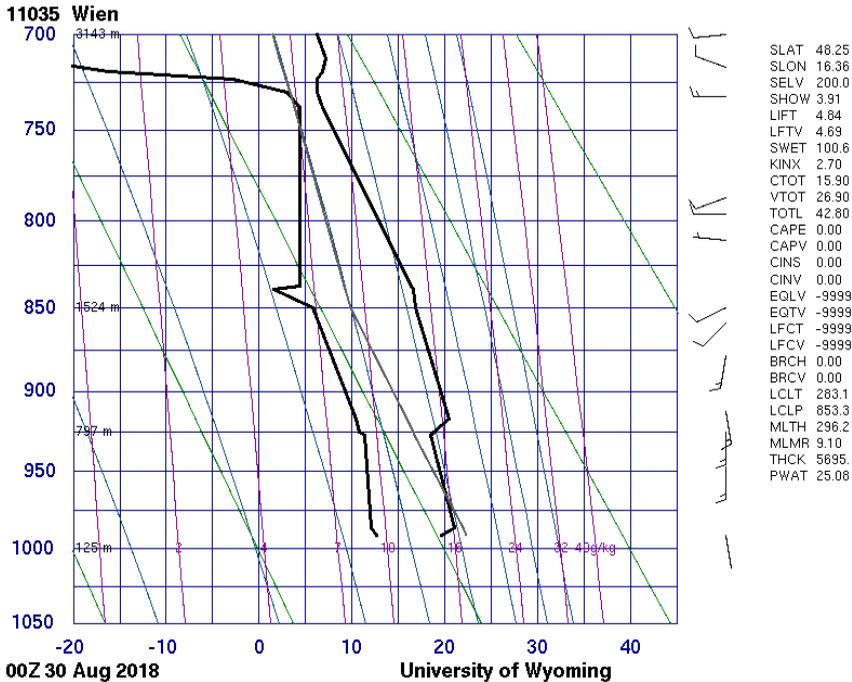


Figure 4. Outcome of the air sounding at midnight on August 30, 2018 at the meteorological station 11035 in Vienna, Austria. Source: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

Synoptic analysis at midnight on the days of August 29 and 30, 2018 made by the German Weather Service (DWD) yields that the target area was not influenced by any frontal systems. Bratislava was first affected by an edge of a diminishing pressure high (not shown herein) and then, 24 hours later, by a non-significant pressure field (Fig. 5). No precipitation was observed during the whole analyzed time period (not shown herein).

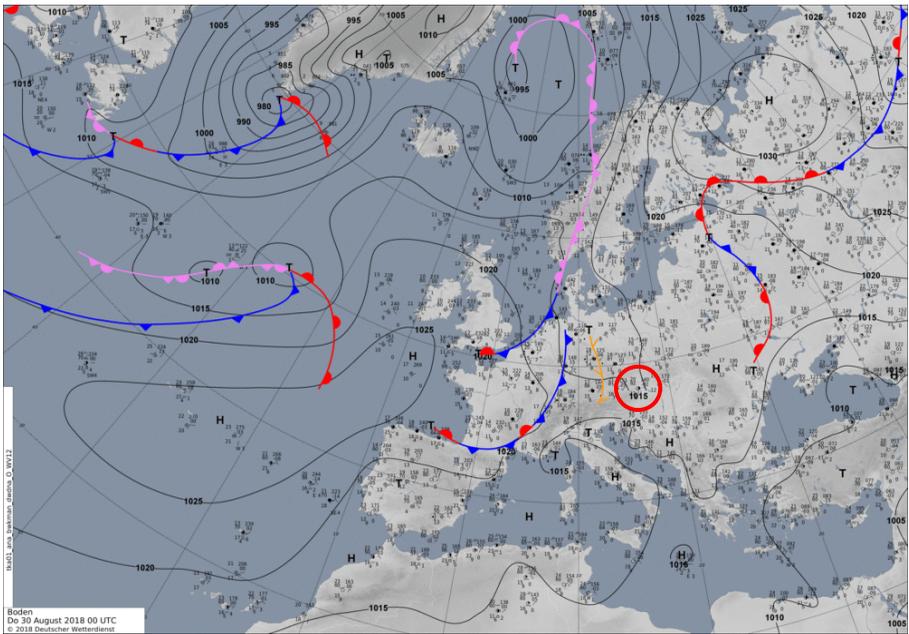


Figure 5. Synoptic analysis for Europe at midnight on August 30, 2018. Source: DWD (Deutsche Wetterdienst) through <http://www.wetterzentrale.de>. Bratislava is indicated by the red circle

7. Estimation of low level wind shear

Suppose that a plane is landing on RWY 04–22, from the NE direction, at the time 03:30 (Fig. 2). At the distance of 3 NM to the runway edge, the aircraft may encounter headwind of a magnitude of 9 m/s, while at the runway edge, there is tailwind of a magnitude of 5 m/s. Thus, the wind shear that affects the landing plane is a *headwind loss* of 14 m/s (~28 kt) along a distance of approximately 3 NM, i.e. 5.4 km. According to the definition of the LLWAS methodology [5], the estimated low level wind shear does not meet the level for issuing a microburst alert (a loss or gain of ≥ 30 kt over a distance of 4 km), but certainly, an alert “*wind shear with loss*” could be issued in this situation.

Practically a similar situation can be found at time 02:17 (Fig. 2), when a hypothetical plane is approaching the RWY 04–22 from the SW direction. First it encounters tailwind of 7 m/s near the point of 3 NM to the runway edge, and then headwind of a magnitude of 7 m/s right at the edge of the runway. Consequently, the wind shear is again of a magnitude of

14 m/s (28 kt), but in this situation it is a *headwind gain* along the distance of 3 NM.

8. Conclusions

The most relevant conclusions of the current work may be summarized as follows:

(1) Lidar is able to monitor meteorological situations in high spatial and temporal resolution. This is a very fascinating finding since no similar opportunities have been available so far in the broader area of Central Europe.

(2) Despite the proximity of the lidar at the airport and the radar in the Little Carpathians, it is not possible to directly compare their measurements since there is zero intersection between the atmospheric layers they can reach.

(3) Analysis of low level wind shear and issuing wind shear alerts that meet the ICAO requirements is possible on the basis of lidar observations. On the other hand, in the specific conditions of Bratislava (where radar is elevated and lidar is installed on the plain), radar observations provide useful information on the radial wind speed at the higher levels of the boundary layer but not for the final phases of landing of aircrafts.

In our upcoming works, some further meteorological situations such as gust fronts or stable vertical vortices from the nearby mountains will be analyzed in a similar manner.

Acknowledgements

The research was supported by the Slovak Research and Development Agency (project no. APVV-15-0663 'A Novel Method for Low-level Wind-shear Alert Calculation from Data Measured by LIDAR'). This support is gratefully acknowledged. Furthermore, the co-operation of Marian Juráček, the head of the Remote Sensing Department of the Slovak Hydrometeorological Institute is kindly appreciated.

References

- 1 Chan P. W. Aviation applications of the pulsed Doppler LIDAR – Experience in Hong Kong // The Open Atmospheric Science Journal. 2009. N 3. P. 138–146.
- 2 Chan P. W., Lee Y. F. Application of short-range Lidar in wind shear alerting // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2012. N 29. P. 207–220.
- 3 Hon K. K., Chan P. W. Application of LIDAR-derived eddy dissipation rate profiles in low-level wind shear and turbulence alerts at Hong Kong International Airport // Meteorological Applications. 2014. N 21. P. 74–85.
- 4 Köpp F., Rahm S., Smalikho I. Characterization of aircraft wake vortices by 2- μ m pulsed Doppler lidar // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2004. N 21. P. 194–206.

- 5 ICAO – International Civil Aviation Organization (2015): Manual on Low Level Wind Shear and Turbulence. ICAO Doc. 9817, 1st Edition, 218 p.
- 6 *Bochniček O., Hrušková K.* Climate Atlas of Slovakia. Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, 2015. 131 p.
- 7 *Polčák N., Šťastný P.* The Effect of Relief on Wind Conditions in Slovakia. Matej Bel University, Banská Bystrica; Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, 2010. 132 p. [in Slovak].
- 8 *Polčák N., Šťastný P.* Topography Influence on Wind Conditions of Bratislava. In: Středová, H., Rožnovský, J., Litschmann, T. (eds.). Microclimate and Mesoclimate of Landscape Structures and Anthropogenic Environment, Skalní Mlýn, Czech Republic. 2011. 2–4 February. 14 p. [in Slovak].
- 9 BTS handled last year the biggest number of passengers in history. URL: <https://bit.ly/2TRquUk>, January 17, 2019 (Cited: March 28, 2019).
- 10 About Airport. URL: <https://bit.ly/2K7D6XX> (Cited: March 28, 2019).

УДК 504.06

Динамика показателей радиационного состояния окружающей среды Иркутской области за период 2007–2017 гг.

А. В. Ахтиманкина (anastasiya.ahtimankina@mail.ru)

А. С. Колупов (kolupov.aleksey@mail.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Представлены данные, отражающие динамику среднегодовых значений концентраций суммарной β -активности в приземном слое и атмосферных выпадений суммарной β -активности на постах наблюдений Иркутской области за период 2007–2017 гг.

Ключевые слова: радиация, β -активность, концентрация, атмосферные выпадения, мониторинг, нормирование.

Актуальность

Важнейшей глобальной экологической проблемой биосферы является радиоактивное загрязнение окружающей среды. Современный мир невозможно представить без ядерной энергетики. Медицина, теплоэнергетика, сельское хозяйство и многие другие отрасли не обходятся без использования радионуклидов. Но помимо антропогенных источников радиации в биосфере повсюду есть естественные источники радиоактивности, и человек, как и все живые организмы, постоянно подвергается естественному облучению.

Для Иркутской области тема исследования радиационного состояния окружающей среды является актуальной поскольку на ее территории сосредоточены ряд источников возможного радиационного загрязнения, среди которых:

- районы Усть-Кутский и Осинский, на территории которых проводились подземные ядерные взрывы в мирных целях для нужд промышленности в 1977 и 1982 гг. соответственно;
- предприятие по обогащению урана – ОАО «Ангарский электролизно-химический комбинат» (АЭХК), г. Ангарск;
- пункт хранения радиоактивных веществ – ПХРВ ФГУП «РосРАО» «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами».

Материалы исследования

В данной работе были проанализированы два вида показателей радиационного состояния окружающей среды на территории Иркутской области:

- среднегодовые концентрации суммарной β -активности в приземном слое, Бк/м³;
- среднегодовые атмосферные выпадения суммарной β -активности, Бк/м²;

Измерение данных показателей осуществляется на сети пунктов наблюдений Иркутского УГМС.

Наблюдения за концентрациями суммарной β -активности в приземном слое проводится на основной метеоплощадке Иркутского УГМС. Наблюдение за среднегодовыми атмосферными выпадениями суммарной β -активности осуществляется на 20 станциях Иркутской области. Массив собранных данных охватил период с 2007 по 2017 г.

Стоит отметить, что в период с 2012 по 2017 г., число станций, на которых производились измерения среднегодовых выпадений суммарной β -активности, уменьшилось на 8 объектов.

Результаты и обсуждение

Среднегодовые концентрации суммарной β -активности в приземном слое

В ходе работы с ежегодниками радиационной обстановки на территории Иркутской области [3] была получена информация о среднегодовой суммарной β -активности в приземном слое на станции Иркутского УГМС (табл. 1, рис. 1).

Для дальнейшего анализа полученных данных необходимо остановиться на подходах к нормированию радиационного загрязнения окружающей среды. В соответствии с СанПиН 2.6.1.2523 нормированию подлежат такие показатели как эффективная и эквивалентная дозы, все остальные показатели и, в частности, рассматриваемые в данной работе нормируются по величине фоновых значений, установленных для каждого отдельного региона и пункта наблюдений [1].

Таблица 1

Среднегодовые концентрации суммарной β-активности в приземном слое

Год	Суммарная β-активность, Бк/м ³
2007	14
2008	17
2009	20
2010	28
2011	40
2012	41
2013	64
2014	50
2015	41
2016	44
2017	38

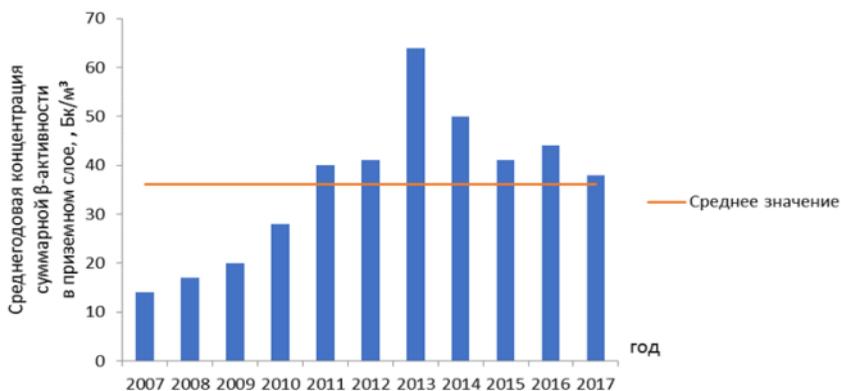


Рис. 1. Динамика среднегодовых концентраций в приземном слое суммарной β-активности

Для территории Иркутской области при расчете и установлении фоновых значений используют положения Руководящего документа 52.18.826-2015 «Наблюдение за радиоактивным загрязнением компонентов природной среды». Согласно РД 52.18.826-2015 фоновый показатель радиационного состояния устанавливается для каждого отдельного пункта наблюдений путем расчета среднего значения за рассматриваемый период (месяц). Таким образом, величина фонового значения изменится от месяца к месяцу. При длительном периоде наблюдений (более года) в качестве фонового рекомендуется применять максимальное значение за календарный год или больший период [2]. Данные подходы не являются корректными в полной мере, поскольку в первом случае происходит сравнение значений показателей радиационного загрязнения с средними значениями этого же показателя.

теля за предыдущий месяц, таким образом фоновое значение изменяется каждый месяц. Во втором случае использование абсолютного максимума за долгосрочный период наблюдений завышает величину фонового показателя. Исходя из этого было принято решение осуществить сравнение ежегодных значений концентраций с средними многолетними значениями концентраций (2007–2017 гг.) рассматриваемого показателя. Данный подход также был использован при анализе данных среднегодовых атмосферных выпадений суммарной β -активности.

Проанализировав график динамики среднегодовых значений концентраций суммарной β -активности, можно сделать вывод, что с 2007 года наблюдается постепенное увеличение значений концентраций в приземном слое и достигает своего максимума, за весь рассматриваемый период, в 2013 г. (64 Бк/м³). В феврале этого же года был зафиксирован максимальный показатель суммарной β -активности в приземном слое – 107 Бк/м³. Данный показатель и повлиял на среднегодовой максимум. Это возможно объяснить минимальным количеством осадков, выпавших на данной территории за февраль 2013 г. Норма суммы осадков в феврале должна составляет 8 мм. За месяц выпало около 4 мм осадков. Эта сумма составляет 50 % от нормы [5]. Также при измерении суммарной β -активности в приземном слое, происходит прогонка атмосферного воздуха через систему накопительных фильтров [2] в результате чего при уменьшении количества осадков увеличиваются значения концентраций β -активности.

Среднегодовые атмосферные выпадения суммарной β -активности

В ходе анализа данных на пунктах наблюдения, для каждого года был выявлен абсолютный максимум среднегодовых атмосферных выпадений суммарной β -активности, а также те посты наблюдений, на которых наиболее часто наблюдались максимальные значения за каждый рассматриваемый период (табл. 2).

Для этих станций, в качестве примера изменения показателей среднегодовых атмосферных выпадений суммарной β -активности, были построены графики (рис. 2–4).

Для наглядного сравнения максимальных и минимальных значений выпадений была выделена станция Иркутск (рис. 5) с минимальными показателями среднегодовых атмосферных выпадений суммарной β -активности.

Таблица 2

Среднегодовые атмосферные выпадения суммарной β-активности Бк/м²

Пункт наблюдения	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Алыгджер	857,9	1113,7	1140,5	999,6	844,4	-*	-*	-*	-*	-*	-*
Ангарск	904,1	1083,6	1115,2	1110,6	992,4	807,1	1117,9	864	1072,7	1141,2	1031,3
Баяндай	1041	1121,4	1042,7	996,8	871,2	1079,3	1040,8	727,8	1092,3	1225,8	1305
Братск	1069,9	1223	1025,3	1169,9	1094,7	781	969,7	847,7	1154,4	1401,8	1250,7
Мамакан	1042	1263,2	970	1157,2	1922,7	989,3	977,9	935,4	1157,8	1398,5	1215,5
Бохан	841,2	1088,6	1167,2	1160,3	955,9	909,8	1085,4	884,2	1098,3	1237,4	1272,4
Железногорск	973,1	1159,7	1158,9	1091,8	907,9	886,2	824,8	986,6	1026,2	1167,6	1155,5
Залари	970,7	1066,4	1102,5	1024,2	1000,6	883,3	897,4	767,8	1256,8	1341,9	1353,3
Зима	1146	1172,6	1137,7	1055,8	977,8	936,2	1058,9	825,6	1132,6	1410,5	1254,4
Иркутск	675,9	737,5	700,3	737	685,3	541,2	667,2	922,6	989	1063	988,8
Ербогачён	1162,8	1174,8	1050,2	1033,3	950	859,2	1205,6	754,8	1084,7	1337	1383,2
Казачинское	1107,5	1226,1	1120,6	1121	982,2	903,2	1037,8	931,1	1192,4	1223,1	1958,3
Качуг	982,6	1296,9	1171,6	1082,7	1003,2	962	980,6	871,1	1098,6	1187,6	1259,5
Киренск	1052,3	1080,4	1161	1084	1001,4	876,5	1046,6	858,2	1217	1424,9	1000,3
Ноканно	967,8	1133,5	1265,2	1077	995,1	-*	-*	-*	-*	-*	-*
Нижнеудинск	989,7	1128,7	1070,9	1010,7	935	783,5	1045,7	852,8	1207,2	1354,2	1267,7
Усолье-Сибирское	895,7	1133,6	1137,4	1078,2	976	1009,5	860	789,5	915,8	1193,1	1131,9
Преображенка	964,7	1110,7	1044	1013,5	953,9	-*	-*	-*	-*	-*	-*
Хомутово	990,9	1050,1	949,9	1105,5	948,8	982,9	997,8	1011,4	1298,3	1330,3	1257,7
Усть-Ордынский	964,9	1072,9	1002,8	1157,4	1093,2	872	1106,5	819,6	1056,8	1229,4	1342,6

*В ежегодниках радиационной обстановки на территории Иркутской области за рассматриваемый период данные отсутствуют.

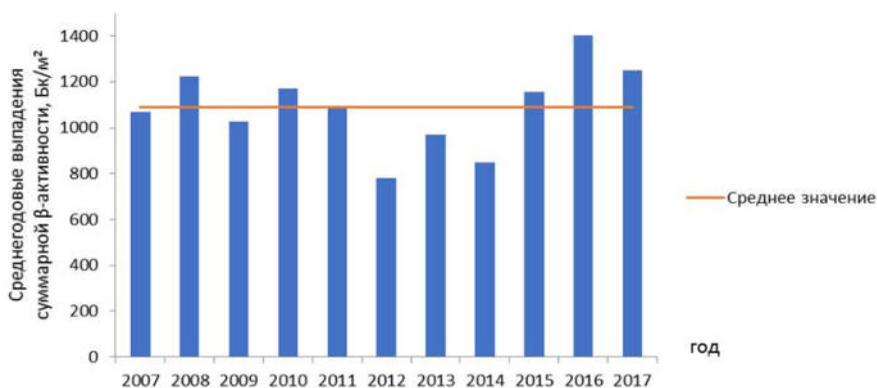


Рис. 2. Среднегодовые значений суммарной β-активности атмосферных выпадений на станции в г. Братске

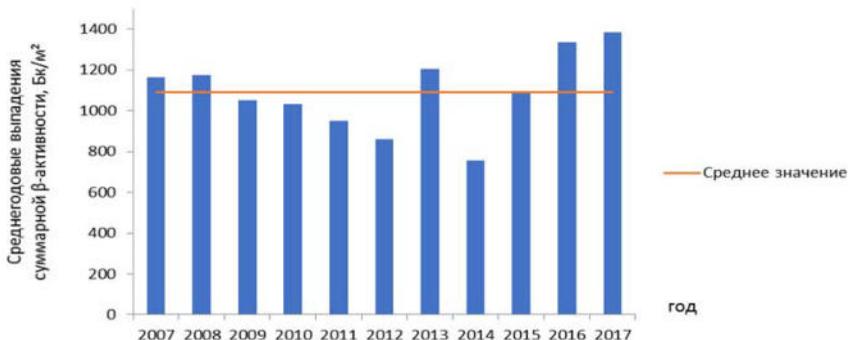


Рис. 3. Среднегодовые значений суммарной β -активности атмосферных выпадений на станции в селе Ербогачён

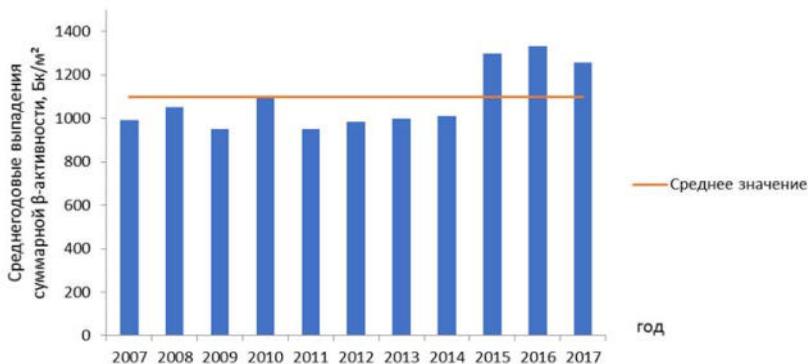


Рис. 4. Среднегодовые значений суммарной β -активности атмосферных выпадений на станции в селе Хомутово

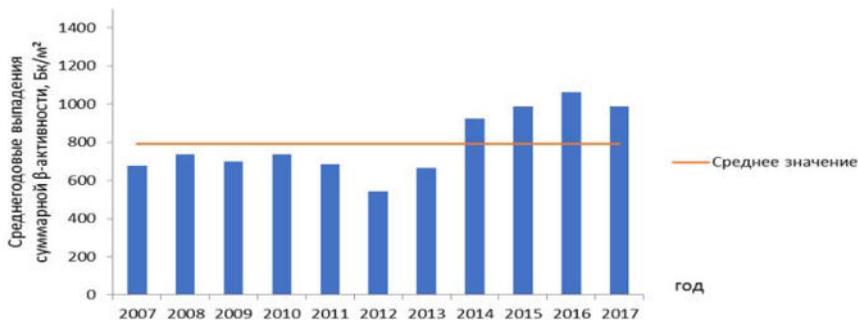


Рис. 5. Среднегодовые значений суммарной β -активности атмосферных выпадений на станции в г. Иркутске

Проанализировав графики среднегодовых выпадений суммарной β -активности, было выявлено, что минимальные показатели на всех станциях (за исключением Хомутово) были зарегистрированы в 2012 и 2014 г. В Братске в июне 2012 г. был зафиксирован абсолютный минимум среднегодовых выпадений суммарной β -активности ($34,6 \text{ Бк/м}^2$). Это может быть связано с малым количеством осадков за данный месяц. Норма суммы осадков в феврале должна составляет 51 мм. За месяц выпало 38 мм осадков. Эта сумма составляет 74 % от нормы. А за 2014 г. минимальные показатели по выпадению суммарной β -активности, фиксировались в мае ($36,9 \text{ Бк/м}^2$) и в июне ($30,3 \text{ Бк/м}^2$). Среднемесячные осадки за этот период составили от 78 до 93 % от нормы выпадений. Недостаток осадков мог отразиться на среднегодовых выпадениях суммарной β -активности.

Анализируя данные, полученные в ходе наблюдений на станции, расположенной в с. Ербогачён (рис. 3), был выявлен резкий скачок показателя выпадений суммарной β -активности в 2013. Как оказалось, рекордный показатель наблюдался в ноябре (164 Бк/м^2). Оказалось, что данный показатель напрямую связан с количеством осадков, выпавших в ноябре 2013 г. Норма суммы осадков в ноябре для села Ербогачён – 27 мм, выпало осадков – 209 % (59 мм). Данное количество осадков оказалось рекордной для ноября в селе Ербогачён за весь период метеонаблюдений на данной станции.

Также стоит заметить, что значения показателей суммарной β -активности на станции Хомутово (рис. 4) не сильно варьировались на протяжении всего рассматриваемого периода. Не наблюдалось резких скачков или понижений показателей.

На станции Иркутск (рис. 5) среднее значение показателей выпадения суммарной β -активности на протяжении всего рассматриваемого периода имеет минимальное значение из всех рассмотренных станций (791 Бк/м^2).

Следует отметить тот факт, что на всех четырёх станциях за последние три года наблюдений, можно проследить заметное увеличение среднегодовых выпадений суммарной β -активности. В качестве первопричины было проанализировано количество осадков за период с 2007 по 2017 г., но аномальных отклонений по данным Иркутского УГМС в данных районах отмечено не было.

Причина может быть связана с возрастанием в регионе антропогенной нагрузки на окружающую среду. К примеру, выбросы основных загрязняющих веществ в атмосферу стационарными источниками. Если в 2014 г. этот показатель был $443,663 \text{ тыс. т}$ в год, то к

2017 г. он увеличился до 466,419 тыс. т в год [4]. Прежде всего, это воздействие деятельности таких предприятий, как Ново-Иркутская ТЭЦ, Братский алюминиевый завод, Иркутский авиационный завод и многих других объектов регионального и федерального значения.

Выводы

Выявленные особенности динамики показателей радиационного состояния окружающей среды Иркутской области указывают на необходимость дальнейшего мониторинга радиационной обстановки. В то же время представляется важным уточнение подходов к нормированию радиационного воздействия.

Исследования проводятся при финансовой поддержке гранта РФФИ 17-29-05045.

Список литературы

1. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности : сб. Гос. стандарты. М. : Изд-во стандартов, 2009.
2. РД 52.18.826-2015. Наблюдения за радиоактивным загрязнением компонентов природной среды: по состоянию на 26.06.2015 г. М. : Росгидромет, 2015. 96 с.
3. Ежегодники о радиационной обстановки на территории Иркутской области с 2007 по 2017 г. Иркутск : Иркут. УГМС, 2007–2017.
4. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области [Электронный ресурс] : сайт. URL: <http://irkobl.ru/sites/ecology/2017> (дата обращения 09.04.2019).
5. Климатический мониторинг [Электронный ресурс] : сайт. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php> (дата обращения 12.04.2019).

УДК 504.3.054

Влияние динамических процессов на вариации приземного озона и других малых газовых примесей вблизи береговой зоны оз. Байкал в 2018 г.

Т. С. Бальжанов (lmza@mail.ru)

А. С. Заяханов

Г. С. Жамсуева

В. В. Цыдыпов

Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ

Аннотация. Приведены результаты измерений приземной концентрации озона, окислов азота вблизи береговой зоны оз. Байкал в 2018 г. Выявлены некоторые особенности структуры и динамики метеорологических процессов в приземном слое атмосферы в береговой зоне оз. Байкал, влияющих на высотный профиль приземного озона и его суточные вариации.

Ключевые слова: атмосфера, Байкал, озон, окислы азота.

Исследование тропосферного озона в настоящее время представляет значительный интерес с точки зрения его влияния не только на климат, но и на биосферу в целом. Большая часть озона находится в стратосфере, где он играет положительную роль, защищая биосферу от жесткого ультрафиолетового излучения. В тропосфере озон играет ключевую роль в фотохимических реакциях, особенно в нижней её части – пограничном слое, здесь он является вторичным загрязнителем воздуха, образуясь из газов-предшественников. Также озон определяет окислительный потенциал тропосферы в силу своей высокой реакционной способности. Кроме того, являясь сильно токсичным газом, озон оказывает отрицательное воздействие на биосферу [9]. Все эти свойства тропосферного озона требуют детального исследования его пространственно-временной изменчивости и понимания механизмов его генерации, переноса и стока в пограничном слое атмосферы. Концентрация приземного озона определяется многими факторами, такими как вертикальная устойчивость атмосферы, горизонтальный и вертикальный перенос, фотохимическое образование и разрушение, которые нелинейно зависят от температуры, солнечной радиации, концентраций оксидов азота, летучих органических соединений, радикала ОН и пр. Многообразие природно-климатических условий, метеорологических ситуаций обуславливает и особенности вариаций приземной концентрации озона. Основные закономерности образования, трансформации и переноса приземного озона достаточно подробно изучены и изложены в многочисленных публикациях, наиболее полно они систематизированы в [1; 4; 9]. Однако имеет место и некоторые особенности в поведении озона в специфических условиях, которым уделялось мало внимания, такие как феновые явления [2], горно-долинная циркуляция [3; 6], бризовые явления. Особенно вблизи крупных водных объектов, таким как оз. Байкал, за счет его мощного термического воздействия на побережье, что порождает значительные отклонения воздушных потоков системы горно-долинной и бризовой циркуляции в регионе и оказывает существенное влияние на содержание озона и его суточную изменчивость [5; 7].

Для изучения влияния региональных особенностей бризовых циркуляций на суточную изменчивость приземного озона и других газовых примесей были продолжены специальные градиентные измерения с использованием 30-метровой высотной мачты на юго-восточном побережье оз. Байкал (научный стационар «Боярский») в весенние и летние месяцы 2018 г. Отбор проб воздуха для определения содержания приземного озона, окислов азота, диоксида серы проводился на двух высотах: 2 м и 20 м над уровнем земли. Для проведе-

ния наблюдений использовались газоанализаторы: озона – 3-02 П-А, окислов азота – Р-310, диоксида серы С-310 (ЗАО «ОПТЭК»). Одновременно на этих же высотах проводились измерения метеорологических и турбулентных параметров атмосферы с помощью акустических метеокомплексов АМК-03, «ЭКСМЕТЕО».

Бризовая циркуляция на Байкале наиболее заметно проявляется в береговой зоне озера в летнее время, когда наблюдается максимальный приход тепла от солнца днем и длинноволнового излучения от подстилающей поверхности ночью. По радиационному показателю развитие бризовой циркуляции на юге Байкала возможно даже в апреле: радиационный показатель на склонах южной экспозиции равен 0,86–0,93 [8]. Однако весной дней благоприятных для возникновения местных циркуляций значительно меньше, чем в летние месяцы. Проведен сравнительный анализ влияния бризовых явлений на временную изменчивость малых газовых примесей, таких как озон, диоксид серы, окислы азота в разные сезоны года.

На рисунке 1 представлен усредненный ход концентрации О₃ на разных уровнях 2 м и 20 м для двух разных сезонов: весна (28.05–06.06.18) (а), лето (12.07–23.08.18) (б).

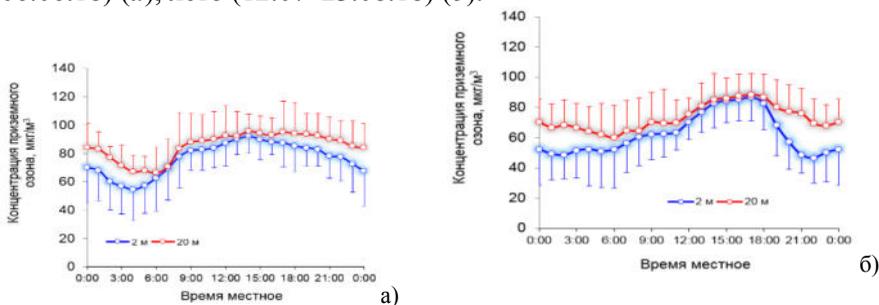


Рис. 1. Среднесуточные концентрации озона на высотах 2 м и 20 м за период: а) (28.05–06.06.18); б) (12.07–23.08.18)

Как видно из рис. 1 наблюдаются существенные различия в суточных вариациях озона в приповерхностном слое 2 м и в приземном слое на высоте 20 м, где влияние подстилающей поверхности заметно снижается. Суточный ход озона на высотах удаленных от земли (20 м) более сглаженный, чем у поверхности земли (2 м). Наибольшие расхождения наблюдаются в вечерние, ночные часы. В дневное время с ростом температуры и с усилением турбулентных процессов в приземном слое атмосферы концентрации озона на разных высотах выравниваются. В весенние месяцы концентрации озона в среднем вы-

ше, чем летом. На рисунке 2 более детально представлены результаты измерений суточной изменчивости концентрации озона, диоксида азота, диоксида серы, ветровых характеристик (направление и скорость ветра), температуры на разных высотах 2 и 20 м. По результатам наблюдений отмечены некоторые особенности в формировании бризовой циркуляции. В дневные часы в условиях бризовых ситуаций преобладающим направлением ветра является перенос воздушных масс с озера, в вечерние и утренние часы с суши. В утренние часы коротковолновая солнечная радиация сильнее нагревает сушу по сравнению с озером, создавая горизонтальный градиент температуры поверхности и приземного пограничного слоя атмосферы, а следовательно, и горизонтальный градиент давления. В результате над сушей днем развивается конвективный пограничный слой, понижается давление, и далее возникает приток на сушу холодного устойчиво стратифицированного воздуха с озера, который приводит к резкому снижению температуры в приземном слое атмосферы в эти часы (рис. 2, в, г). В этот период также наблюдаются увеличение концентрации антропогенных газов (NO_2 , SO_2) за счет их переноса с акватории озера (рис. 2, а, б).

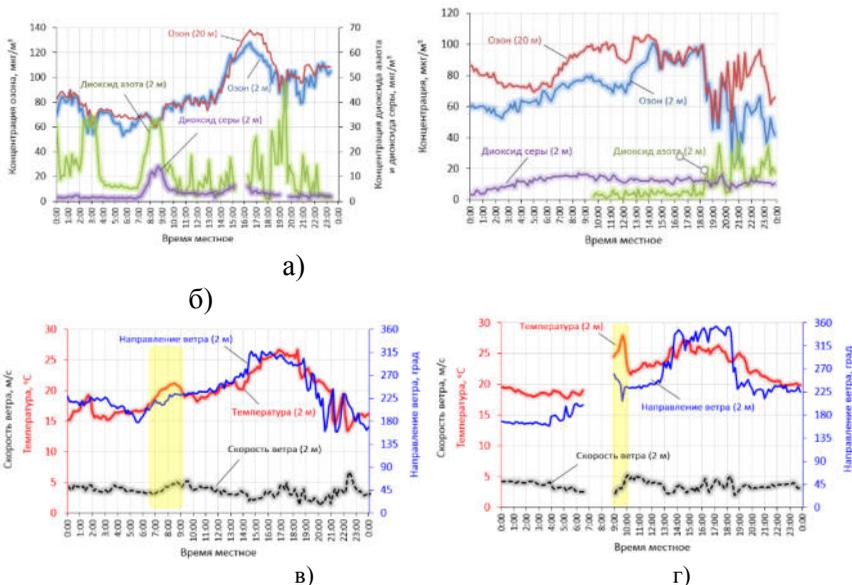


Рис. 2. Суточный ход приземного озона на высотах 2 и 20 м, диоксида азота, диоксида серы (а, б), температуры воздуха, направления и скорости ветра на 2 м (в, г) за период: 31 мая (а, в); 31 июля (б, г)

После прогрева земной поверхности и усиления конвективных потоков в приземном слое атмосферы наблюдается усиление и развитие дневного бриза. В вечерние часы с ослаблением дневного и развитием ночного бриза наблюдается резкое падение концентрации озона, более существенное в нижнем приземном слое (2 м).

Работа выполнена в рамках базового финансирования проекта № 0336-2019-0007, часть работ по проведению высотных измерений малых газовых примесей проведена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-35-00143 мол_а).

Список литературы

1. Белан Б. Д. Озон в тропосфере. Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 487 с.
2. Демин В. И., Белоглазов М. И., Мокров Е. Г. Феновые эффекты над Хибинами в изменениях концентрации приземного озона // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 7. С. 613–617.
3. Демин В. И., Белоглазов М. И. О влиянии местных циркуляционных процессов на динамику приземного озона // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 4. С. 331–333.
4. Звягинцев А. М., Кузнецова И. Н. Изменчивость приземного озона в окрестностях Москвы: результаты десятилетних регулярных наблюдений // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2002. Т. 38, № 4. С. 486–495.
5. Влияние динамических процессов на вариации озона и других малых газовых примесей вблизи береговой зоны озера Байкал / А. С. Заяханов, Г. С. Жамсуева, В. В. Цыдыпов, Т. С. Бальжанов // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 6. С. 505–511.
6. Результаты мониторинга приземного озона в атмосфере г. Улан-Удэ / А. С. Заяханов, Г. С. Жамсуева, В. В. Цыдыпов, Т. С. Бальжанов // Метеорол. и гидрол. 2013. № 12. С. 76–84.
7. Суточная динамика озона и других малых газовых примесей в прибрежной зоне озера Байкал (стационар «Боярский») / А. С. Заяханов, Г. С. Жамсуева, В. В. Цыдыпов, Т. С. Бальжанов // Метеорол. и гидрол. 2017. № 8. С. 85–92.
8. Мизандронцева К. Н. О бризах на Байкале // Климат и климатические ресурсы Байкала и Прибайкалья. М. : Наука, 1970. С. 26–39.
9. Перов С. П., Хргиан А. Х. Современные проблемы атмосферного озона. Л. : Гидрометеоиздат, 1980. 288 с.

УДК 551.5+(571.63)

Оценка климатической повторяемости путей переноса аэрозолей морского происхождения на территорию Приморья по данным реанализа для исследования поступления морского биоматериала в атмосферу региона

С. А. Громов (Sergey.Gromov@igce.ru)^{1,2}Д. А. Галушин (galushin2012@yandex.ru)^{1,4}М. С. Которова (mkotorova@igce.ru)^{1,3}В. Д. Смирнов (vsmirnov327@gmail.com)¹¹ Институт глобального климата и экологии им. акад. Ю. А. Израэля, г. Москва² Институт Географии РАН, г. Москва³ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва⁴ РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, г. Москва

Аннотация. Дан анализ переноса воздушных масс за период с июня по август 2018 г. по станциям мониторинга ХСО (химического содержания осадков) Приморского края (Приморская, Сад-Город и Терней). Проведена оценка распределения приходящих траекторий по секторам происхождения воздушных масс. Определено соотношение морских и континентальных траекторий для каждого пункта наблюдения за летний сезон 2018 г.

Ключевые слова: атмосферный перенос, траектории, климатология.

Введение

Атмосферные аэрозоли над океаном образуются преимущественно в результате ветрового разбрызгивания капель морской воды и их последующего испарения. Капли образуются при сдувании ветром брызг и пены с гребней волн, при ударах в ходе выпадения атмосферных осадков на водную поверхность, разбрызгивании в прибойной зоне побережий. Основным химическим компонентом морских аэрозолей является хлорид натрия, однако в их составе присутствуют сульфаты, ионы калия, магния, кальция, бикарбонаты. В составе аэрозолей также формируются частицы органического происхождения, как результат жизнедеятельности морских растений, а также распространения спор и другого репродуктивного биоматериала. По оценкам разных авторов, выпадение морских солей на подстилающую поверхность океанических островов и в прибрежных районах континентов варьируется от 3 до 4 т/км² в год, максимальные значения достигают 470 т/км² в год [1].

Цели и задачи исследования

Для оценки условий формирования состава образцов выпадающего аэрозольного материала, накопленных за периоды отбора месяц и более, необходимо проанализировать вклады воздушных масс разного происхождения. Исследование путей поступления требовалось провести на большом материале, сгруппировав пути поступления воздуха на морские и континентальные, не только характерные значения метеорологических параметров, но и состав аэрозолей которых был сформирован путем трансформации над сушей или морской акваторией.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи: 1. Провести анализ обратной траектории для определения происхождения воздушных масс (за каждый день). 2. Провести группировку траекторий по секторам направления для оценки вклада воздушных масс морского и континентального происхождения. 3. Для каждого из 3-х пунктов наблюдения рассчитать повторяемость приходящих траекторий за летний сезон (июнь – август 2018 г.) по секторам происхождения.

Методы и материалы

Для оценки переноса использовалась гибридная модель восстановления лагранжевой комплексной траектории объема воздуха (HYSPLIT) [2] Национальной лаборатории атмосферных исследований (ARL NOAA) США. HYSPLIT представляет собой не только систему для вычисления траекторий, но и программное средство для моделирования переноса загрязняющих веществ с учетом процессов рассеивания, химического преобразования и осаждения [3]. HYSPLIT продолжает оставаться одной из наиболее широко используемых моделей атмосферного переноса и рассеяния в области физики атмосферы [4]. Мы использовали одно из наиболее распространенных модельных приложений – анализ обратной траектории для определения происхождения воздушных масс и установления отношений источник-рецептор.

Для летнего сезона 2018 г. были построены и проанализированы ежесуточные траектории приходящих воздушных масс для трех пунктов наблюдения за химическим составом осадков (ХСО) на территории Приморья – станция Приморская: 43,62 с. ш. и 132,23 в. д.; станция Сад-Город: 43,25 с. ш. и 132,02 в. д.; станция Терней: 45,03 с. ш. и 136,36 в. д. (рис. 1).

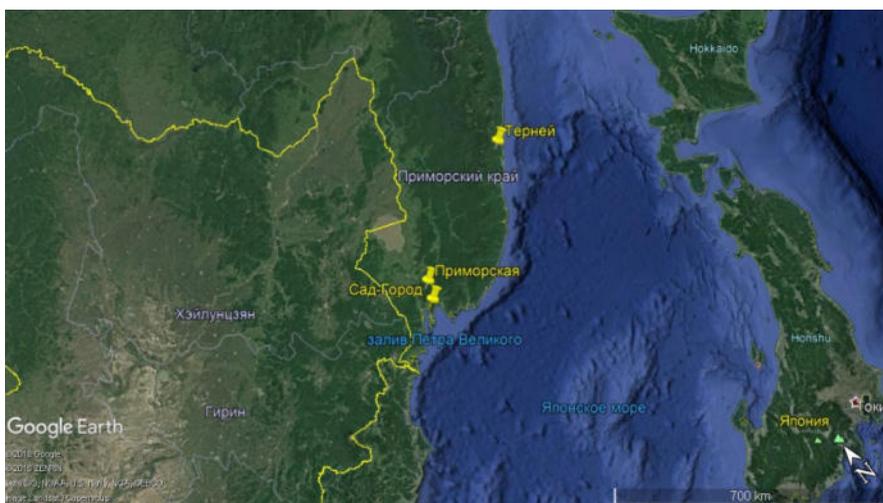


Рис. 1. Расположение пунктов наблюдений

Для начального времени расчета приходящих (обратных) траекторий была выбрана середина суточного (24 часового) периода отбора пробы, начинающегося с 9 утра каждого дня. За период с июня по август было определено 273 приходящих траекторий (по 91 на станцию).

Результаты

Результаты были сгруппированы по секторам, соответствующим направлениям прихода морских или континентальных (трансформировавшихся над сушей) воздушных масс. Примеры поступления воздуха с акватории прибрежных морей и Тихого океана («морские» траектории) представлены на рис. 2, для поступления из районов суши («континентальные») – на рис. 3.

За летний период 2018 г. для станции Приморская зарегистрировано 52,7 % случаев приходящих траекторий с континента (преимущественно из Китая) и 47,3 % с морских акваторий (рис. 4).

Для станции Сад-Город за летний период было отмечено 51,6 % случаев траекторий, приходящих с континентальной части (из них более 20 % – Китай), а также 48,4 % случаев приходящих траекторий с моря (рис. 5).

Результаты анализа показывают, что соотношение приходящих траекторий с морской акватории и с континентальной части для пунктов Приморская и Сад-Город примерно одинаково. Причина – близость расположения этих метеостанций (около 50 км). Это значит, что

на основании полученных данных, для учета различия в поступлении морского биоматериала в атмосферу всего региона и его вариации можно использовать только данные для пунктов Приморская и Терней (расстояние между этими пунктами составляет 420 км).

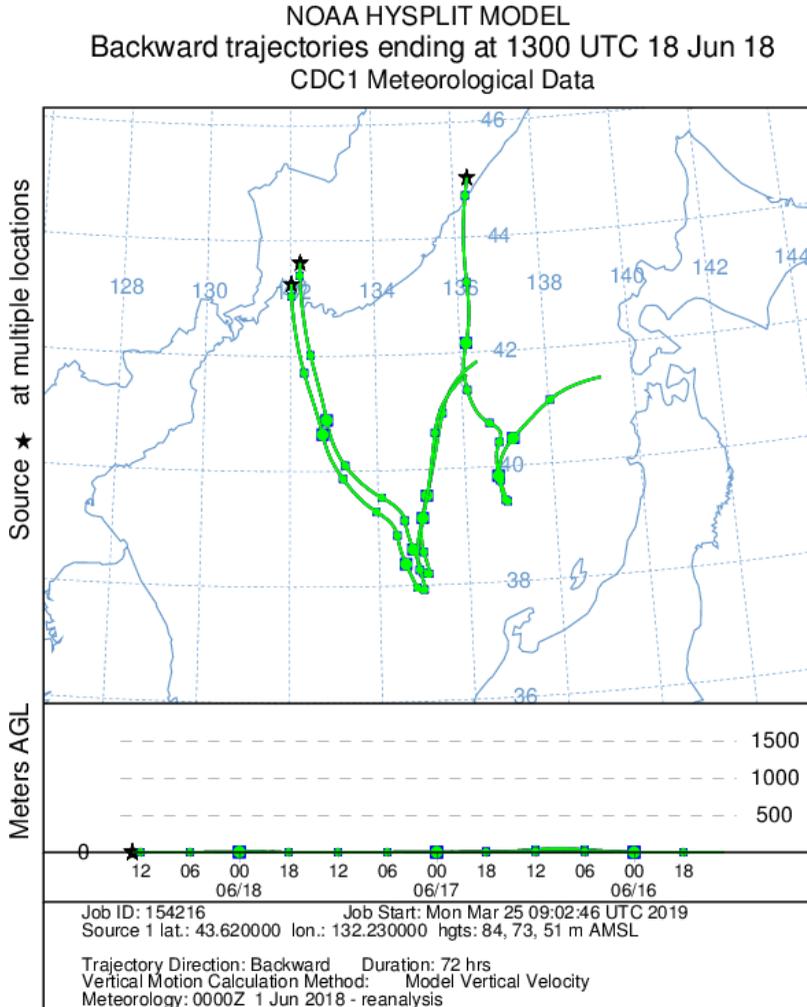


Рис. 2. Пример поступления воздушных масс с морской акватории («морские» траектории) (18 июня 2018 г.)

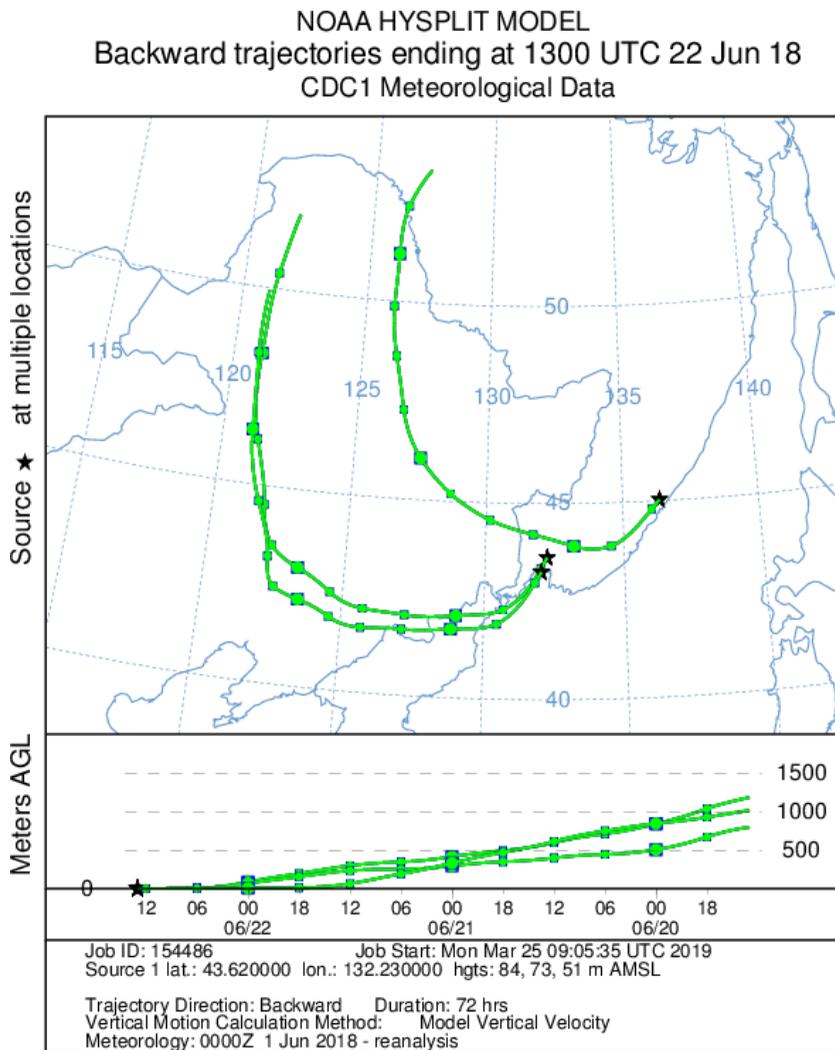


Рис. 3. Пример поступления воздушных масс из районов суши («континентальные») (22 июня 2018 г.)

Для станции Терней характерны траектории, приходящие с моря (73,6 %). На континентальные переносы приходится 26,4 %. Доля воздушных масс, перемещавшихся в пределах территории России, составила 14,3 % (рис. 6).

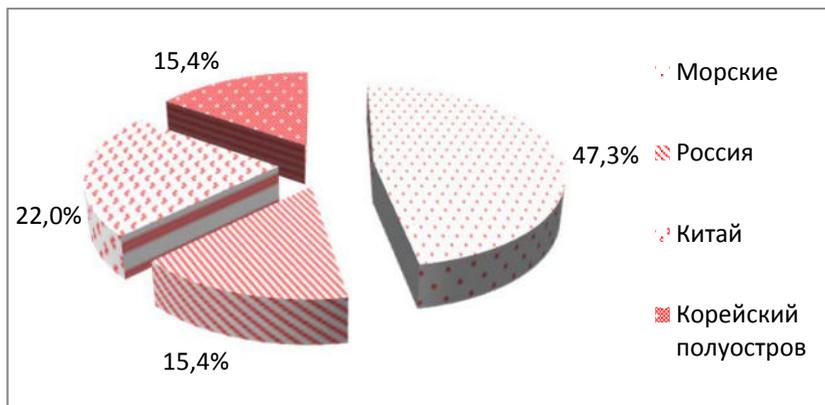


Рис. 4. Распределения приходящих траекторий по секторам для станции Приморская

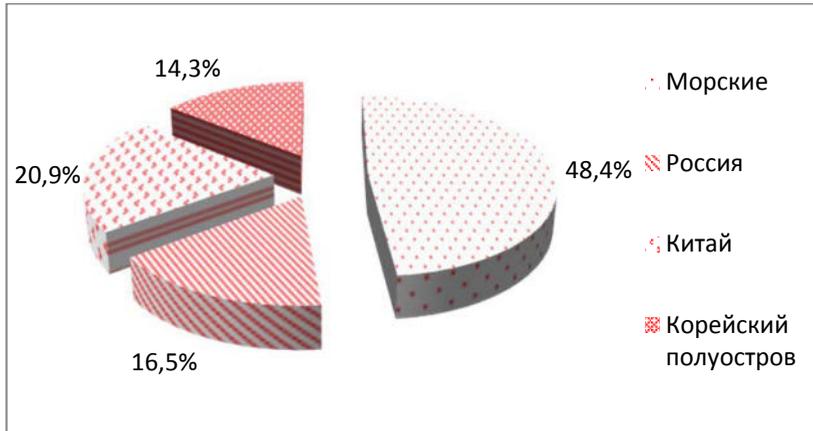


Рис. 5. Распределение приходящих траекторий по секторам для станции Сад-Город

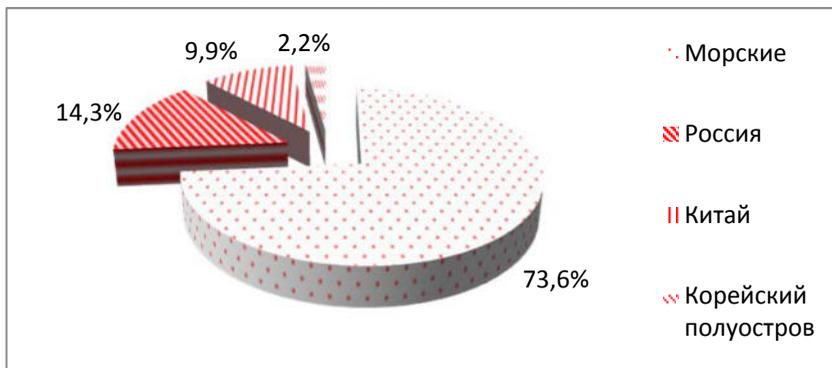


Рис. 6. Распределение приходящих траекторий по секторам для станции Терней

Выводы

Проведенный анализ для трех пунктов наблюдений за химическим составом осадков на территории Приморья для летнего периода 2018 г. показывает, что в северо-восточной части региона поступление воздушных масс с моря в 1,5 раза больше, чем на юге Приморья (до 74 % «морских» траекторий на станции Терней и около 48 % – станции Приморская и Сад-Город).

Вклад переносов воздушных масс, трансформировавшихся над территорией России, примерно одинаков для обоих пунктов (15,4 % для станции Приморская и 14,3 % для станции Терней).

Поступление воздушных масс с территории Китая в район пункта Приморская в 2 раза больше, чем для района пункта Терней (22,0 и 9,9 %, соответственно).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта № 19-55-53030 «Характеристика аэрозолей биологического происхождения (грибы) в прибрежных регионах морей: исследование на Дальнем Востоке и в Южном Китае».

Список литературы

1. Аэрозоли в атмосфере Земли / Гис-аналитик центр [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ivmi-center.ru/news/214-2009-10-22-07-54-48> (дата обращения 20.03.19).
2. Air Resources Laboratory – HYSPLIT – Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory model [Электронный ресурс]. URL: <https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.
3. Draxler R. R., Hess G. D. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition // Aust. Meteor. Mag. 1998. Vol. 47. P. 295–308.
4. NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System / A. F. Stein, R. R. Draxler, G. D. Rolph, B. J. B. Stunder, M. D. Cohen, F. Ngan // Bulletin of the American Meteorological Society, 2015. Vol. 96, N 12. P. 2059–2077.

УДК 551.515.4

Оценка WRF облачных микрофизических схем для прогнозирования сильных дождей в западной и центральной Монголии

Л. Жамбажамц (jambajamts@num.edu.mn)

Б. Ганболд (b.ganbold@num.edu.mn)

Монгольский государственный университет

Аннотация. Событие выпадения осадков, наблюдавшееся над западной и центральной Монголией 8–9 августа 2016 г., являющееся высокогорным внутренним регионом, моделируется с использованием модели метеорологических исследований и прогнозирования с использованием схемы семи балк-микрофизик. Вся модель имеет тенденцию недооценивать количество накопленных осадков за 24 часа по сравнению с данными GPM и HAMMOС. Показано также самое минимальное среднее значение смещения, схема NSSL с двумя моментами и максимальное среднее значение смещения показывают схемы с одним моментом. Минимальное среднеквадратичное значение отклонения показано схемами NSSL и Моррисон с двумя моментами.

Ключевые слова: Осадки, схема балк-микрофизики, GPM, модель WRF, Монголия.

Введение

Большой интерес представляет возможность вычисления накопления поверхностных осадков на основе выходных данных мезомасштабных численных моделей прогнозирования погоды. Важными преимуществами этих моделей, которые могут быть использованы для решения этой проблемы, являются высокая надежность и пространственная детализация краткосрочного прогноза осадков. Модель WRF-ARW успешно используется в Монголии, разрабатываются и анализируются как локальные модели облаков и осадков (двухмерные и трехмерные) [1]. Метод параметризации конвекции и микрофизики привел к широкому распространению мезомасштабной модели WRF (Weather Research and Forecasting).

Схема облачной микрофизики, которая в явном виде представляет облачные микрофизические процессы в масштабе решетки, как правило, подразделяется на две ветви; Схема балк-микрофизики и схема спектральной бин-микрофизики. Обе модели имеют некоторые общие характеристики представления облачных микрофизических процессов, например, обе модели обычно классифицируют гидрометеоры на несколько типов. Тем не менее, они показывают различия в подходах. В балк-микрофизик модели предполагается, что распреде-

ление по размерам каждого типа гидрометеора имеет определенную форму распределения (например, гамма-распределение) и коэффициент смешивания (а также числовую концентрацию и радиолокационную отражательную способность в некоторых моделях) каждого гидрометеора в каждом блоке сетки модели прогнозируется, что используется для указания формы распределения.

В настоящей статье представлены результаты моделирования интенсивной конвекции на территории западной и центральной Монголии 8–9 августа 2016 г.

Описание модели и экспериментальная установка

Для численного моделирования, описанного выше случая, используется модель Weather Research and Forecasting (WRF) v4.0.3 [14]. Установлены три однонаправленных вложенных домена с размерами горизонтальной сетки 27, 9 и 3 км (рис. 1). Схема RRTMG [8] используется для параметризации как коротковолнового, так и длинноволнового излучения, схема YSU [5] предназначена для планетарного пограничного слоя, а схема Каина-Фритша [9] предназначена для кучевых облаков в масштабе подсеток только в самой внешней области. Модель WRF интегрируется в течение 36 часов, начиная с 12 UTC 07 августа 2016 г. Первый 12-часовой период рассматривается как период раскрутки модели, необходимый для адаптации модели к начальным условиям. Последние 24-часовые данные моделирования используются для анализа.

WPS Domain Configuration

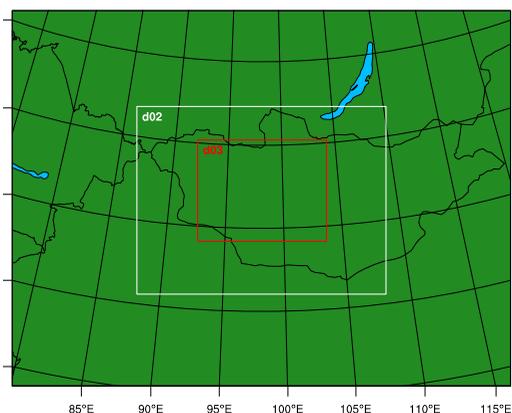


Рис. 1. Три вложенных вычислительных домена

С 12 UTC 07 до 00 UTC 9 августа 2016 г. произошло сильное выпадение осадков в западно-центральной области Монголии. На станции Байдраг (код станции ВМО: 44276) количество суточных накопленных поверхностных осадков составляло 51,7 мм, а на станции Баянцагаан (код станции ВМО: 44326) (к югу от станции Байдраг) – 35,8 мм и на станции Номруг (код станции ВМО: 44220) (к северо-западу от станции Байдраг), количество составило 29,7 мм. Для справки, среднее количество годовых осадков в Монголии составляет около 260 мм, и согласно этой климатической характеристике количество осадков в этот день около 20 мм можно считать особым событием в Монголии, на долю которого приходится около одной десятой среднего годового количество осадков.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 показаны три односторонних вложенных вычислительных домена: внешний домен (домен 1) с размер горизонтальной сетки 27 км, внутренний домен (домен 2 с размером горизонтальной сетки 9 км) и большая часть внутреннего домена (домен 3 с размером горизонтальной сетки 3 км).

Данные временного повторного анализа ERA [3] используются для предоставления начальных и граничных условий для модели WRF. Таблица 1 показывает экспериментальную установку.

Таблица 1

Экспериментальная установка

	Домен 1	Домен 2	Домен 3
Размер сетки по горизонтали	121×91	181×136	280×220
Горизонтальный размер сетки	27 км	9 км	3 км
Номер вертикальной сетки	42	42	42
Шаг времени	60 сек.	20 сек.	20 сек.
Начальные/граничные условия	ERA-Interim reanalysis		

Моделирование модели оценивается с использованием данных наблюдений. Для этого смоделированы двухметровая температура, поверхностное давление и 10-метровая скорость и направление ветра в случае WSM6 и NSSL сравниваются с наблюдаемыми от автоматическая метеостанция (Вайсала –AWS330) на рис. 2.

На рисунках 3, *a–i* показаны распределения поверхностных осадков моделируемого количества в самой внутренней области по семи балк-микрофизическим схемам (WSM6 [5], Нью-Томпсон [15], NSSL-одиночный момент [4], Милбрандт-Яу [12], Моррисон). [13], WDM6

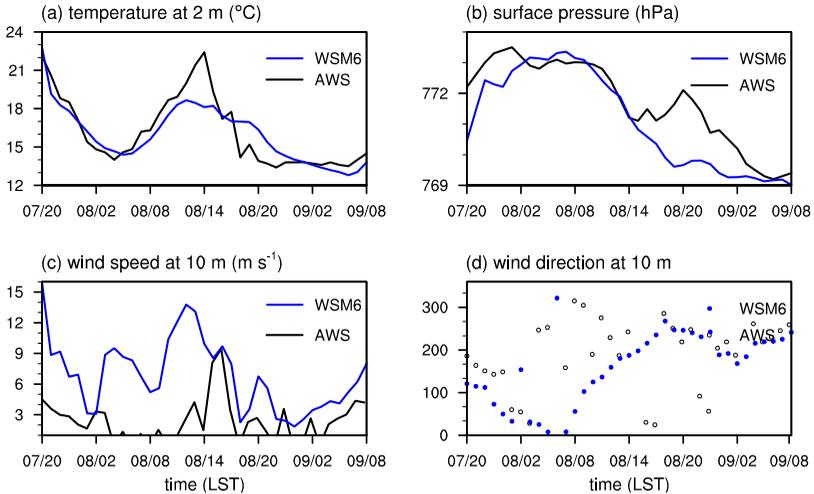
[10] и NSSL с двойным моментом [11]) и наблюдаемое количество с 00 UTC 08 до 00 UTC 9 августа 2016 г. Данные наблюдений взяты из комплексного поиска нескольких спутников для GPM, где GPM обозначает Global Precipitation Measurement (рис. 3, *h*) и дождемера получены от Национального агентства по метеорологии и мониторингу окружающей среды (НАММОС) Монголии (рис. 3, *i*). Набор данных GPM, использованный в этом исследовании, представляет собой оценку осадков с нескольких спутников с калибровкой калибровки (финальный прогон) и имеет горизонтальное разрешение $0,1^\circ$ и временное разрешение полчаса [7]. Поскольку многие части района исследований являются отдаленными горными районами, число метеорологических обсерваторий (42) недостаточно велико для получения полей распределения осадков с высоким пространственным разрешением.

Результаты показывают, что схемы с двумя моментами NSSL и Милбрант (облачные капли, капли дождя, ледяные кристаллы, снег, крупа и град) имитируются лучше всего в поле сильных дождей по сравнению с данными GPM. Вся модель имеет тенденцию недооценивать количество накопленных осадков за 24 часа по сравнению с данными GPM и НАММОС. Сравнение проводилось по общему количеству осадков на метеостанциях и в модельных ячейках, соответствующих местоположению станций. Показано также самое минимальное среднее значение смещения, схема NSSL с двумя моментами и максимальное среднее значение смещения показывают схемы с одним моментом. Минимальное среднеквадратичное значение отклонения показано схемами NSSL и Моррисон с двумя моментами.

Заключение

Вся модель имеет тенденцию недооценивать количество накопленных осадков за 24 часа по сравнению с данными GPM и НАММОС. Показано также самое минимальное среднее значение смещения, схема NSSL с двумя моментами и максимальное среднее значение смещения показывают схемы с одним моментом. Минимальное среднеквадратичное значение отклонения показано схемами NSSL и Моррисон с двумя моментами.

WSM6



NSSL

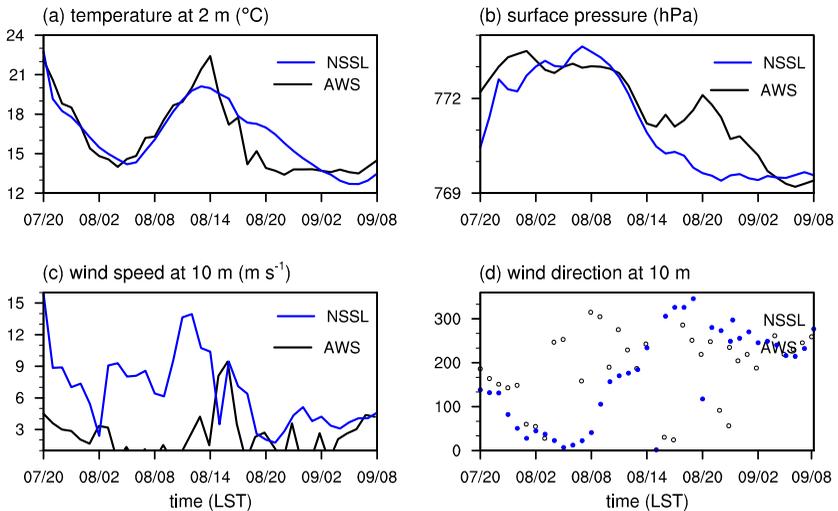


Рис. 2. Временные ряды (а) температуры на 2 м, (б) давления, (с) скорости ветра на 10 м и (д) направления ветра на 10 м с 00 UTC 08 до 00 UTC 9 августа 2016 г., наблюдаемые и моделируемые на станции Баянбулаг (код станции ВМО: 44275), которая является доменным центром. Случаи моделирования: одиночный момент (WSM6) и двойной момент (NSSL)

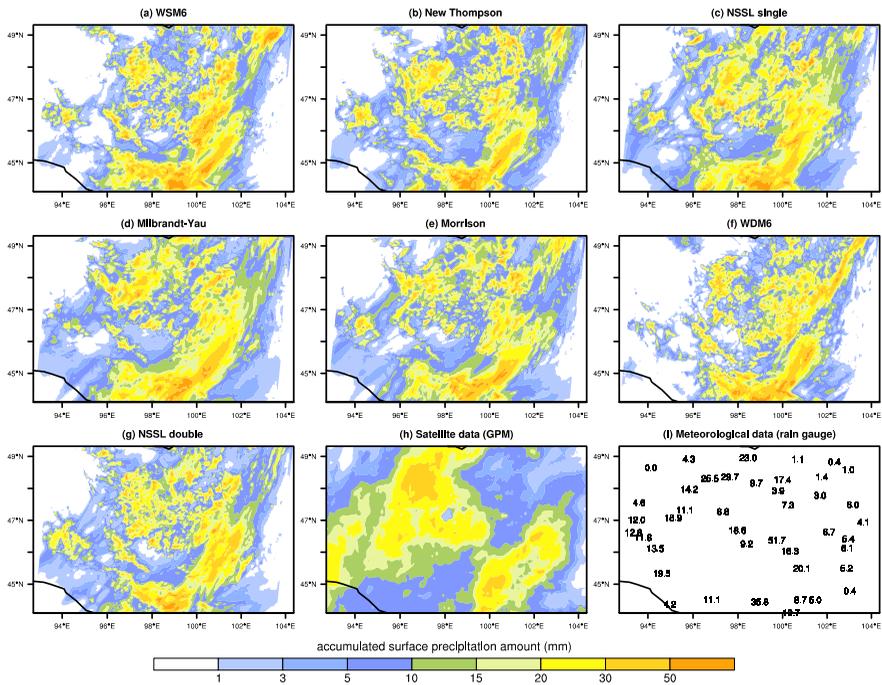


Рис. 3. Распределение накопленного количества поверхностных осадков за период с 00 UTC 08 до 00 UTC 9 августа 2016 г.: (a–g) результаты моделирования по семи объемным схемам, (h) интегрированные много спутниковые извлечения данных GPM, (i) данные дождемера от Национального агентства по метеорологии и мониторингу окружающей среды (НАММОС) Монголии. Обратите внимание, что рис. 3, i построен с использованием данных дождемера в 42 метеорологических обсерваториях

Благодарность

Первого автора поддержал «БСШУСЯ – Пост доктор гранта», MFST-№ ШУДо-2018/04.

Список литературы

1. Жамбажамц Лхамжавын, Цоцол Маналжавын, Аргучинцев В. К. Исследование конвекции с использованием численной модели Кайна-Фритца // Изв. ИГУ. Сер. Науки о Земле. 2012. Т. 5, № 1. С. 186–194.
2. Dagvadorj D., Coauthors. Mongolia Assessment Report on Climate Change 2009. MARCC, 2009. 228 p.
3. Dee D. P., Coauthors. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 2011. N 137. P. 553–597.
4. Gilmore M. S., Straka J. M., Rasmussen E. N. Precipitation uncertainty due to variations in precipitation particle parameters within a simple microphysics scheme // Mon. Wea. Rev. 2004. N 132. P. 2610–2627.

5. *Hong S.-Y., Lim J.-O. J.* The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6) // J. Korean Meteor. Soc. 2006. N 42. P. 129–151.
6. *Hong S.-Y., Noh Y., Dudhia J.* A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. Monthly Weather Review. 2006. N 134. P. 2318–2341.
7. *Huffman G., Bolvin D. T., Nelkin E. J.* Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) technical documentation // NASA Goddard Space Flight Center. 2015. 54 p.
8. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models / M. J. Iacono, J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M. W. Shephard, S. A. Clough, W. D. Collins // Journal of Geophysical Research. 2008. N 113. D13103.
9. *Kain J. S.* The Kain-Fritsch convective parameterization: An update // Journal of Applied Meteorology. 2004. N 43. P. 170–181.
10. *Lim K.-S. S., Hong S. Y.* Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models // Mon. Wea. Rev. 2010. N 138. P. 1587–1612.
11. *Mansell E. R., Ziegler C. L., Bruning E. C.* Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics // J. Atmos. Sci. 2010. N 67. P. 171–194.
12. *Milbrandt J. A., Yau M. K.* A Multi moment Bulk Microphysics Parameterization. Part IV: Sensitivity Experiments // J. Atmos. Sci. 2006. N 63. P. 3137–3159.
13. *Morrison H., Curry J. A., Khvorostyanov V. I.* A new double-moment microphysics parameterization for application in cloud and climate models, Part I: Description // J. Atmos. Sci. 2005. N 62. P. 1665–1677.
14. A description of the Advanced Research WRF version 3 / W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, J. G. Powers // NCAR Tech. Note NCAR/TN-475 + STR), 2008. 113 p.
15. *Thompson G., Rasmussen R. M., Manning K.* Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis // Mon. Wea. Rev. 2004. N 132. P. 519–542.

УДК 551.510.42

Изучение влияния морфометрических характеристик рельефа на перераспределение загрязнений в атмосферном воздухе г. Красноярск

С. П. Ильина (sofya.ilina.1994@mail.ru)

А. А. Гостева (gissfu@gmail.com)

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Аннотация. В статье представлены результаты геоинформационного анализа морфометрических характеристик рельефа г. Красноярск и проведена оценка влияния этих характеристик на перераспределение воздушных потоков. Проведен аналитический обзор применимости использования методов геоинформационного анализа для комплексного изучения влияния экспозиции и уклона склонов на перераспределение воздушных потоков.

Ключевые слова: Морфометрические характеристики рельефа, SRTM, экспозиция склонов, уклон склонов, ГИС, алгебра карт.

Традиционно, морфометрический анализ является одной из основ изучения рельефа любой территории, обеспечивая более объективную и комплексную его оценку. В тоже время, анализ морфометрических характеристик рельефа представляется чрезвычайно важным при комплексном изучении и картографировании территории.

Целью статьи является морфометрический анализ рельефа на территории г. Красноярска с помощью ГИС на основе открытых данных радарной топографической съемки.

В рамках таких исследований использование специализированных программных комплексов, избавляющих от трудоемких морфометрических работ, позволяет перейти к построению комплекса морфометрических карт различного содержания, пространственного масштаба и сложности. При этом фактической базой исследования могут являться, с некоторыми ограничениями, открытые данные спутниковой съемки SRTM.

Данные SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) представляют собой обработанные результаты радарной топографической съемки поверхности Земного шара, произведенной методом радарной интерферометрии с борта американского космического корабля «Shuttle» в феврале 2000 г. Данная съемка проведена почти на всей территории и акватории Земли между 60° с. ш. и 54° ю. ш. с помощью радиолокационных сенсоров SIR-C и X-SAR, установленных на борту корабля. Результатом съемки стала цифровая модель рельефа, охватывающая 85 % поверхности Земли. Данные распространяются в нескольких вариантах – сетка с размером ячейки 1 угловая секунда (≈ 30 м) и 3 угловая секунда (≈ 90 м) [4].

Для проведения геоинформационного анализа рельефа в программном обеспечении «ArcGIS» имеется набор стандартных команд – алгебра карт. Алгебра карт – в ГИС растрового типа: логико-арифметическая обработка растрового слоя как единого целого, подобная матричным операциям в математике [2].

Совместное использование картографических и математических моделей в процессе анализа-синтеза сложной и разнородной пространственно-временной информации существенно повышает географическую точность и достоверность данных, а также приводит к оптимальному виду результаты математических расчетов. Формализованное картографическое изображение (особенно ярко это проявляется при пространственно-позиционном представлении) по своей сути приспособлено для математического анализа. Каждой точке карты с координатами X и Y поставлено в соответствие одно значение карто-

графируемого явления Z , а это позволяет рассматривать изображение данного явления как функцию $Z = F(X, Y)$.

Многие пространственно-распределенные явления реально связаны между собой функциональными или статистическими зависимостями, другие могут быть условно представлены как функции пространства и времени при помощи абстрагирования от несущественных деталей, постановки определенных ограничений, аппроксимации сложных и неизвестных функций более простыми и известными. В настоящее время почти все разделы современной математики применимы для обработки картографических изображений, но не все они однозначно обоснованы и не все результаты, получаемые в результате математического анализа, имеют надежную содержательную интерпретацию.

Основной формат командного языка функций картографической алгебры имеет следующий вид: имя файла выходного слоя = операция + имя файла основного слоя + значения параметров или имя файла (файлов) слоя (слоев) параметров + добавочные параметры [3].

Развитие г. Красноярска десятилетиями велось без учета совокупности природных условий территории, а именно: некомплексного учёта местных условий при проектировании, неполной обоснованности выбора площадок, нарушении экологической ёмкости территории, что привело к кризисному экологическому состоянию города, в результате чего он входит в число самых грязных городов России. Сложившаяся ситуация требует комплексной экологической оценки территорий для дальнейшего их развития.

Рельеф принадлежит к косвенным орографическим экологическим факторам. Степень воздействия рельефа определяется мощностью его развития. Различают три формы рельефа: макрорельеф (высокие горы), мезорельеф (расчлененные возвышенности, террасы в пойме рек и другие элементы) и микрорельеф (незначительные повышения, например, западины в степи, кочки на сфагновом болоте, холмики, образующие в степи действием роющих животных).

Рельеф г. Красноярска отличается разнообразием форм.

Для территории г. Красноярска характерен мезорельеф. Мезорельеф оказывает большое влияние на распределение климатических элементов (температура, осадки) в пределах небольших территорий, что способствует формированию там специфических микроклиматических условий.

Город Красноярск и его зеленая зона расположены на стыке трех геоморфологических стран: Западно-Сибирской равнины, Средне-

Сибирского плоскогорья и Алтае-Саянской горной страны. Северо-западная часть г. Красноярска расположена в пределах Красноярской лесостепной предгорной равнины. На территории г. Красноярска хорошо выражен террасовый комплекс. Красноярск расположен на обоих берегах р. Енисей в ее среднем течении. Важную роль в формировании ландшафтных особенностей г. Красноярска играет долина реки. Она является полосой переходных ландшафтов между крупными природными зонами и занимает преобладающую часть города. Ее ширина на разных берегах неодинакова: на правом – она изменяется от одного километра у ручья Лалетина до 8 км при впадении реки Березовки. Левобережная долина при впадении реки Кача и в северной части города значительно расширяется (до 6-8 км). В целом она представляет собой ступенчатую эрозионно-аккумулятивную равнину, имеет сложную морфологию. На рис. 1 представлена карта террас. I и II (8–18 м над уровнем Енисея), III (30 м), IV (45–55 м), V (60–70 м), VI (100 м), VII (130–140 м), VIII (150–230 м). Террасы представляют собой горизонтальные площадки, лишь иногда имеющие небольшой уклон (до 2,50) в сторону водотока, к бассейну которого принадлежат [1].

Карта расположения террас на территории города Красноярска

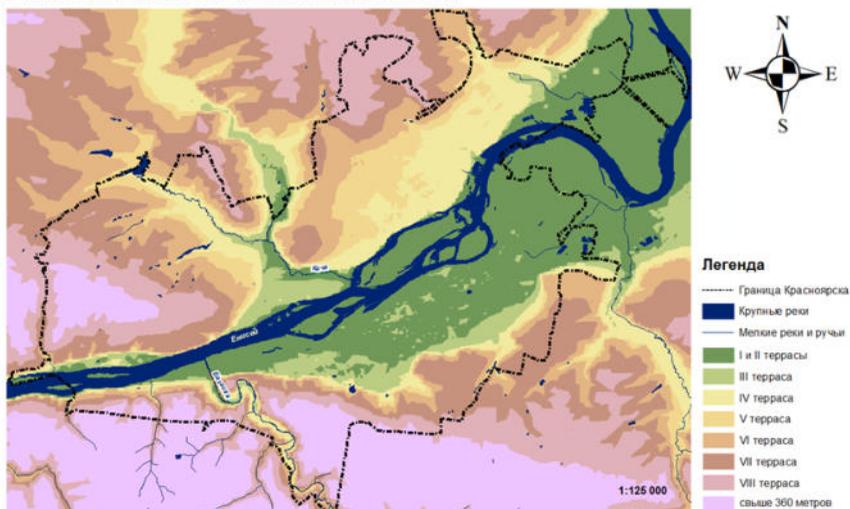


Рис. 1. карта расположения террас на территории г. Красноярска

По карте хорошо видно, что террасы расположены в порядке высотного удаления от реки Енисей.

Для Красноярска характерно постоянство режима ветра в течение всего года, что объясняется условиями орографии. При этом направление долины Енисея совпадает с преобладающим направлением ветра. Ширина долины Енисея в пределах города резко изменяется, что влияет на скорость ветрового потока и, как следствие, на интенсивность проветриваемости территории. В месте выхода реки с гор Восточного Саяна долина в значительной степени расширяется, уменьшая средние скорости ветров.

В повторяемости направлений ветра и штилей по 16 румбам, очевидно, что в течение года преобладают ветры трех румбов: западный – юго-западный; западный; западный – северо-западный.

В зимние месяцы их суммарная повторяемость составляет 51–63 %, в переходные периоды – 48–62 %. Летом повторяемость ветра этих направлений также преобладает над остальными румбами, но в сумме составляет 35–38 %. Летом прослеживается второй максимум – ветер восточных румбов. Суммарная повторяемость восточно-северо-восточного, восточного и восточно – юго- восточного румбов в летние месяцы – 21–24 %. Появление второго максимума связано с тем, что летом уменьшаются температурные контрасты между северными и южными широтами, над северными морями активизируется антициклональная деятельность, а г. Красноярск оказывается под влиянием Монгольского антициклона, находясь на его северной, северо-западной периферии [7].

Распределение ветровых потоков в г. Красноярске может быть исследовано на основе данных Федерального государственного бюджетного учреждения «Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» и на основе метеорологических данных Краевой ведомственной информационно-аналитической системы данных о состоянии окружающей среды Красноярского края (КВИАС).

Общая циркуляция атмосферы – совокупность воздушных течений крупного масштаба в тропо- и стратосферах. В результате происходит обмен воздушными массами в пространстве, что способствует перераспределению тепла и влаги.

Один из факторов, определяющих циркуляцию атмосферы это – неравномерное распределение солнечной энергии по земной поверхности и как следствие, неравномерное распределение температуры и атмосферного давления.

Также фактором, влияющим на перераспределение воздушных потоков является рельеф, а именно: высота местности над уровнем моря, экспозиция и крутизна склона [5].

Для выявления барьеров, влияющих на перераспределение воздушных потоков необходимо оценить комплексное влияние направления экспозиции и величину уклонов.

От экспозиции склона зависят уровень солнечной радиации, зимнее распределение снега и скорость ветра.

От крутизны склона зависит изменение температуры, так как меняется угол падения солнечных лучей. Чем круче склон, тем большему нагреванию он подвергается.

Для начала оценки влияния морфометрических характеристик были построены две карты, отражающих экспозицию и уклон склонов, так как экспозицию и уклон склона нужно учитывать комплексно.

На рисунке 2 представлена карта уклона рельефа на территорию г. Красноярска. Рельеф был классифицирован в соответствии со шкалой, предложенной Раменским Л. Г.: $0,5-2^\circ$ – отлогости и наклонные равнины; $0,5-1^\circ$ – слабо наклонные равнины, $1-2^\circ$ – выраженные отлогости; $2-7^\circ$ – пологие склоны: $2-3^\circ$ – очень пологие склоны, $3-5^\circ$ – средне пологие склоны, $5-7^\circ$ – довольно пологие склоны; $7-15^\circ$ – покатые склоны: $7-11^\circ$ – умеренно покатые склоны, $12-15^\circ$ – сильно покатые склоны; $15-40^\circ$ – крутые склоны: $15-25^\circ$ – умеренно крутые склоны, $25-40^\circ$ – сильно крутые склоны; свыше 40° – обрывистые склоны: $40-50^\circ$ – умеренно обрывистые склоны, $50-60^\circ$ – сильно обрывистые склоны, свыше 60° – обрывы [6]. По построенной карте можно определить, что для города характерна равнина либо слабо наклонные равнины.

На рисунке 3 представлена карта экспозиции рельефа на территорию г. Красноярска. Разнообразие направления склонов в центральной части города можно не учитывать, так как по карте уклона рельефа было выявлено, что для центральной части города характерна равнина и слабо наклонные равнины. Следовательно, можно предположить, что на перераспределение воздушных потоков в центральной части города больше влияет городская застройка территории. По границам г. Красноярска можно наблюдать разнообразие направления склонов, обусловленных тем, что город находится на стыке трех геоморфологических стран.

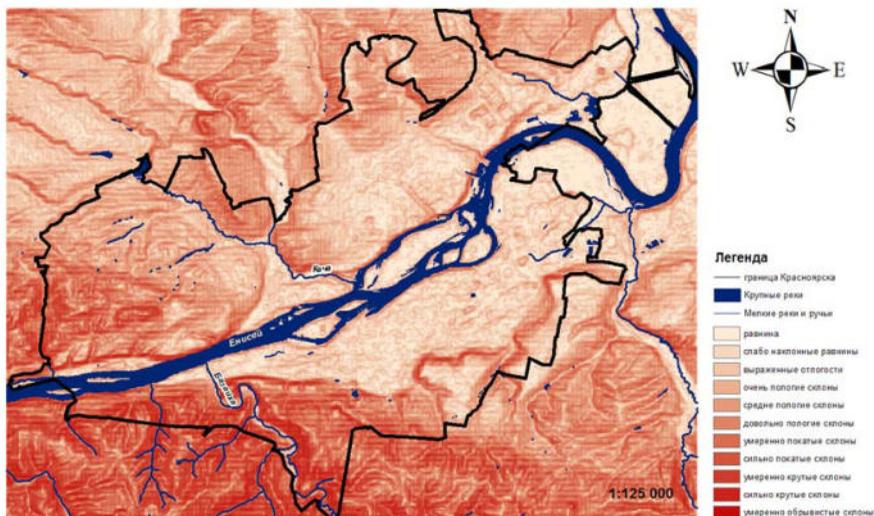


Рис. 2. карта уклона рельефа на территорию г. Красноярска

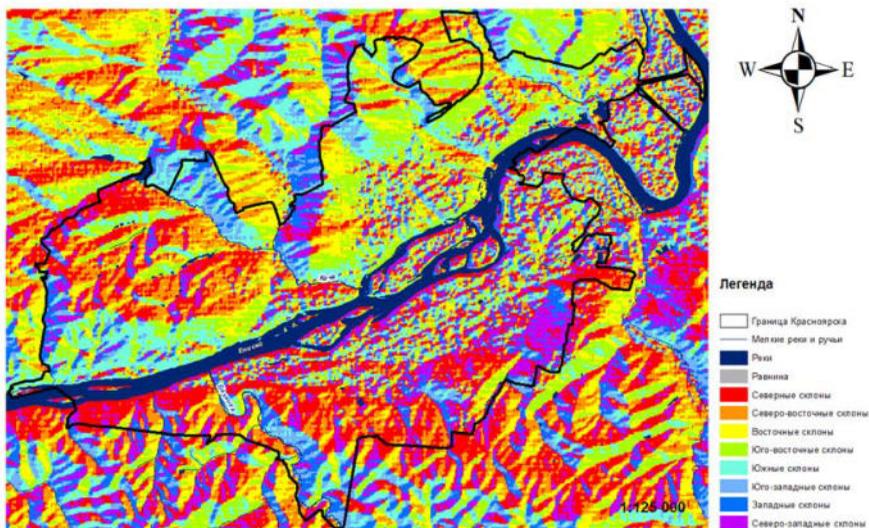


Рис. 3. Карта экспозиции склонов на территории г. Красноярска

Далее проведем анализ экспозиции и уклона склонов в совокупности. Для этого будем использовать встроенный инструмент ArcGIS «алгебра карт». Растр необходимо разбить на два класса в зависимости от того, какое направление и крутизна склона нам необходимы. Для определения какие склоны влияют на перераспределение распространения загрязнений при неблагоприятном ветре (северо-восточный, восточный) карту экспозиций и уклонов необходимо переклассифицировать. Склонам, направленным на северо-восток и восток, присвоим значение 0, остальным значение 1, так как эти склоны будут задерживать загрязнения. Далее переклассифицируем крутизну склонов, первым пяти классам присвоим значение 0, так как влияние на задержку загрязнений незначительно, остальным значениям присвоим 1. Далее при помощи инструмента «алгебра карт» складываем эти значения. В результате у нас получится карта, отражающая неблагоприятные и благоприятные места для рассеивания загрязнений (рис. 4).

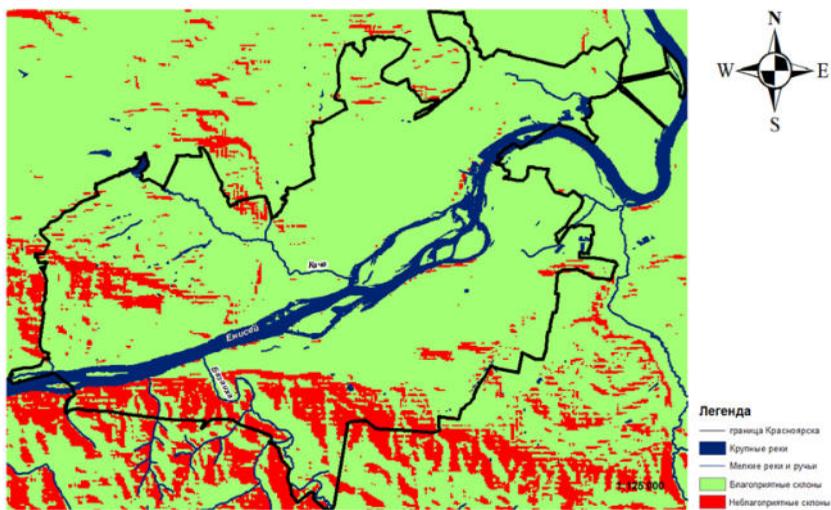


Рис. 4. Карта расположения благоприятных и неблагоприятных склонов при северном и северо-восточном направлениях ветра

Карта наглядно иллюстрирует, что Торгашинский хребет является барьером для продувания города неблагоприятным северо-восточным ветром.

Для определения какие склоны влияют на перераспределение распространения загрязнений при благоприятном ветре (южный, юго-западный) точно также растры экспозиций и уклонов необходимо переклассифицировать. Склонам, направленным на юго-запад и запад, присвоим значение 0, остальным значение 1, так как эти склоны будут задерживать загрязнения. Далее переклассифицируем значения крутизны склонов, первым пяти классам присвоим значение 0, так как влияние этих склонов на задержку загрязнений незначительно, остальным значениям присвоим 1. Далее при помощи инструмента «алгебра карт» складываем эти значения. В результате у нас получится карта, отражающая неблагоприятные и благоприятные места для рассеивания загрязнений при южном и юго-западном направлениях ветра (рис. 5).

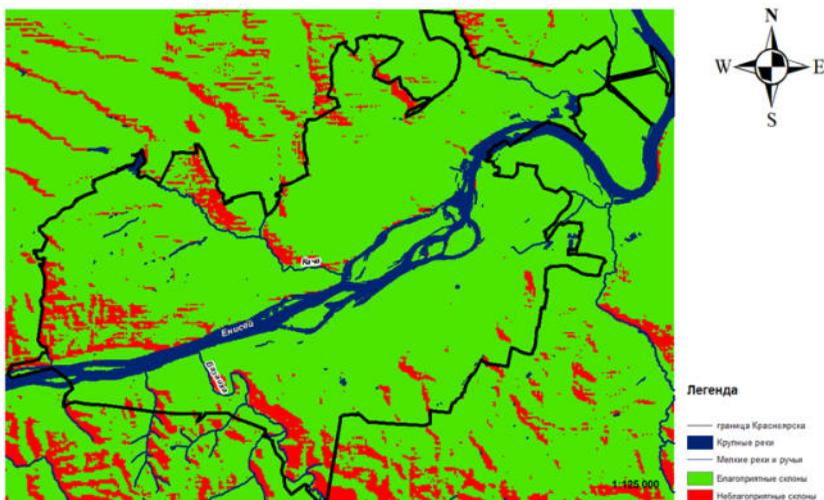


Рис. 5. Карта расположения благоприятных и неблагоприятных склонов при южном и юго-западном направлениях ветра

На рисунке 5 зеленым цветом представлены благоприятных благоприятных с точки зрения продувания склоны и красным цветом неблагоприятные для южного и юго-западного ветра. По карте можно сделать вывод, что явных барьеров для продувания города преобладающим южным и юго-западным ветром нет, также можно отметить, что направление реки тоже не влияет на продувание города благоприятным юго-западным ветром.

В статье представлены результаты геоинформационного анализа распространения загрязнений, изучены природно-климатические факторы, влияющие на распространение загрязнений в атмосфере г. Красноярск. Можно отметить, что для анализа влияния различных факторов на перераспределение воздушных потоков на территории г. Красноярск, необходимо также оценивать влияние антропогенных факторов, например, застройку города.

Список литературы

1. Особенности ландшафтов г. Красноярск как геолого-геоморфологическая основа для градостроительства / О. В. Антоненко, В. А. Безруких, Е. В. Авдеева, Э. И. Назарова, А. М. Кисленко // Хвойные бореальной зоны. 2017. Т. 35. 126 с.
2. Геоинформатика / Е. Г. Капралов, А. В. Кошкарев, В. С. Тикун, М. О. Говоров, А. В. Заварзин, И. К. Лурье, И. А. Рильский, Б. Б. Серапинас, А. М. Трофимов, М. Э. Флейс, В. Б. Яровых М. : Академия, 2010. 400 с.
3. Картографическая алгебра [Электронный ресурс]. URL: <http://kadastrua.ru/gis-tekhnologii/213-kartograficheskaya-algebra.html> (25.03.2019).
4. Изучение морфометрических показателей рельефа селеопасных бассейнов по данным радарных спутниковых снимков (на примере междуречья Шинчай-Дамирапаранчай) / С. Г. Мамедов, З. А. Алекберова, С. Гамидова, Л. А. Исмаилова // Вестн. Моск. гос. обл. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2017. Т. 2. 90 с.
5. Общая циркуляция атмосферы [Электронный ресурс]. URL: <https://works.doklad.ru/view/X6eJiaOqNPY.html> (25.03.2019).
6. *Раменский Л. Г.* Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель. М. : Сельхозгиз, 1938. 620 с.
7. Состояние загрязнения окружающей среды на территории Красноярского края за 2017 г. Краткий обзор. Красноярск : Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2018. 34 с.

УДК 551.515.14

Исследование циркуляционных факторов изменений климата на территории Сибирского сектора по данным типизации Б. Л. Дзержевского

Н. К. Кононова (ninakononova@yandex.ru)¹

И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru)²

¹ *Институт географии РАН, г. Москва*

² *Иркутский государственный университет, г. Иркутск*

Аннотация. Представлены результаты исследований многолетней динамики циркуляционных процессов на территории Сибирского сектора по данным типизации Б. Л. Дзержевского за период 1899–2018 гг. Количественно оценен вклад элементарных циркуляционных механизмов в изменчивости преобладающих групп циркуляционных процессов. В качестве основных циркуляционных факторов высоких темпов изменения климата на территории Сибирского сектора в эпоху господствующей меридиональной северной циркуляции рассматриваются увеличение продолжительности долготной северной группы процессов и связанных с ней адвективно-динамических факторов антициклогенеза.

Ключевые слова: циркуляция атмосферы, типизация, синоптические процессы, аномалии, геопотенциал, давление.

Введение

Изучение динамики климата, особенно его короткопериодных (порядка 20–30 лет) флуктуаций, невозможно без оценки вклада циркуляционных факторов. Особую актуальность такие исследования представляют в настоящее время, когда существенно возросли темпы изменений климата и в то же время накоплен относительно большой массив климатических и синоптических данных.

Наиболее полное воспроизведение структуры циркуляции атмосферы внетропических широт Северного полушария разработано Б. Л. Дзердзеевским [1]. Согласно принципам, заложенным в основу типизации Б. Л. Дзердзеевского, все многообразие синоптических процессов в данный момент времени рассматривается как целостный макропроцесс, который сохраняет свои характеристики в течение длительного времени. Типизация Б. Л. Дзердзеевского – календарь последовательной смены элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ), выделение которых проводится по наличию или отсутствию блокирующих вторжений холодных арктических воздушных масс к югу, с которыми связано углубление высотных ложбин циркумполярного вихря и, как следствие, усиление меридиональной составляющей ветра и межширотного обмена.

С учетом преобладающих типов ЭЦМ выделяют циркуляционные эпохи: зональную, меридиональные северную и южную, которые согласно данным табл. 1 сменяют друг друга и сопровождаются свойственными им изменениями температурного режима [2]. Согласно данным табл. 1, во всех секторах Северного полушария происходит чередование зональной и меридиональной циркуляционных эпох, однако их продолжительность разная. Обращает внимание проявляющиеся в чередовании эпох циклы, близкие к 30-ти и 60-летним, свойственные изменчивости атмосферных процессов.

В настоящее время на территории Северного полушария во всех секторах отмечается меридиональная эпоха циркуляции, которая наиболее продолжительная (> 50 лет) в Европейском, Дальневосточном и Тихоокеанском секторах. Следует отметить, что наибольшая изменчивость циркуляционных условий наблюдается в Сибирском и Американском секторах, вариации которых со второй половины XX в. тесно согласуются во времени. Интересно, что смена циркуляционных

эпох в Сибирском секторе происходит приблизительно на 3–4 года позднее, по сравнению с Американским сектором.

Таблица 1

Календарь смены циркуляционных эпох по типизации Б. Л. Дзердзеевского в различных секторах Северного полушария

Сектор	Циркуляционные эпохи (годы)				
Атлантический	Зональная 1899–1961	Меридиональная 1962–1972	Зональная 1973–1983	Меридиональная 1984–2018	
Европейский	Зональная 1899–1965	Меридиональная 1966–2018 (53)			
Сибирский	Меридиональная 1899–1934	Зональная 1935–1962	Меридиональная 1963–1976	Зональная 1977–2005	Меридиональная 2006–2018
Дальневосточный	Зональная 1899–1957	Меридиональная 1958–2018			
Тихоокеанский	Зональная 1899–1959	Меридиональная 1960–2018			
Американский	Меридиональная 1899–1918	Зональная 1919–1938	Меридиональная 1939–1972	Зональная 1973–2002	Меридиональная 2003–2018

Обсуждение результатов

Объект исследования – территория Сибирского сектора (60° в. д. – 119° в. д.). Наибольший интерес для исследования на территории Сибирского сектора представляет современная циркуляционная эпоха (2006–2018 гг.). Выявлено, что в 2016–2018 гг. в Сибирском секторе отмечались минимальные значения за весь исследуемый период (1899–2018 гг.) продолжительности широтной западной группы атмосферных процессов в сочетании с долготной южной (3 дня) и долготной северной в сочетании с широтной западной (4 дня), что соответственно в 8 и 5 раз меньше средних многолетних значений (рис. 1, а). Следует отметить, что максимальная повторяемость указанных групп циркуляции приходится на вторую половину лета, когда при хорошо выраженной циклонической деятельности на арктическом фронте и регенерации на нем полярно-фронтальных циклонов между двумя блокирующими антициклонами над значительной частью Евразии формируется почти стационарная депрессия (рис. 1, в). Уменьшение продолжительности данных групп циркуляции в последние годы неплохо согласуется с ослаблением барической депрессии (рис. 1, д) и, как следствие, увеличением засушливости климата Сибирского региона на фоне повышения температур в июле и августе.

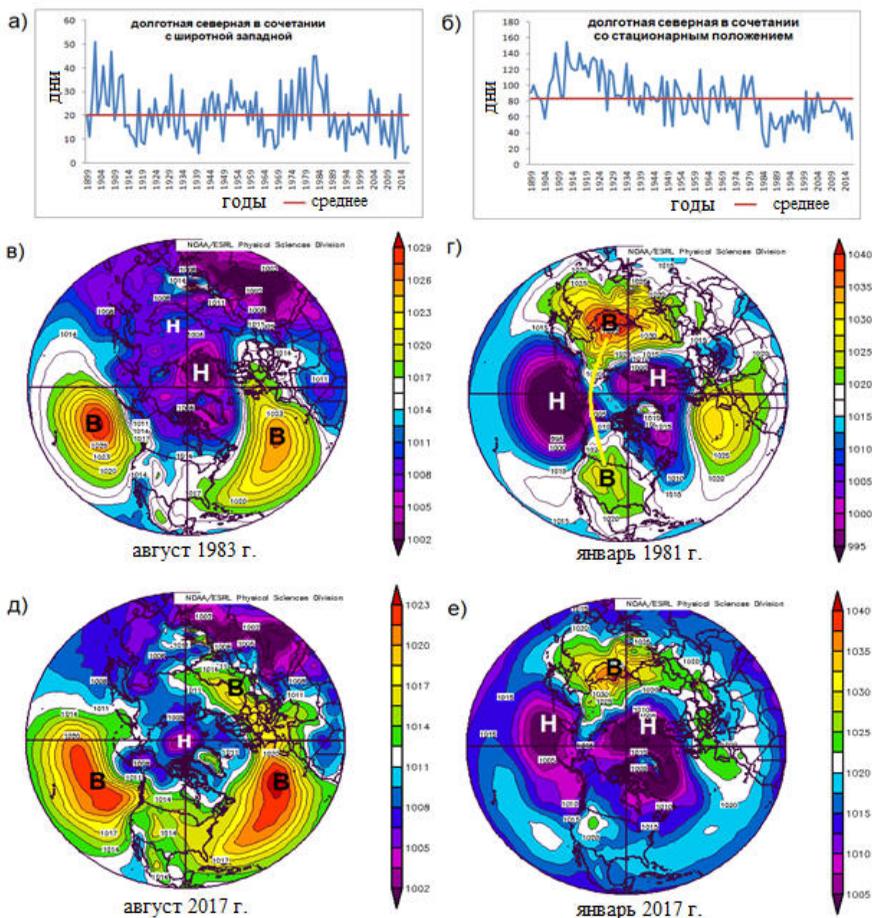


Рис. 1. Изменение в Сибирском секторе годовой продолжительности долготной северной группы процессов в сочетании с широтной западной (а) и со стационарным положением (б), приземные барические поля в годы максимальной (в, г) и минимальной (д, е) продолжительности указанных групп атмосферных процессов

Среди групп циркуляции, характерных для зимних месяцев, на территории Сибирского сектора в многолетней динамике следует выделить уменьшение в 3 раза по сравнению со средними значениями за 1899–2018 гг. продолжительности долготной северной группы процессов в сочетании со стационарным положением, которые характеризуются развитием блокирующих гребней над Америкой и над Восточной Азией, объединяющих зимние континентальные цен-

тры действия атмосферы (рис. 1, б). Уменьшение продолжительности указанных групп циркуляции сопровождается ослаблением процессов блокирования (рис. 1, д), и, как следствие, увеличением повторяемости положительных аномалий зимних температур.

Для определения вклада различных типов атмосферных процессов (ЭЦМ) в межгодовую изменчивость меридиональных и зональных групп циркуляции на территории Сибирского сектора рассчитывались коэффициенты парной корреляции между годовой продолжительностью преобладающих в регионе долготной северной и широтной западной групп циркуляции и продолжительностью ЭЦМ (рис. 2, а). Выявлено, что наибольший вклад в межгодовую изменчивость северной долготной группы циркуляции в Сибирском секторе вносят арктические вторжения, которые сопровождаются развитием блокирующих процессов над Сибирью (ЭЦМ 12а). Для широтной западной группы процессов более характерна циклоническая деятельность на арктическом и полярном фронтах, которая сопровождается повышением атмосферного давления над Сибирью при вторжениях холода в тыловых частях заключительных циклонов (ЭЦМ 13 л,з и 8 а).

Таким образом, существенный вклад в многолетние вариации климатического режима в Сибирском секторе вносят арктические вторжения и связанные с ними процессы циклогенеза на арктической и полярной ветвях высотной фронтальной зоны, которые являются преобладающими типами атмосферных процессов и на территории Северного полушария в целом (рис. 2, б). Интересно, что многолетние вариации продолжительности преобладающей на территории Сибирского сектора в последнюю циркуляционную эпоху (2006–2018 гг.) долготной северной группы процессов неплохо согласуются с вариациями продолжительности данного типа в Атлантическом секторе и находятся в противофазе с вариациями на Американском континенте (рис. 2, в).

При увеличении продолжительности арктических вторжений (ЭЦМ 12а) возрастает вероятность аномально холодных периодов, особенно в зимние месяцы. В качестве примера такого рода процессов можно привести февраль 2019 г., когда на территории Сибирского и Американского секторов при углублении ложбин циркумполярного вихря (рис. 3, а) и длительное время сохраняющихся меридиональных потоков на высотах (рис. 3, б) происходило усиление Азиатского и Канадского антициклонов (рис. 3, в), которые блокировали смещение атлантических и тихоокеанских циклонов. В результате в Сибирском и Американском секторах в феврале 2019 г. отмечались отрицательные аномалии температур (рис. 3, з).

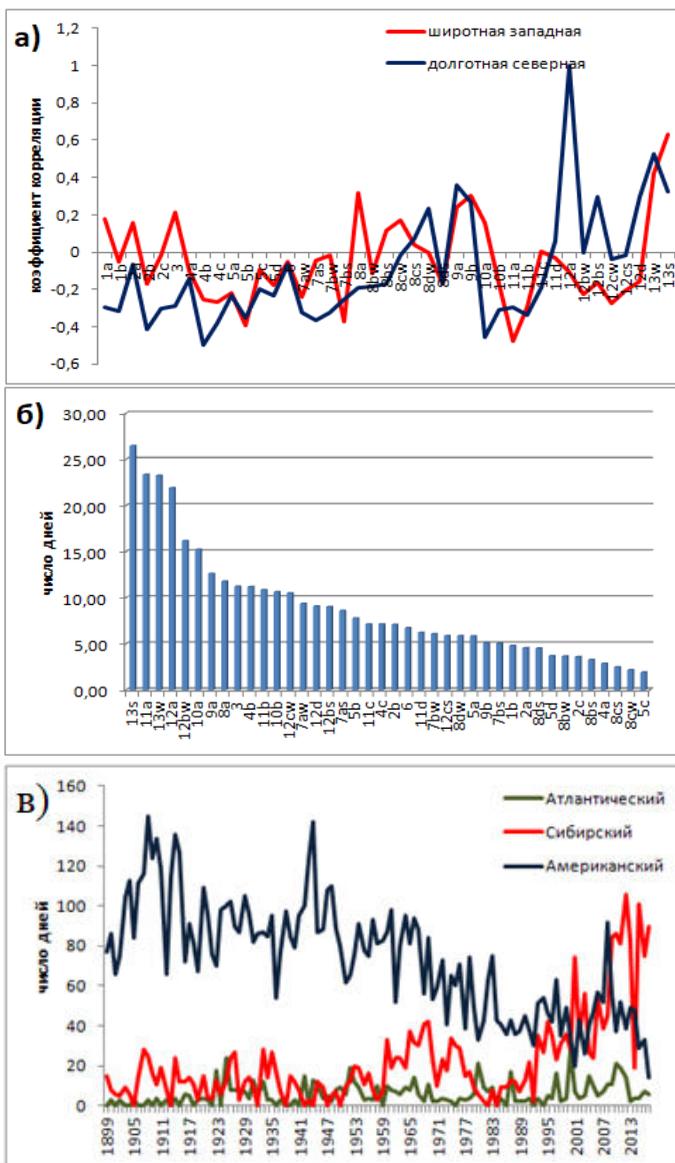


Рис. 2. Изменение нормированной на средние значения за период 1899–2018 гг. продолжительности групп атмосферной циркуляции в Сибирском секторе (а), средней годовой продолжительности ЭЦМ в Северном полушарии (б) и годовой продолжительности долготной северной группы (в)

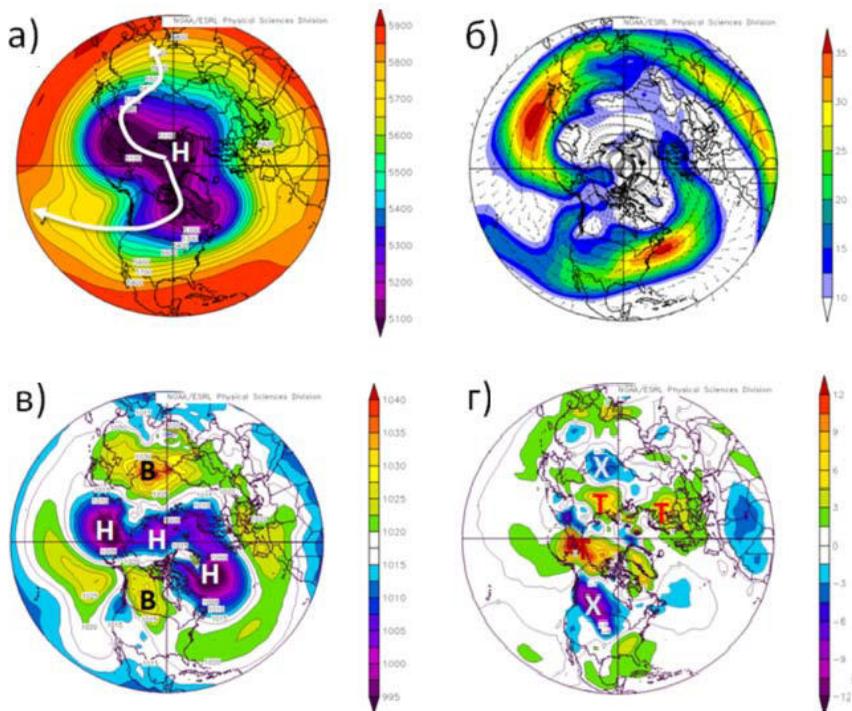


Рис. 3. Поля средних месячных значений высоты геопотенциала (а) и ветровых потоков (б) на уровне АТ-500 гПа, аномалий давления (в) и температуры воздуха (г) у поверхности Земли в феврале 2019 г.

Для более детального анализа циркуляционных условий в современную эпоху меридиональной циркуляции (2006–2018 гг.) рассчитывались аномалии средних месячных значений геопотенциала изобарической поверхности АТ-500 гПа (рис. 4) и приземного давления (рис. 5) в центральные месяцы календарных сезонов года по отношению к средним значениям за период 1948–2018 гг. Выявлено, что на большей части территории Северного полушария, включая Сибирский сектор, в 2006–2018 гг. отмечался рост геопотенциальных высот в средней тропосфере. В изменениях приземного давления положительные аномалии были более выражены в холодный период года. Таким образом, в современную эпоху меридиональной циркуляции в Сибирском секторе прослеживается рост давления и геопотенциальных высот, что указывает на адвективно-динамические факторы антициклогенеза на фоне увеличения продолжительности долгой северной группы атмосферных процессов.

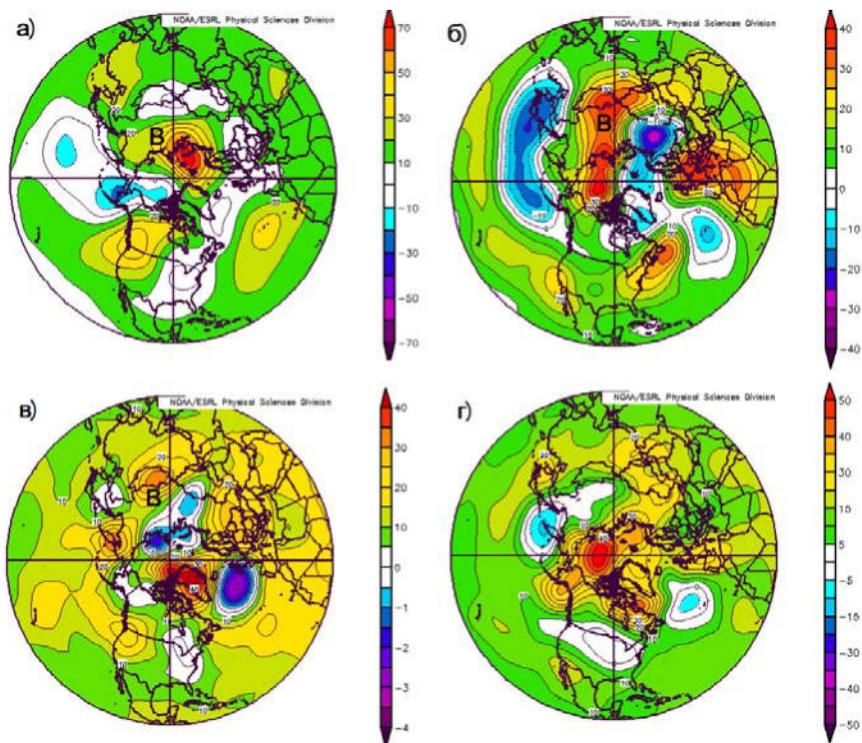


Рис. 4. Аномалии средних месячных значений геопотенциала АТ-500 гПа (дкм) в январе (а), апреле (б), июле (в) и октябре (г) 2006–2018 гг. по отношению к средним значениям за 1948–2018 гг.

Заключение

Современные изменения циркуляционного режима в Сибирском секторе в меридиональную северную эпоху циркуляции (2006–2018 гг.) характеризуются значительным увеличением продолжительности долгой северной группы атмосферных процессов, когда при увеличении продолжительности арктических вторжений получают развитие адвективно-динамические факторы антициклогенеза. В результате в районах блокирования в летние месяцы преобладают положительные аномалии температур, способствующие формированию засушливых периодов на территории Сибирского сектора, а в зимние месяцы возрастает повторяемость отрицательных аномалий температур.

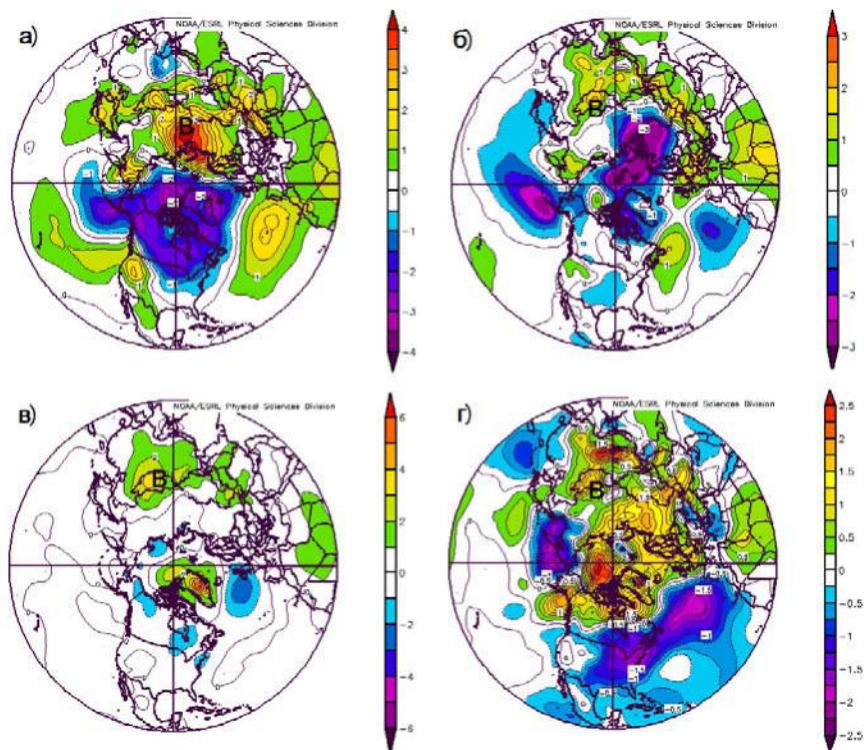


Рис. 5. Аномалии средних месячных значений приземного давления (гПа) в январе (а), апреле (б), июле (в) и октябре (г) 2006–2018 гг. по отношению к средним значениям за 1948–2018 гг.

Список литературы

1. Дзерdzeвский Б. Л. Избранные труды. Общая циркуляция атмосферы и климат. М. : Наука, 1975. 288 с.
2. Кононова Н. К. Циркуляционные эпохи в секторах Северного полушария в 1899–2014 гг. // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2015. Т. 1 (11), вып. 2. С. 56–66.

УДК 504.3.054

Синергизм при загрязнении воздуха городской среде на фоне неблагоприятных метеорологических условий

В. В. Кульнева (vedma_Via@mail.ru),

А. В. Звягинцева (zvygincevaav@mail.ru)

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж

Аннотация: Рассмотрена проблема загрязнений атмосферного воздуха в городской среде на фоне негативных погодных условий (жаркая погода, безветрие, продолжительное отсутствие осадков) и отсутствие установленных лабораторных подтверждений, хотя установлены бесспорные случаи отравлений людьми с лёгкими последствиями.

Ключевые слова: загрязнение воздуха, мониторинг, лабораторный анализ, ПДК, синергизм.

Город Воронеж как крупный административный центр характеризуется большой концентрацией антропогенных объектов на ограниченной территории, оказывающих негативное воздействие на компоненты окружающей среды, в первую очередь, это касается атмосферного воздуха в приземном слое городской территории.

Основными источниками техногенного загрязнения г. Воронежа являются автотранспорт (более 82 % вклада в загрязнение атмосферы города), объекты теплоэнергетики (ТЭЦ-1, ТЭЦ-2, многочисленные котельные), предприятия нефтехимической и строительной индустрии. Структура и ореолы техногенного загрязнения атмосферы образуют достаточно обширную зону «сплошного» рассредоточенного загрязнения с «очагами» высоких концентраций поллютантов в окружающей среде [1].

В последние годы всё пристальнее уделяется внимание со стороны органов власти на продолжительные загрязнения приземного воздуха; фактически это произошло в 2010 г. год массовых лесных пожаров в Воронежской области. Население также всё «нервозней» реагирует на факты задымлений и химических загрязнений атмосферы. Часто этому есть причины, так как возникает некий комбинированный эффект, особенно в жаркое время года на фоне продолжительной инверсии в нижнем слое атмосферы. Подобный эффект, очевидно, следует воспринимать как синергизм в отношении человека.

Синергизм – взаимодействие факторов, при котором эффект оказывается большим, чем сумма влияний от действия отдельных факторов; увеличение силы воздействия одного фактора при наличии в среде других однонаправленных факторов [2].

01.08.2014 в период с 08:45 до 10:00 в оперативную дежурную смену Центра управления в кризисных ситуациях (ОДС ЦУКС) Главного управления МЧС России по Воронежской области от населения поступали многочисленные сообщения о загрязнённом воздухе в Центральном районе г.о.г. Воронеж на улицах Фридриха Энгельса, Мира, Карла Маркса, проспекте Революции (395 телефонных обращений). Наибольшее количество телефонных звонков происходило из зданий с офисными помещениями.

К местам обнаруженных атмосферных загрязнений были направлены оперативные группы: главного управления МЧС России по Воронежской области, муниципального учреждения Управления по делам ГО ЧС Г.О.г. Воронежа; исследовательская лаборатория ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии Воронежской области» и ремонтная группа от городского водоканала ООО «РВК-Воронеж».

1 августа в г. Воронеже сложилась уникальная ситуация, способствовавшая образованию повышенных загрязнений атмосферы:

30.07.2014 Воронежским гидрометеоцентром было выдано шторм предупреждение № 19, что в период с 30 июля по 4 августа по области ожидается сильная жара – максимальная температура воздуха 35–37 °С. Прогноз подтвердился: 30 июля и 1 августа (рассматриваемое время возникновения загрязнения атмосферы) в Воронеже наблюдалось 35 °С;

30 июля и 1 августа наблюдалась инверсия при безветрии, что способствовало возникновению смоговых явлений, особенно в час пик;

утром 1 августа пролив поливомоечной машиной по проспекту Революции не производился.

Основная масса жалоб была из офисных помещений. Обследование помещения ОАО «Ростелеком» показало, что основное химическое загрязнение следовало из коридора; длинный коридор устлан недорогим линолеумом, на потолке – подвесные панели. При высокой температуре линолеум, поливинилхлорид, который входит в его состав, начинает выделять токсические испарения, это же можно сказать и о других искусственных отделочных материалах. Придя в офис, работники (подавляющее большинство женщины) ощутив химический запах открыли окна для проветривания, а на улице – смог – аккумулятивное в пространственном объёме загрязняющих веществ в значительных концентрациях. В итоге возникло явление синергизма – взаимодействие факторов, при котором эффект оказывается большим, чем сумма влияний от действия отдельных факторов; увеличение силы воздействия одного фактора при наличии в среде других однонаправленных факторов [1; 3].

В личных беседах с представителями организаций, откуда поступали звонки, налицо были сильные аллергические реакции: жжение в глазах, першение в горле.

В подтверждение возникшего явления говорят результаты лабораторных исследований, проведенных тремя лабораториями.

Во время совместной работы оперативных групп специалистами исследовательской лаборатории ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии Воронежской области» был осуществлен экспресс-анализ по четырём адресам (перечислены по порядку обследования):

ул. К. Маркса д. 65, МУП «Воронежская горэлектросеть»;

ул. Комиссаржевской д. 3, филиал № 3 Военной поликлиники;

проспект Революции д. 35, ОАО «Ростелеком»;

ул. Донбасская, д. 30, вокзал «Воронеж-Курский».

Экспресс-анализы были проведены на промышленные выбросы по следующим ингредиентам: гидроксibenзол (фенол), формальдегид, сера диоксид, аммиак, дигидросульфид (сероводород), этантиол (этилмеркаптан), метантиол (метилмеркаптан), азота диоксид, углерод оксид, хлор. Во всех местах существенных превышений загрязнений воздуха промышленными выбросами не было обнаружено. Экспресс-анализы проводились примерно спустя два часа, после поступления первых жалоб.

В течение часа с 13:30 лаборатория ОАО «Воронежсинтезкаучук» провела замеры возможных загрязнений на промплощадке предприятия и в санитарно-защитной зоне предприятия по адресам: ул. Меркулова, д. 4Б, ул. Героев стратосферы, д. 14, пер. Отличников, д. 67. Лабораторные анализы были проведены на промышленные выбросы по следующим ингредиентам: стирол, толуол, линейные органические химические элементы, циклодекатриен (ЦДТ), бутадиев, циклогексан, аммиак. Во всех местах существенных превышений загрязнений воздуха промышленными выбросами самого предприятия ОАО «Воронежсинтезкаучук» не было обнаружено.

Результаты, полученные Воронежским гидрометеоцентром на постах мониторинга за загрязнениями атмосферы, подтверждают факт накопления вредных веществ в приземном слое атмосферы в результате неблагоприятных метеорологических условий (таблица). Места расположения постов:

1 пост – ул. Ростовская, д. 44;

7 пост – ул. Лебедева, д. 2;

8 пост – ул. Ворошилова, д. 30;

9 пост – ул. Лидии Рябцевой, д. 51б;

10 пост – ул. 9 января, д. 49.

С целью снятия предположений о других причинах и источниках атмосферного загрязнения оперативная группа Главного управления МЧС России по Воронежской области обследовала на предмет возможных выбросов АХОВ ближайшими объектами: ОАО «Холод» (Московский пр-т, д. 1), ОАО «Воронежская кондитерская фабрика» (ул. Кольцовская, д. 40), бассейн «Спартак» (ул. Карла Маркса, д. 71). Также были проверены канализационные сети в центральной части (вскрывались люки канализационных магистралей), железнодорожные станции «Воронеж-1», «Отрожка». Выбросов установлено не было.

Таблица

Результаты анализов на предмет загрязнения воздуха на постах наблюдения Воронежского гидрометеоцентра

Ингредиенты	Пыль	SO ₂	CO	NO ₂	NO	Фенол	Сажа	NH ₃	Формальдегид	
ПДК*, мг/м ³	0,5	0,5	5	0,085	0,4	0,01	0,15	0,2	0,035	
1 пост	7	0,6	0,010	3	0,11	0,02	0,003	0,03	–	0,015
	13	0,5	0,010	4	0,09	0,02	0,002	0,02	–	0,012
	19	0,6	0,008	4	0,09	0,02	0,002	0,03	–	0,014
7 пост	7	1,3	0,017	6	0,21	–	0,004	–	0,01	0,023
	13	0,9	0,017	5	0,25	–	0,005	–	0,01	0,021
	19	1,0	0,015	4	0,27	–	0,005	–	0,01	0,013
8 пост	7	0,6	0,011	5	0,09	–	–	–	0,01	0,017
	13	0,5	0,008	4	0,10	–	–	–	0,01	0,016
	19	0,5	0,009	4	0,11	–	–	–	0,01	0,012
9 пост	7	0,5	0,012	3	0,10	–	–	–	–	–
	13	0,4	0,008	3	0,09	–	–	–	–	–
	19	0,6	0,009	4	0,11	–	–	–	–	–
10 пост	7	0,7	0,010	4	0,11	–	–	–	–	0,016
	13	0,9	0,010	3	0,09	–	–	–	–	0,018
	19	–	0,008	4	0,10	–	–	–	–	0,013

Примечание: * – ПДК максимальная разовая загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населённых мест согласно [4]

«–» – замеры не производились.

В результате обобщения была сформулирована основная позиция для выдачи информации в СМИ, а также намечены основные мероприятия для снятия кризисной ситуации в г. Воронеже, прежде всего для исключения иных версий по ситуации. С этой целью уже в 16 часов этого же дня (1 августа) состоялось суженное заседание Комиссии правительства Воронежской области по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечения пожарной безопасности (протокол № 26).

Описанный эффект синергизма в городской среде (центр города в час пик) на фоне неблагоприятных метеоусловий (жара, безветрие, инверсия), а также неудовлетворительной работы коммунальных служб (не была пролита водой в утреннее время городская магистраль) может создать условия возникновения многочисленных аллергических эффектов среди людей, как следствие панику. При этом следует упомянуть следующее, что в предыдущий день по федеральным новостям показали интервью из Украины, где утверждалось, что в Донецке и Луганске готовится в ближайшие дни разрушение больших емкостей с хлором. Как результат, среди слухов, распространяющихся в г. Воронеже в описанной кризисной ситуации, прежде всего, преваляли об облаке газообразного хлора.

К настоящему времени в отечественной и зарубежной литературе накопились экспериментальные данные по комбинированным воздействиям в окружающей среде многих физических и химических факторов. Ситуация усложняется тем, что вредное действие некоторых агентов может не только суммироваться, но и усиливаться за счёт синергического взаимодействия [3; 5].

Рассмотренный случай синергизма называется потенцированием эффекта, происходит не простая суммация загрязнителей, а увеличение негативного эффекта. Эти особенности комбинированного действия ставят проблему для решения путём выполнения специальных исследований в диапазоне концентраций и для комбинации загрязнителей, наиболее часто встречающихся в атмосфере городской среды.

В настоящее время производится простая суммация относительных величин загрязнителей (относительно ПДК) и сравнивается с единицей [5]. При этом суммация лимитирована видами вредных веществ. Тем не менее, в настоящее время существует много вредных веществ, не охватываемых правилами суммации. Данное утверждение говорит само за себя, по перечню веществ, описанных выше при проведении анализов санэпиднадзором существенных загрязнений, так и не было обнаружено.

Актуальность проблемы возникновения синергизма при загрязнении воздуха в городской среде очевидна, так как в реальных условиях химическое загрязнение атмосферного воздуха является многокомпонентным. Многообразие состава смесей веществ обуславливает различие задач, которые приходится решать при оценке синергического действия. В большинстве случаев определяют наиболее опасные и ведущие компоненты сложных смесей, а в других, как в описанном случае (было задействовано три лаборатории), требуется определение и аварийно

химически опасных веществ (АХОВ), и специфических используемых на предприятии, и так называемых экологических компонент.

Список литературы

1. Долженкова В. В., Звягинцева А. В., Усков В. М. Антропогенное воздействие на водохозяйственные объекты // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. 2008. Т. 4, № 11. С. 24–27.
2. Экологический энциклопедический словарь / под общ. ред. И. И. Дедю. Кишинёв : Гл. ред. Молдав. сов. энцикл., 1989.
3. Артемьев А. С., Звягинцева А. В. Возможности геоинформационного моделирования при прогнозировании распространения загрязняющих веществ промышленных выбросов объектов техносферы в окружающей среде // Вестн. ВГТУ. 2011. Т. 7, № 11.1. С. 106–110.
4. ГН 2.1.6.1338-03. Предельно-допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населённых мест.
5. Звягинцева А. В., Вербицкая М. В. Гидрометеорологический мониторинг с оценкой влияния метеорологических характеристик на условия рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере (на примере объекта специализированного назначения) // Студент и наука. Воронеж, 2017. Вып. № 3. С. 184–191.

УДК 551.577.38 (571.53)

Климатические и синоптические особенности территории Иркутской области

К. А. Лощенко (loshchenko@bk.ru)¹
Н. В. Астафьева (nadezhdaastafeva@ya.ru)^{1,2}
С. А. Гарашук (svetlanchik.g@rambler.ru)¹
Т. А. Сверкунова (talsver@mail.ru)¹

¹ Иркутский государственный университет, г. Иркутск

² Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Иркутск

Аннотация. Обсуждаются современные тенденции изменений климата в Иркутской области по данным Реанализа NCEP/NCAR за 1948–2018 гг. На основе ежедневных синоптических карт за 2000–2018 гг. проанализированы характеристики приземных барических полей и атмосферных фронтов, определяющих сезонные особенности погодных и климатических характеристик в исследуемом регионе.

Ключевые слова: климат, синоптические процессы, атмосферные фронты, Иркутская область.

Введение

Одним из факторов, определяющих региональные особенности климата, являются синоптические процессы, формирование которых происходит под влиянием радиационного режима, циркуляционных условий и подстилающей поверхности. Термин «региональный» про-

исходит от латинского слова «regionalis», что в переводе значит областной. Поэтому региональные особенности климатических условий и синоптических процессов принято рассматривать в пределах отдельного региона, границы которого чаще всего выделяются по физико-географическому признаку [2; 4].

Для анализа региональных особенностей синоптических процессов на территории России широко применяются типизации синоптических процессов, которые позволяют в большом многообразии синоптических ситуаций найти общие черты развития атмосферных процессов в рассматриваемом регионе [3]. Над территорией России все многообразие синоптических процессов определяется смещением с зональной или меридиональной составляющей циклонов и антициклонов, барических ложбин и гребней, на структуру и динамику которых оказывают существенное влияние различные формы рельефа.

Объект исследования – территория Иркутской области расположена в южной части Восточной Сибири, почти в центре Евразийского материка. Крайние точки Иркутской области имеют следующие географические координаты: северная – $64^{\circ}15'$ с. ш., южная – $51^{\circ}18'$ с. ш., западная – $95^{\circ}38'$ в. д., восточная – $119^{\circ}10'$ в. д. Исследования синоптических процессов на территории Иркутской области начато в середине 1950-х гг. В.Л. Архангельским, на основании которых было выделено четыре основных синоптических типа: циклоническая и антициклоническая циркуляция, ложбины, ориентированные с севера и востока [1].

Результаты исследований

Для оценки сезонных особенностей изменений климата на территории Иркутской области были рассчитаны аномалии средних месячных значений метеорологических величин у поверхности Земли и на высотах стандартных изобарических поверхностей: 850 гПа (1,5 км), 700 гПа (3 км), 500 гПа (5 км), 300 гПа (9 км), 200 гПа (12 км), 70 гПа (18 км) и 10 гПа (30 км). Выявлено, что приблизительно со второй половины XX в. на территории Иркутской области происходит повышение средних температур в тропосфере (рис. 1). Причем скорость роста температур максимальная у поверхности Земли и почти вдвое уменьшается на верхней границе тропосферы. В стратосфере отмечается понижение температур, соизмеримое со скоростью роста температур в тропосфере.

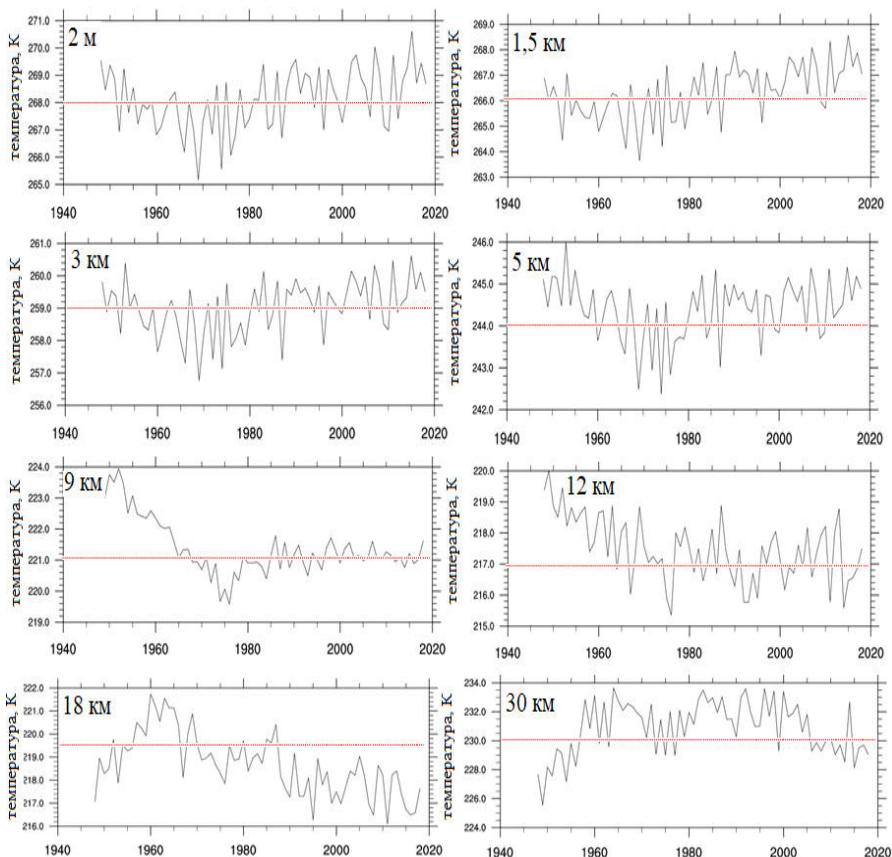


Рис. 1. Изменение средней годовой температуры воздуха, усредненной по территории Иркутской области в 1948–2018 гг. (красной линией показаны средние многолетние значения температур)

Повышение средних годовых температур в тропосфере на территории Иркутской области сопровождается повышением атмосферного давления у поверхности Земли и ростом геопотенциальных высот во всей толще тропосферы приблизительно с 1960-х гг., отмечается повышение уровня тропопаузы. В то же время на высоте 30 км в стратосфере происходит уменьшение геопотенциальных высот (рис. 2). Интересно, что за последние два десятилетия у поверхности Земли рост давления на территории исследуемого региона превалирует в холодный период года, особенно в зимние месяцы, а также во второй половине лета, тогда как весной преобладают тенденции падения давления. Что касается изменения атмосферных осадков, то после продолжи-

тельного периода (1950–1980-е гг.) тенденция уменьшения осадков сменилась тенденцией их увеличения, но в последние годы вновь преобладают отрицательные аномалии сумм осадков на территории Иркутской области.

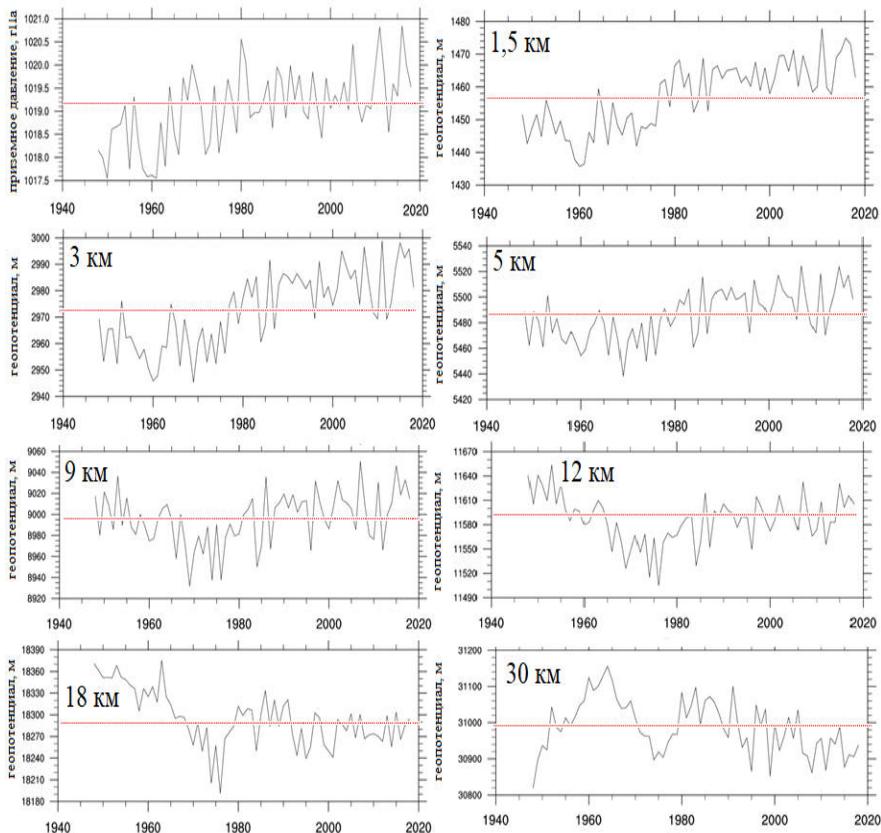


Рис. 2. Изменение средних годовых значений приземного давления и геопотенциальных высот на разных уровнях атмосферы, осредненных по территории Иркутской области в 1948–2018 гг. (красной линией показаны средние многолетние значения)

Резкие изменения погодных условий на территории Иркутской области в большинстве случаев вызваны прохождением глубоких циклонов и связанных с ними динамически значимых атмосферных фронтов. По траекториям смещения на территории области чаще всего на погодные условия оказывают влияние ныряющие и южные цикло-

ны. Ныряющие циклоны образуются над Северной Атлантикой (I тип) либо на арктическом фронте вблизи вершины тропосферного блокирующего гребня (II тип). Характерной особенностью при смещении ныряющих циклонов на территорию Иркутской области является меридиональная направленность высотной фронтальной зоны, способствующая вторжению арктического воздуха. Так как их смещение происходит под тыловой частью высотных макроложбин и циклонов, где преобладают адвективно-динамические факторы роста давления, то такие циклоны обычно быстро заполняются, вызывая кратковременное ухудшение погодных условий в регионе. Южные циклоны образуются под передней частью глубокой меридиональной тропосферной ложбины, распространяющейся южнее 50° с. ш. Поэтому в отличие от ныряющих циклонов являются более активными барическими образованиями.

Как показал анализ приземных синоптических карт в 2000–2018 гг. погодные условия на территории Иркутской области примерно в 50 % случаев определяли циклоны, в 29 % случаев антициклоны и в 22 % случаев малоградиентные барические поля (МБП) (рис. 3). В течение года максимальная повторяемость циклонов отмечалась в июне (64 %) и в переходные сезоны года в мае и сентябре (по 61 %), а минимальная – в декабре (35 %). Антициклоны чаще всего на синоптических картах определяли погодные условия в Иркутской области в августе (42 %), возможно этим можно объяснить увеличение засушливости климата во вторую половину лета в последние десятилетия. Наряду с летним максимумом выделяется зимний максимум повторяемости антициклонов в условиях господствующего влияния зимнего континентального центра действия атмосферы – Азиатского антициклона. Влияние малоградиентных барических полей повышенного давления чаще проявляется в зимние месяцы (27–29 %), а пониженного давления в августе и сентябре (по 23 %) и в наименьшей степени выражено в мае (10 %).

Сравнительный анализ распределения циклонов различных типов показал, что в исследуемый период 2000–2018 гг. на территории Иркутской области ныряющие циклоны отмечались в 3,7 раз чаще южных циклонов (рис. 4). Интересно, что смещение ныряющих циклонов примерно равновероятно в течение всего года с некоторым увеличением их повторяемости в ноябре (53 %) и в январе (45 %). Южные циклоны в январе отмечались в единичном числе случаев, максимальная их повторяемость (52 %) приходится на период апрель-июнь и 26 % на сентябрь-октябрь. Интересно, что ранее по многолетним данным их максимум приходился на вторую половину лета.

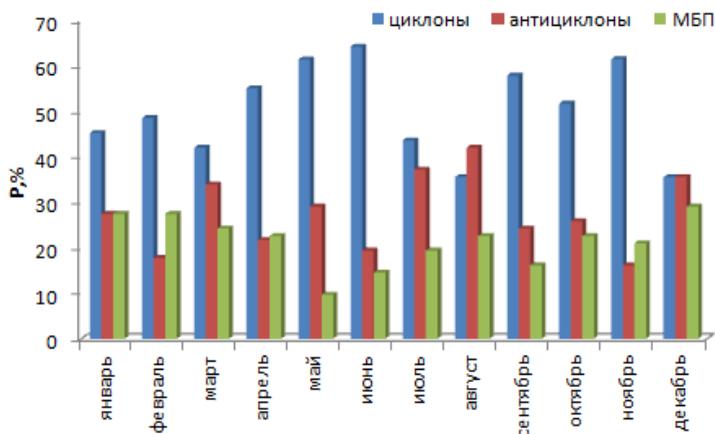


Рис. 3. Средняя повторяемость (%) приземных барических полей различного типа на территории Иркутской области в 2000–2018 гг.

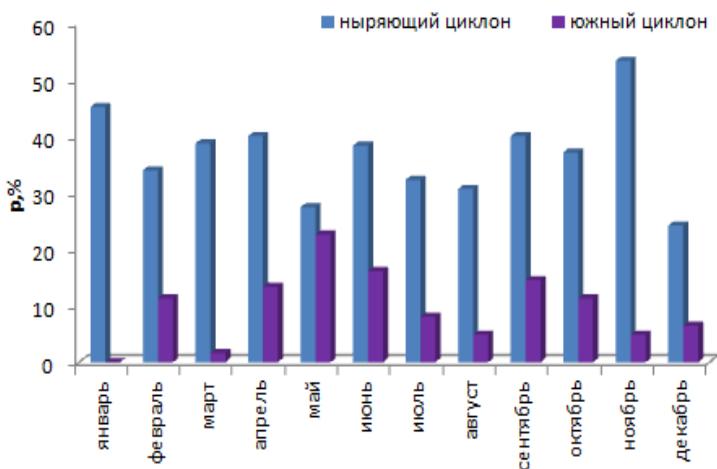


Рис. 4. Средняя повторяемость (%) ныряющих и южных циклонов на территории Иркутской области в 2000–2018 гг.

В распределении локальных циклонов и антициклонов, которые нередко носят термический характер, следует отметить, что локальные антициклоны наблюдались в 2,4 раза чаще локальных циклонов (рис. 5). Максимальная повторяемость локальных антициклонов (15–19 %) приходится на вторую половину лета и начало зимы, тогда как локальные циклоны чаще всего отмечались на синоптических картах в мае и июне (10–11 %).

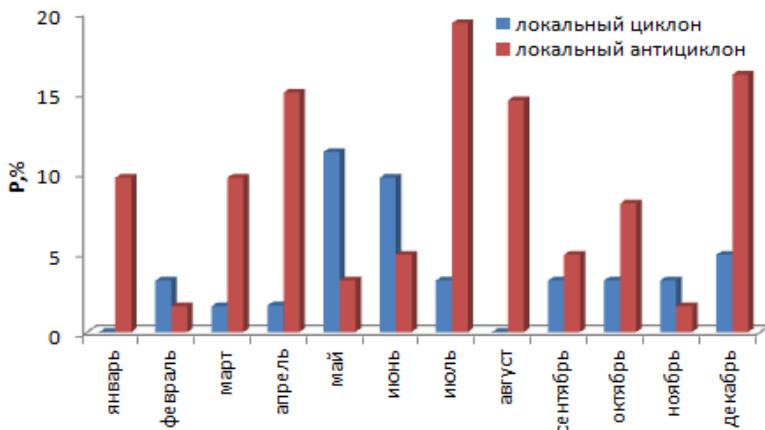


Рис. 5. Средняя повторяемость локальных циклонов и антициклонов на территории Иркутской области в 2000–2018 гг.

С прохождением циклонов тесно связаны атмосферные фронты, которые по многолетним данным за 2000–2018 гг. на территории Иркутской области по числу случаев за календарный сезон чаще всего отмечались летом (рис. 6). Этим можно объяснить максимум осадков в летние месяцы, далее по числу случаев следует осень, когда возрастает количество ныряющих циклонов при увеличении горизонтальных градиентов температур в бароклинно-активных зонах подвижного циклогенеза на территории Северного полушария. Реже всего атмосферные фронты отмечаются зимой, когда в условиях господствующего влияния гребней Азиатского антициклона на территории исследуемого региона получают развитие процессы размывания атмосферных фронтов (фронтолиз) либо происходит смещение атмосферных фронтов вдоль северной периферии Азиатского антициклона.

По типам атмосферных фронтов зимой и в переходные сезоны года чаще отмечаются теплые фронты, причем их влияние более выражено в северных и западных районах области. Летний период отличается более выраженным влиянием фронтов окклюзии и основных холодных фронтов в условиях адвекции холода на теплую подстилающую поверхность. Также летом более часто на синоптических картах отмечаются вторичные холодные фронты при адвекции холода в тыловой части циклонов.

Интересно, что динамически значимыми на высоте высотной фронтальной зоны (АТ-500 гПа) с градиентами геопотенциала ≥ 16

дкм/1000 км чаще всего оказывались теплые фронты (57 % случаев от общего количества фронтов данного типа). Основным и вторичным холодным фронтам динамически значимая высотная фронтальная зона соответствовала в 42 % случаев, а фронтам окклюзии в 39 %.

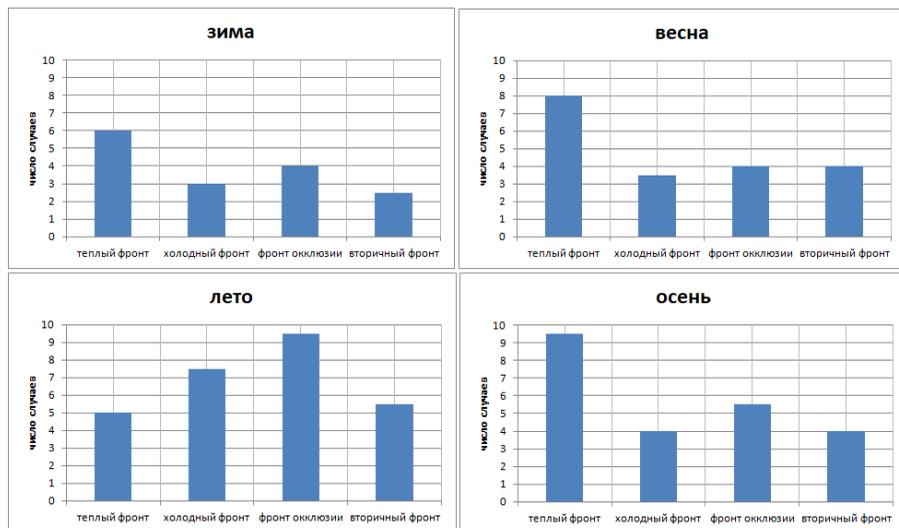


Рис. 6. Распределение различных типов атмосферных фронтов в календарные сезоны года на территории Иркутской области в 2000–2018 гг.

Выводы

Современные тенденции изменений климата на территории Иркутской области характеризуются повышением средних годовых температур в тропосфере и их понижением в стратосфере, которое сопровождается повышением средних годовых значений приземного давления и геопотенциальных высот в тропосфере. В стратосфере преобладают тенденции понижения средних температур на фоне уменьшения геопотенциальных высот.

В последние два десятилетия потепление происходит в основном за счет тропосферного антициклогенеза в теплый период года, в зимние месяцы отмечается увеличение числа отрицательных аномалий температур на фоне высотного циклогенеза и приземного антициклогенеза.

Изменения погодных условий на территории Иркутской области в 2000–2018 гг. чаще всего были связаны с прохождением ныряющих и южных циклонов, причем ныряющие циклоны отмечались практи-

чески в 4 раза чаще южных. Максимум повторяемости ныряющих циклонов приходится на холодный период (X–III), южных – на теплый (IV–IX).

Список литературы

1. *Архангельский В. Л.* Пути и скорости перемещения циклонов и антициклонов в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке // Тр. ДВНИГМИ. 1956. Вып. 1. С. 14–23.
2. *Лощенко К. А.* Барические образования и атмосферные фронты на территории Иркутской области в 2000–2013 гг. // Изв. ИГУ. Сер. Науки о Земле. 2015. Т. 12. С. 50–63.
3. *Педь Д. А., Попов А. В.* О классификации средних месячных полей H500 в первом естественном синоптическом районе // Тр. Гидромет. науч.-исслед. центра СССР. 1980. Вып. 231. С. 100–121.
4. *Хандошко Л. А.* Региональные синоптические процессы : учеб. пособие. Л. : Ленингр. гидрометеорол. ин-т, 1988. 167 с.

УДК 504.064.36(571.53)(-21)

Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха г. Шелехова

С. А. Новикова (novikovasveta41@mail.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Проведена оценка уровня загрязнения воздушного бассейна г. Шелехова, создаваемого источниками антропогенного происхождения. Проведено исследование состояния атмосферного воздуха по данным о выбросах вредных веществ и метеорологических параметрах, зафиксированных на автоматической станции контроля загрязнения атмосферы.

Ключевые слова: автомобильный транспорт, стационарные источники, повышенные концентрации, автоматическая станция контроля загрязнения атмосферы.

Введение

Шелехов – административный центр Шелеховского района, один из ведущих промышленных центров Иркутской области. Входит в состав Иркутской агломерации. Находится на юге Иркутской области – в 18 км (между центрами) или в 7 км (между границами) от областного центра – г. Иркутска и в 75 км от озера Байкал. Территория города составляет 3100 га. Климат г. Шелехова континентальный. Климатические особенности Шелехова формируются под воздействием его расположения на Иркутско-Черемховской равнине в широкой долине р. Иркут и ее притока р. Олхи. Местность представляет собой сильно расчлененный рельеф с узкими водоразделами, пологими склонами и

наличием хорошо разработанных речных долин, окруженных приречными возвышенностями с высотами 480–600 м. Определяющее значение в условиях формирования состояния воздушной среды над территорией г. Шелехова с учетом особенностей климатического фона Прибайкалья имеют характеристики воздушного переноса и устойчивости приземного слоя атмосферы [4].

Город Шелехов входит в Приоритетный список наиболее загрязненных городов Иркутской области [1–3]. Источниками загрязнения атмосферного воздуха являются автотранспортные средства, проходящие по федеральной трассе М-55 «Байкал» (Култуский тракт), расположенной вдоль г. Шелехова, соединяющей город с областным центром (на северо-востоке) и Байкалом (на юге); Иркутский алюминиевый завод (филиал ООО «РУСАЛ Братск»), который находится в нескольких километрах от города. Кроме того, через Шелехов проходит федеральная трасса Р-258 «Байкал» (Иркутск – Улан-Удэ – Чита), поэтому автотранспорт здесь является круглосуточным источником шума и выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. В транспортном потоке г. Шелехова отмечается большое количество транзитных грузовых автомобилей и автобусов. В городе достаточно развитая система городского транспорта, в которой, в основном, функционируют маршрутные такси, представленные 8 маршрутами, один из которых работает лишь в летний период времени. Около 80 % маршрутного транспорта представлено автомобилями «Газель». Все маршруты обслуживаются частными предприятиями, муниципального транспорта в городе нет. Перевозки из Шелехова в другие города и населенные пункты района и области осуществляются 16 маршрутами. Через Шелехов проходит две железнодорожные станции: «Шелехов» в поселке Индивидуальный и Гончарово в микрорайоне Привокзальный [4].

Контроль выбросов загрязняющих веществ в атмосферу является одной из актуальных задач специалистов в области охраны окружающей среды и экологии современности. Проблема загрязнения атмосферного воздуха антропогенными примесями является актуальной и для городов Иркутской агломерации, в частности г. Шелехова. В городе работает автоматическая станция контроля загрязнения атмосферного воздуха – АСК-А № 6, расположенная в черте города. Кроме того, на АСК-А осуществляется контроль основных метеорологических параметров и передача по радиоканалу полученных оперативных данных в центр сбора и обработки информации. Данные, фиксируемые на АСК-А, являются интегральной характеристикой уровня за-

грязнения атмосферы, поскольку включают выбросы от стационарных источников промышленных предприятий, автомобильного транспорта, а также дальний перенос воздушных масс.

Газоаналитическое оборудование автоматических станций контроля загрязнения атмосферного воздуха г. Шелехова дает возможность измерения в атмосферном воздухе концентраций следующих веществ: диоксид серы (SO_2), сероводород (H_2S), оксиды азота (NO , NO_2), аммиак (NH_3), оксид углерода (CO), озон (O_3), метан (CH_4) и сумма углеводородов без метана ($\text{C}_2\text{-C}_{12}$), взвешенные частицы (пыль) – PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$.

Методы исследования и материалы

В работе проведена оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха г. Шелехова выбросами промышленных предприятий, автомобильного транспорта и других источников. С помощью методов математической статистики обработаны данные о выбросах загрязняющих веществ и метеорологических параметрах за период с 2014 по 2016 гг., зафиксированные на АСК-А № 6. Полученные данные были проанализированы с целью оценки уровня загрязнения атмосферы и установления зависимости между выбросами загрязняющих веществ и метеорологическими параметрами.

В работе были рассчитаны коэффициенты корреляции между концентрациями загрязняющих веществ: оксид углерода (CO), оксид азота (NO), диоксид азота (NO_2), диоксид серы (SO_2), озон, взвешенные частицы и метеорологическими параметрами (температура воздуха, влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра) за период с 2014 по 2016 г. (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между выбросами загрязняющих веществ и метеорологическими параметрами, зафиксированными на АСК-А № 6 г. Шелехова

Концентрации загрязняющих веществ, $\text{мг}/\text{м}^3$	Метеорологические параметры				
	T, °C	H, %	P, мм.рт.ст.	V, м/с	N, град.
Оксид углерода (CO)	-0,877	0,471	0,583	-0,404	0,041
Оксид азота (NO)	-0,834	0,651	0,772	-0,645	0,135
Диоксид азота (NO_2)	-0,698	0,037	0,101	0,157	0,181
Диоксид серы (SO_2)	-0,546	0,598	0,725	-0,651	0,310
Озон (O_3)	0,384	-0,773	-0,101	0,829	0,305
Взвешенные частицы (PM_{10})	-0,251	0,127	0,475	-0,223	0,578

Примечание: °C – градусы Цельсия; % – проценты; мм. рт. ст. – миллиметры ртутного столба; м/с – метры в секунду; град. – градусы.

По результатам проведенных расчетов коэффициенты корреляции между концентрациями загрязняющих веществ и направлением ветра (N) положительные; между концентрациями загрязняющих веществ (кроме озона), влажностью воздуха (H), и атмосферным давлением (P) – положительные, что свидетельствует о прямой линейной зависимости между этими показателями. Корреляции между концентрациями загрязняющих веществ, температурой воздуха (T) и скоростью ветра – V (за исключением значений концентраций озона и диоксида азота) – отрицательные, что свидетельствует об обратной линейной связи между этими показателями (см. табл. 1).

Далее были построены диаграммы средних концентраций вредных веществ, зафиксированных на АСК-А № 6 г. Шелехова за период 2014–2016 гг. (рис. 1–6).

На рисунках 1–3 представлена динамика максимальных значений концентраций загрязняющих веществ.

Наибольшие концентрации оксида углерода (CO) выявлены в осенне-зимние месяцы: ноябрь – декабрь 2014 г., декабрь-февраль 2015 г. и январь-февраль 2016 г. Превышения максимально разовой и среднесуточной предельно-допустимых концентраций (ПДК_{мр} и ПДК_{сс}, соответственно) оксида углерода не зафиксированы.

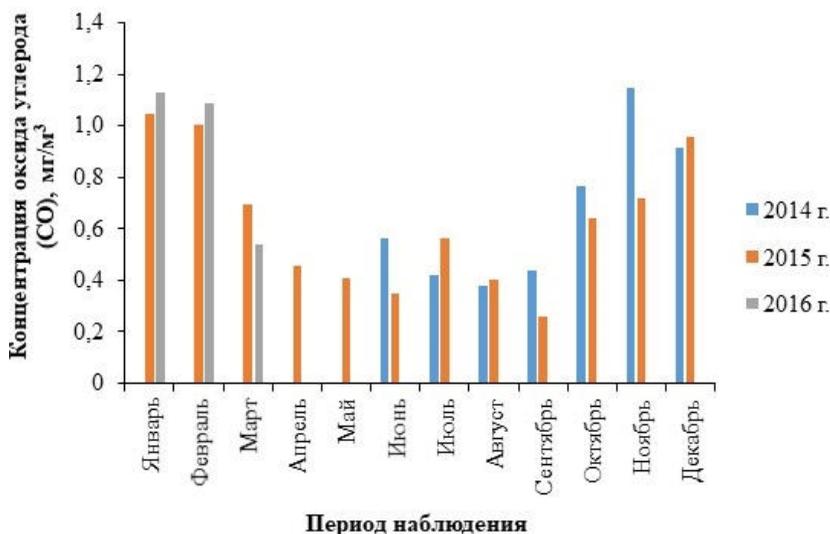


Рис. 1. Динамика средних концентраций оксида углерода (CO), зарегистрированных на АСК-А № 6 г. Шелехова в 2014–2016 гг.

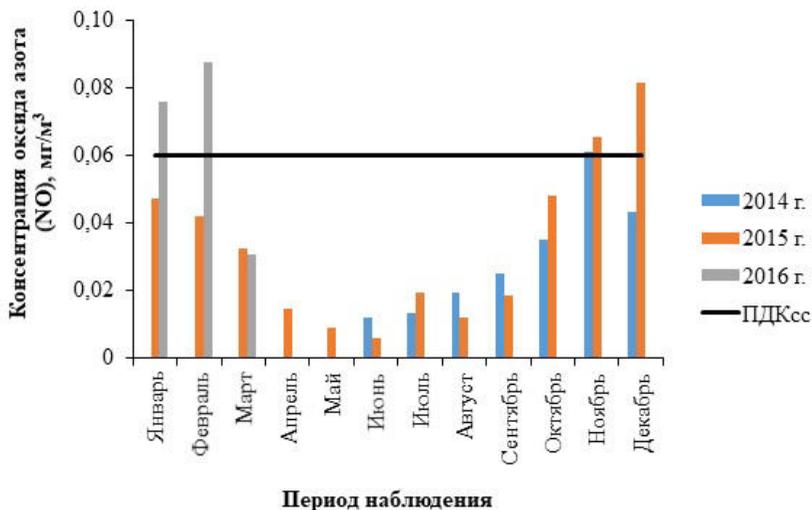


Рис. 2. Динамика средних концентраций оксида азота (NO), зарегистрированных на АСК-А № 6 г. Шелехова в 2014–2016 гг.

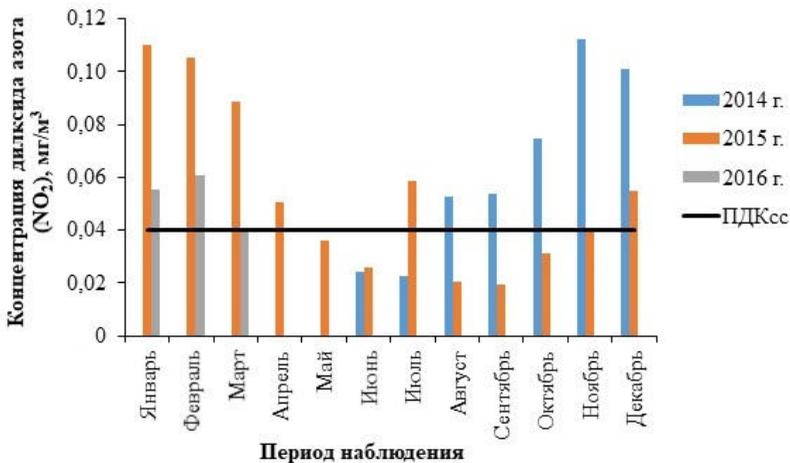


Рис. 3. Динамика средних концентраций диоксида азота (NO₂), зарегистрированных на АСК-А № 6 г. Шелехова в 2014–2016 гг.

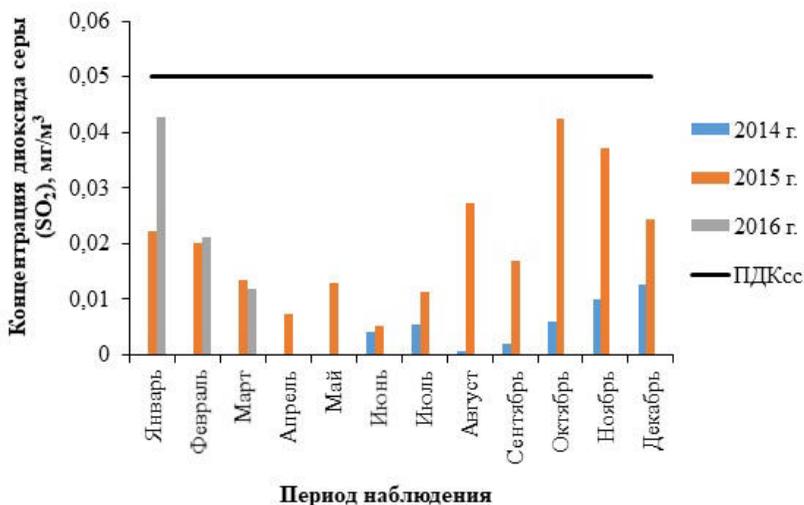


Рис. 4. Динамика средних концентраций диоксида серы (SO₂), зарегистрированных на АСК-А № 6 г. Шелехова в 2014–2016 гг.

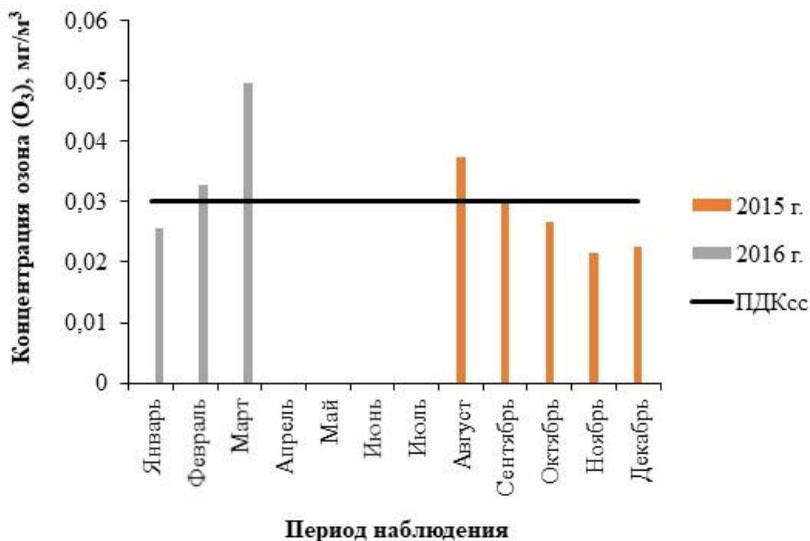


Рис. 5. Динамика средних концентраций озона (O₃), зарегистрированных на АСК-А № 6 г. Шелехова в 2014–2016 гг.

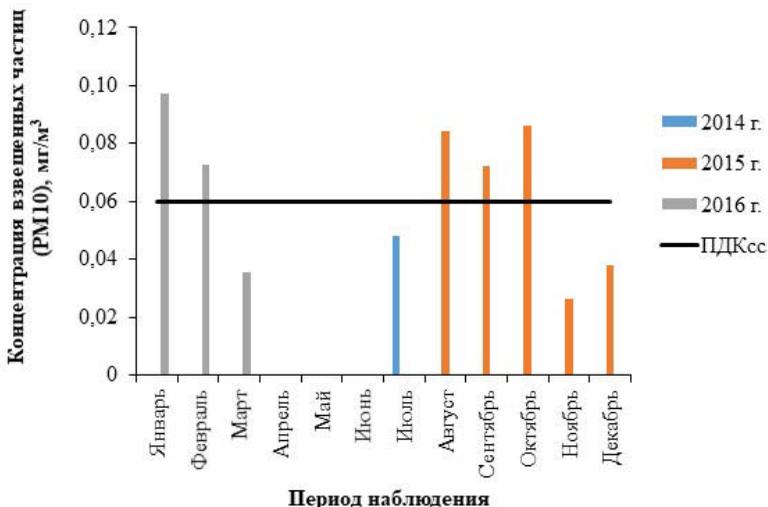


Рис. 6. Динамика средних концентраций взвешенных частиц (PM10), зарегистрированных на АСК-А № 6 г. Шелехова в 2014–2016 гг.

Превышения ПДК_{сс} оксида азота (NO) отмечались в ноябре-декабре 2015 г. и январе – феврале 2016 г. (см. рис. 2), превышения концентраций диоксида азота (NO₂) наблюдались в августе-декабре 2014 г., январе – апреле, июле и декабре 2015 г., а также январе – феврале 2016 г. (см. рис. 3). Превышения ПДК_{мр} не зафиксированы.

Наибольшие значения средних концентраций диоксида серы прослеживались в 2015 г. (октябрь – ноябрь), в 2016 г. (январь), наименьшие – в 2014 г. (июнь – октябрь), 2015 г. (апрель – июль), также 2016 г. (март). Превышения ПДК_{сс} и ПДК_{мр} SO₂ не отмечались (см. рис. 4).

Наибольшие значения средних концентраций озона наблюдались в августе 2015 г. и марте 2016 г., наименьшие – в ноябре 2015 г. и январе 2016 г. Превышения ПДК_{сс} были выявлены в августе 2015 г. и феврале-марте 2016 г. Превышения ПДК_{мр} озона не были зафиксированы (см. рис. 5).

За период 2014–2015 гг. наблюдались низкие значения средних концентраций взвешенных частиц (см. рис. 6), что касается средних концентрациях взвешенных частиц: наименьшие значения были зафиксированы в июне 2014 г., ноябре – декабре 2015 г., марте 2016 г. В августе – октябре 2015 г. и январе – феврале 2016 г. отмечались превышения ПДК_{сс}. Превышения ПДК_{мр} взвешенных частиц не зафиксированы.

На основе данных средних концентрации диоксида азота (NO_2) и метеопараметров (скорости ветра и температуры воздуха), зафиксированных на АСК-А № 6 г. Шелехова за 2015 г. были построены графики, представленные на рис. 7–8.

На рисунке 7 прослеживается динамика изменений концентрации диоксида азота и скорости ветра в 2015 г. На графиках видно, что при повышении скорости ветра, концентрация диоксида азота снижается, а при понижении скорости ветра – возрастает. Следовательно, чем ниже скорость ветра, тем создаются наиболее неблагоприятные условия для рассеивания примесей в атмосфере.

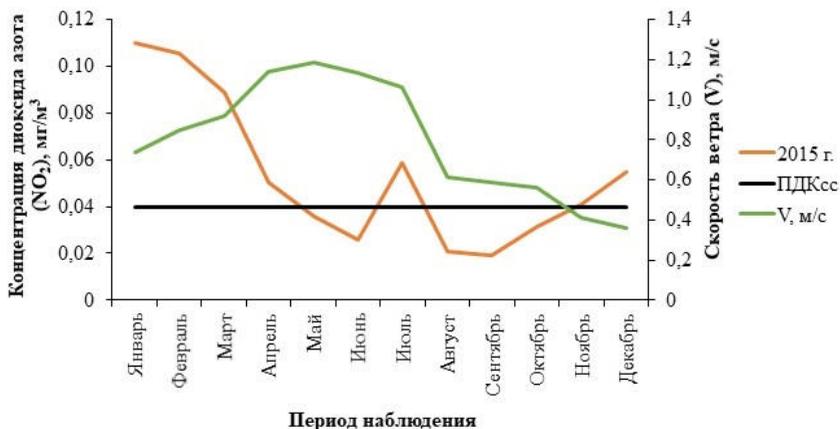


Рис. 7. Динамика средних концентраций диоксида азота (NO_2) и скорости ветра, зафиксированных на АСК-А № 6 г. Шелехова в 2015 г.

На рисунке 8 прослеживается зависимость концентрации диоксида азота от температуры воздуха. Как видно на графиках: при повышении температуры воздуха, концентрация диоксида азота падает, а при понижении температуры – возрастает. Таким образом, чем выше температура окружающей среды, тем создаются наиболее благоприятные условия для рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.

Для данных о выбросах и метеопараметрах, зафиксированных на АСК-А № 6 г. Шелехова, были рассчитаны статистические характеристики разброса и положения в программе Microsoft Office Excel. В таблице 2 представлены результаты проведенных расчетов.

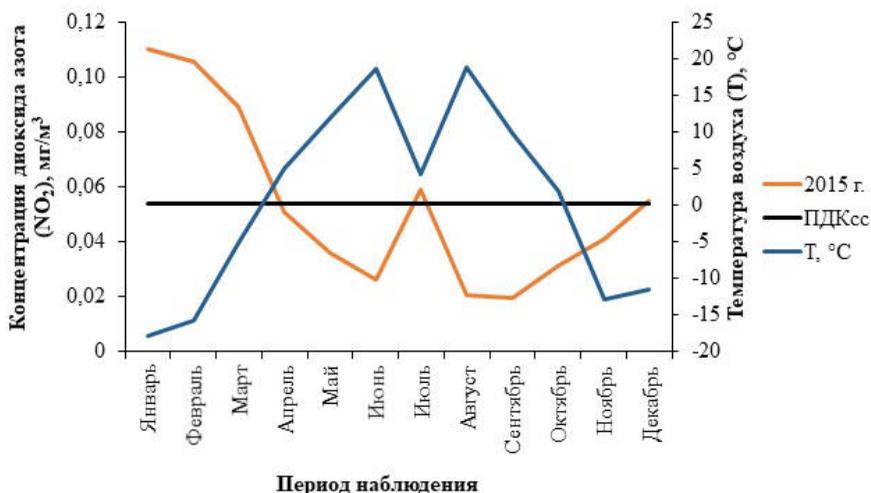


Рис. 8. Динамика средних концентраций диоксида азота (NO₂) и температуры воздуха, зафиксированных на АСК-А № 6 г. Шелехова в 2015 г.

Результаты и их обсуждение

По результатам проведенных расчетов (см. табл. 1) наибольшими коэффициентами корреляции (от -0,698 до 0,829), свидетельствующими о «сильных» прямых и обратных связях, соответственно, характеризуются показатели концентраций оксида углерода, оксида азота, диоксида азота и температуры воздуха (-0,877, -0,834, -0,698, соответственно); озона и влажности воздуха (-0,773); оксида азота, диоксида серы и атмосферного давления (0,772, 0,725, соответственно); озона и скорости ветра (0,829).

«Заметными» прямыми и обратными связями характеризуются коэффициенты корреляции между такими показателями, как: оксид азота, диоксид серы и влажность воздуха (0,651 и 0,598, соответственно); взвешенные вещества (PM₁₀) и направление ветра (0,578); оксид углерода и атмосферное давление (0,583); оксид азота, диоксид серы и скорость ветра (-0,645 и -0,651, соответственно); диоксид серы и температура воздуха (-0,546).

«Умеренными» прямыми и обратными связями характеризуются коэффициенты корреляции между такими показателями как: озон и температура воздуха (0,384); оксид углерода и влажность воздуха (0,471); взвешенные вещества (PM₁₀) и атмосферное давление (0,475);

диоксид серы, озон и направление ветра (0,310 и 0,305, соответственно); оксид углерода и скорость ветра (-0,404).

«Слабыми» прямыми и обратными связями характеризуются коэффициенты корреляции между такими показателями как: диоксид азота, взвешенные вещества (PM10) и влажности воздуха (0,037 и 0,127, соответственно); диоксид азота, озон и атмосферное давление (0,101 и -0,101, соответственно); диоксид азота, взвешенные вещества (PM10) и скорость ветра (0,157 и -0,223); а также оксид углерода, оксид азота, диоксид азота и направление ветра (0,041, 0,135, 0,181, соответственно); взвешенные вещества (PM10) и температура воздуха (-0,251).

Как показали результаты проведенных расчетов, значения коэффициентов вариации концентраций загрязняющих веществ и метеопараметров, зафиксированных на АСК-А № 6, в большинстве случаев не превышают 17 %, что свидетельствует об однородности полученных данных (см. табл. 2).

Что касается коэффициентов асимметрии: среди таких метеорологических параметров, как влажность воздуха, атмосферное давление и направление ветра в 2014–2016 гг., температура воздуха в 2016 г. прослеживается левая асимметрия, обусловленная большими значениями этих показателей. В отношении других рассматриваемых характеристик отмечается правая асимметрия, определяемая наименьшим разбросом значений концентраций загрязняющих веществ и скорости ветра в 2014–2016 гг., и температуры воздуха в 2014–2015 гг. (см. табл. 2).

Заключение

Таким образом, в настоящее время уровень загрязнения атмосферы г. Шелехова высок. По ряду загрязняющих веществ таких, как оксиды азота, диоксид азота, озон, взвешенные частицы (PM10) наблюдаются превышения самых жестких санитарно-гигиенических нормативов – ПДК_{сс}, что создает потенциальную опасность для здоровья населения города. Более того, в результате проведенного исследования установлено, что при низких скоростях ветра (штиле) и температурах воздуха создаются условия неблагоприятные для рассеивания примесей в атмосферном воздухе. В связи с этим, необходимо разрабатывать комплекс мероприятий, направленных на снижение выбросов вредных веществ в атмосферу г. Шелехова.

Таблица 2

Результаты расчетов характеристик разброса и положения по данным о выбросах загрязняющих веществ и метеопараметрах в г. Шелехове (АСК-А № 6) за период 2014–2016 гг.

2014 г.											
Характеристики	CO ₂ , мг/м ³	NO ₂ , мг/м ³	NO ₂ , мг/м ³	SO ₂ , мг/м ³	O ₃ , мг/м ³	PM10, мг/м ³	T, °C	H, %	P, мм.рт.ст.	V, м/с	N, град.
Среднее знач.	0,661	0,030	0,063	0,006	-	0,024	6,196	61,749	716,357	0,786	117,347
Медиана	0,301	0,004	0,026	0,001	-	0,000	6,897	71,371	717,689	0,414	7,457
Мода	0,496	0,016	0,048	0,003	-	0,018	6,014	62,129	716,536	0,700	157,521
Размах	0,257	0,032	0,054	0,010	0,007	0,024	2,860	33,862	310,685	0,490	94,510
Дисперсия	0,401	0,002	0,003	0,000	-	0,001	31,909	273,689	15,469	0,280	11540,067
Средн. кв. откл.	0,546	0,038	0,050	0,009	-	0,024	5,620	15,660	3,767	0,525	93,041
Экссесс	6,591	10,376	3,872	22,493	-	300,837	-0,487	-0,644	-0,328	-0,018	-1,449
Козф. асим.	1,957 п.а.	2,770 п.а.	1,667 п.а.	3,457 п.а.	-	13,354 п.а.	0,120 п.а.	-0,187 л.а.	-0,334 л.а.	0,646 п.а.	-0,166 л.а.
Козф. вариации	0,804	1,365	0,793	1,793	-	12,636	-325,716	0,258	0,525	0,687	0,714
2015 г.											
Среднее знач.	0,625	0,033	0,054	0,020	0,028	0,061	0,501	61,838	717,776	0,796	188,598
Медиана	0,128	0,002	0,025	0,002	0,012	0,000	-0,374	68,067	719,071	0,442	109,667
Мода	0,428	0,014	0,038	0,010	0,026	0,005	0,208	62,858	717,736	0,683	225,533
Размах	0,625	0,033	0,054	0,020	0,028	0,061	0,502	61,839	717,776	0,796	188,595
Дисперсия	0,309	0,003	0,002	0,002	0,000	0,067	40,379	258,589	21,507	0,312	13023,824
Средн. кв. откл.	0,508	0,042	0,038	0,032	0,016	0,208	6,231	14,996	4,419	0,553	112,827
Экссесс	28,797	12,397	3,315	33,598	-0,005	287,965	-0,203	-0,278	-0,245	0,525	-1,167
Козф. асим.	2,481 п.а.	2,827 п.а.	1,432 п.а.	5,520 п.а.	0,665 п.а.	10,889 п.а.	0,201 п.а.	-0,402 л.а.	-0,151 л.а.	0,830 п.а.	-0,448 л.а.
Козф. вариации	0,837	1,335	0,731	1,541	0,581	3,101	38,639	26,613	0,615	0,773	0,601
2016 г.											
Среднее знач.	0,917	0,065	0,052	0,025	0,036	0,068	-13,269	68,308	727,415	0,500	177,581
Медиана	0,105	0,002	0,023	0,002	0,010	0,027	-6,963	77,700	731,667	0,000	262,000
Мода	0,671	0,027	0,048	0,015	0,034	0,046	-12,997	70,183	727,800	0,333	213,100
Размах	0,917	0,065	0,052	0,025	0,036	0,068	-13,268	68,303	727,415	0,500	177,581
Дисперсия	0,689	0,009	0,001	0,001	0,001	0,005	57,916	195,472	36,129	0,314	12324,960
Средн. кв. откл.	0,794	0,092	0,035	0,031	0,023	0,065	7,583	12,958	5,960	0,547	110,651
Экссесс	5,244	6,992	0,026	12,293	-0,786	4,748	-0,537	-0,017	-0,377	1,108	-1,289
Козф. асим.	1,816 п.а.	2,417 п.а.	0,620 п.а.	2,933 п.а.	0,468 п.а.	2,055 п.а.	-0,198 л.а.	-0,453 л.а.	-0,236 л.а.	1,176 п.а.	-0,224 л.а.
Козф. вариации	0,866	1,473	0,667	1,279	0,640	0,901	-1,051	19,596	0,820	1,171	0,623

Примечание: «-» – нет данных; Средн. кв. откл. среднее квадратическое отклонение; Козф. асим. коэффициент асимметрии; Козф. вариации – коэффициент вариации; л.а. распределение асимметрично (левая асимметрия); п.а. распределение асимметрично (правая асимметрия).

В рамках развития Иркутской агломерации и программы «Большой Иркутск» планируется соединить города Шелехов, Иркутск и Ангарск линиями скоростного трамвая. Кроме того, в пяти километрах от города располагается Иркутская объездная дорога, которая значительно сокращает путь из Шелехова до Мегета, Ангарска и Иркутского микрорайона Новоленино. Она соединила федеральные трассы М-53 и М-55, что позволило миновать трансферному автомобильному транспорту и без того загруженные улицы Иркутска и Култукский тракт.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта для аспирантов и молодых сотрудников ИГУ в рамках научного проекта № 091-18-230.

Список литературы

1. О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2014 г. : гос. докл. / М-во природ. ресурсов РФ по Иркут. обл. ; Гл. упр. природ., ресурсов и охраны окруж. среды, адм. Иркут. обл. Иркутск : Форвард, 2015. 328 с.
2. О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2015 г. : гос. докл. / М-во природ. ресурсов РФ по Иркут. обл. ; Гл. упр. природ., ресурсов и охраны окруж. среды, адм. Иркутской обл. Иркутск : Время странствий, 2016. 316 с.
3. О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2016 г. : гос. докл. / М-во природ. ресурсов РФ по Иркут. обл. ; Гл. упр. природ., ресурсов и охраны окруж. среды, адм. Иркутской обл. Иркутск : Мегапринт, 2017. 274 с.
4. Шелехов (город) [Электронный ресурс] // Википедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D1%85%D0%BE%D0%B2_\(%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B4\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D1%85%D0%BE%D0%B2_(%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B4)) (дата обращения: 20.03.2019).

УДК 504.064.36:622(571.56)

Источники выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух при строительстве поисковой скважины № 665 Иктехского участка недр (Якутия)

С. А. Новикова (novikovasveta41@mail.ru)

Н. О. Высоких (natvysokih@yandex.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. В работе проведена оценка загрязнения атмосферного воздуха при строительстве поисковой скважины № 665 Иктехского участка недр. Выявлены основные источники выбросов вредных веществ и ингредиенты, вносящие наибольший вклад в загрязнение воздушного бассейна.

Ключевые слова: Якутия, участок недр, поисковая скважина нефти и газа, источники выбросов, загрязнение атмосферы.

Введение

Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) предназначена для выявления характера, интенсивности, степени опасности влияния планируемой хозяйственной деятельности на состояние окружающей среды и здоровье населения в период инженерной подготовки площадки поисковой скважины № 665 Иктехского участка недр. ОВОС направлена на снижение антропогенной нагрузки и устранение последствий чрезмерного техногенного воздействия на экосистемы, предупреждение сверхнормативного загрязнения окружающей среды, сохранение биологического и ландшафтного разнообразия, а также создания нормальных условий жизнедеятельности населения.

Иктехский участок недр расположен в Республики Саха (Якутия) в Ленском и Мирнинском районах. Схема расположения участка недр представлена на рис. 1 [6].



Рис. 1. Ситуационная схема расположения Иктехского участка недр [6]

Ленский и Мирнинский районы расположены на восточном склоне и в центральной части Сибирского плоскогорья, которое постепенно переходит Центрально-Якутскую низменность, а на юге окаймляется широкой полосой прогибов, протянувшихся с востока на запад от якутской впадины до нижнего течения Ангары. В геоморфологическом отношении рассматриваемый участок работ расположен в пределах Приленского плато. Основанием Среднесибирского плоско-

горья, является древняя Сибирская платформа, сложенная кристаллическими и перекрытая осадочными породами.

Рельеф местности с понижением с запада на восток, абсолютные отметки высот колеблются от 336,48 до 331,46 м. Уклон по площадке составляет 1–2. Исследуемый район находится на относительно равнинном Приленском плато. Средние высоты равнины составляют от 800 м на юге до 300 м на севере. На исследуемом участке выделено три основных типа поверхностей рельефа: водоразделы, склоны и речные долины. На водораздельных поверхностях сформировался структурно-денудационный рельеф. На склонах развит эрозивно-денудационный рельеф. В речных долинах выделен эрозивно-аккумулятивный тип рельефа.

Ландшафты района строительства относятся в основном к таежным и среднетаежным. Таежные ландшафты представлены здесь на всех трех основных гипсометрических позициях суши – на плоских поверхностях водоразделов и их склонах, в речных долинах, что, наряду с климатом и геологическим строением, также определяет значительное разнообразие его пространственной структуры [6].

Климат данного района формируется под влиянием следующих факторов:

- географического положения в высоких широтах;
- западного переноса влажных и более теплых атлантических воздушных масс;
- постоянного взаимодействия морских атлантических и континентальных сибирских воздушных масс на протяжении всего года;
- активной циклонической деятельности в теплый период года;
- приполюсной перемены высокого давления и сибирского барического максимума зимой;
- характера рельефа.

Довольно холодная погода в зимние месяцы над территорией месторождения обусловлена влиянием арктических антициклонов и активной циклонической деятельностью на арктическом фронте (поверхности раздела арктических и умеренных воздушных масс). Климат района резко континентальный с холодной продолжительной зимой и коротким жарким летом [6]. Среднегодовая температура воздуха составляет минус 7,5 °С. Самым холодный месяц – январь, теплый – июль. Переход через 0 °С в период весеннего подъема среднесуточной температуры отмечается в конце третьей декады апреля. При этом ночные температуры могут опускаться ниже 0 °С. Май является периодом наступления безморозных дней. Продолжительность

этого периода для района изысканий составляет 113 суток. Лето достаточно теплое [4].

Среднемесячная температура почвы на глубине 40 см бывает положительной с мая по октябрь, а в северных районах – с июня по сентябрь. Промерзает почва обычно в конце октября – начале ноября. Полное оттаивание происходит в третьей декаде мая. Наибольшая глубина промерзания наблюдается в марте, а в некоторые холодные зимы – в апреле. Максимальная глубина промерзания грунта для района изысканий, в естественных условиях, при наличии снежного покрова (почва суглинистая оподзоленная), составляет 3,2 м [6].

Относительная влажность воздуха в течение года наибольшее значение имеет зимой, наименьшее – в начале лета. Среднемесячная влажность воздуха в районе исследования составляет 70 %. Наибольшее значение относительной влажности воздуха наблюдается в сентябре – октябре. Самым сухим месяцем по относительной влажности является май [6].

Значительное влияние на распределение осадков по территории оказывает рельеф. Летние циклоны проходят чаще и более интенсивнее, чем зимой. Характеризуются они большими запасами влаги, неустойчивой стратификацией воздушных масс и областями непрерывных восходящих течений. Горные регионы более влажные, чем низкие плато, равнины и долины. Основная масса осадков выпадает в теплое время года [6].

Период появления снежного покрова приходится на первую декаду октября, первый снег лежит недолго и обычно сходит под влиянием оттепелей. Устойчивый снежный покров образуется во второй декаде октября в среднем через 10 дней после первого снега, средняя дата образования устойчивого снежного покрова 11–15 октября. Снежный покров наблюдается 201–212 дней в году. Средняя дата разрушения устойчивого снежного покрова 30 апреля – 3 мая, средняя дата схода снежного покрова 6–11 мая. Характерная особенность для снежного покрова данной местности – небольшая его плотность. В зимний период снег выпадает очень сухим и уплотняется мало. На значительной территории наибольшим запасом воды в снеге отмечается апрель, в последние его недели [6].

На данной территории наименьшие скорости ветра наблюдаются в августе–сентябре. С повышением температуры происходит увеличение скоростей ветра, максимальные значения фиксируются в апреле – мае (2,5 м/с). С наступлением лета скорость ветра становится меньше. В половине случаев метели возникают при скоростях ветра меньше 6

м/с. Климатические характеристики района исследования по данным наблюдений ближайшей метеостанции «Дорожный» представлены в табл. 1. Средняя годовая повторяемость направлений ветра и штилей представлена в табл. 2 [6].

Таблица 1

Многолетние климатические характеристики [6]

Показатели	Значения
Коэффициент стратификации атмосферы	200
Средняя максимальная температура наиболее теплого месяца (июль), °С	23,7
Средняя максимальная температура наиболее холодного месяца (январь), °С	-34,8
Скорость ветра, вероятность превышения которой составляет 5 %, м/с	5,0
Среднегодовая скорость ветра, м/с	2,1

Таблица 2

Средняя годовая повторяемость направлений ветра и штилей по с. Дорожный [6]

Румбы	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Штиль
Повторяемость, %	12	8	5	3	14	33	18	7	10

Результаты и их обсуждение

Подготовительные работы к строительству

Подготовительные работы к строительству скважины заключаются в приготовлении площадки бурения к приему и размещению грузов, монтажу буровой установки, оборудования, вспомогательных сооружений, инженерных коммуникаций. На территории площадки под буровую установку производится выравнивание поверхности. На этом этапе выполняется основной объем работ по обустройству дорог и сооружению фундаментов для размещения оборудования.

Монтаж сооружений и оборудования

Данный этап работ заключается в обустройстве оснований под сооружения, фундаментов под оборудование, монтаже буровой установки, оборудования, вспомогательных сооружений, инженерных коммуникаций, создании запасов материальных ресурсов. Происходит интенсивное использование техники, в результате чего будет наблюдаться загрязнение атмосферного воздуха выхлопными газами строительной техники. На территории площадки планируется соорудить шламовый амбар размещения буровых отходов, а также амбар для сжигания флюида. Амбар для сжигания флюида, объемом 500 м³ ко-

пается на глубину не более 1 м с обвалованием по периметру и устройством отбойного вала (с уплотнением) из вынутаго грунта высотой 4 м для увода пламени факела выше стены леса [6].

Подготовительные работы к бурению, бурение и крепление скважины

Процесс бурения состоит из следующих операций: спускоподъемных работ (опускание бурильных труб с долотом в скважину до забоя и подъем бурильных труб с отработанным долотом из скважины) и работы долота на забое (разрушение породы долотом). В процессе бурения в скважину закачивается промывочная жидкость при помощи буровых насосов. Последняя, пройдя всю колонну бурильных труб, попадает в долото и через отверстия в нем идет на забой скважины. Выходя из отверстий в долоте, жидкость промывает забой, подхватывает частицы разбуренной породы и вместе с ними через кольцевое пространство между стенками скважины и бурильными трубами поднимается вверх, где направляется в приемную емкость, предварительно очищаясь на своем пути от частиц выбуренной породы.

Бурение скважины ведется с использованием полимер-глинистых и полимер-солевых растворов на водной основе. Эти операции периодически прерываются для спуска обсадных труб в скважину, чтобы предохранить стенки скважин от обвалов и разобщения нефтяных (газовых) и водоносных горизонтов. После спуска каждой обсадной трубы производят цементирование, т. е. закачивают цементный раствор через обсадные трубы в кольцевое пространство между ними и стенками скважины. Цементный раствор, поднимаясь вверх, заполняет затрубное пространство. После затвердевания цементного раствора бурение возобновляется. Все обсадные колонны будут зацементированы до устья. Цементирование производится для того, чтобы изолировать друг от друга флюидоносные пласты. Одновременно в процессе бурения скважины будет выполнен ряд вспомогательных работ: отбор керна, приготовление промывочной жидкости, каротаж, замер кривизны скважины [1].

Источником техногенного воздействия на атмосферный воздух на данном этапе являются:

- 1) передвижные и стационарные двигатели внутреннего сгорания (ДВС);
- 2) парокотельные установки (ПКН-2М);
- 3) горюче-смазочные материалы;
- 4) технологическое оборудование;
- 5) вещества и материалы, используемые для приготовления буровых растворов;

б) пластовые флюиды, в том числе углеводородные.

В процессе подготовительных работ к бурению, бурения и крепления скважины наиболее существенны химический и физический (тепловой) виды воздействия на окружающую среду. Этот этап строительства скважины характеризуется интенсивным загрязнением атмосферного воздуха выхлопными газами от стационарных дизельных установок [6].

Испытание продуктивных пластов

После достижения проектной глубины и опущения хвостовика, по данным каротажа начинают испытание продуктивных горизонтов. Испытание заключается во вторичном вскрытии продуктивных пластов и вызове притока пластовых флюидов. Источники техногенного воздействия на ОС при испытании продуктивных пластов аналогичны предыдущему этапу строительства скважины [7].

Консервация, ликвидация скважины

Основными источниками техногенного воздействия на ОС на этом этапе являются используемая техника (загрязнение атмосферного воздуха выхлопными газами) и демонтируемое технологическое оборудование [6].

На рис. 1 представлены диаграммы валовых выбросов в атмосферный воздух загрязняющих веществ от источников. Анализ диаграмм позволяет сделать вывод о том, что наибольшее загрязнение атмосферного воздуха создается от:

- выбросов двигателей внутреннего сгорания;
- выбросов при сжигании продуктов на факельной установке;
- выбросов при сварке металлов.

Основное воздействие на атмосферу будет оказываться на этапах бурения, крепления и испытания скважины. На этапах строительномонтажных работ, консервации, ликвидации и рекультивации выбросы будут поступать, в основном, от строительной техники, дизельной электростанции, вертолетной площадки, парогенераторной установки ППУ-1600/100М, склада горюче-смазочных материалов (ГСМ) и сварочных работ и цементировании буровых отходов в амбаре. На этапе бурения и крепления скважины источниками выбросов являются дорожная техника, дизельные электростанции, котельная ПКН-2М, вертолетная площадка, блок приготовления растворов и склад ГСМ. На этапе испытания основными источниками выбросов будут дорожная техника, дизельные электростанции, котельная ПКН-2М, сжигание попутного газа на факеле, склад ГСМ [6].

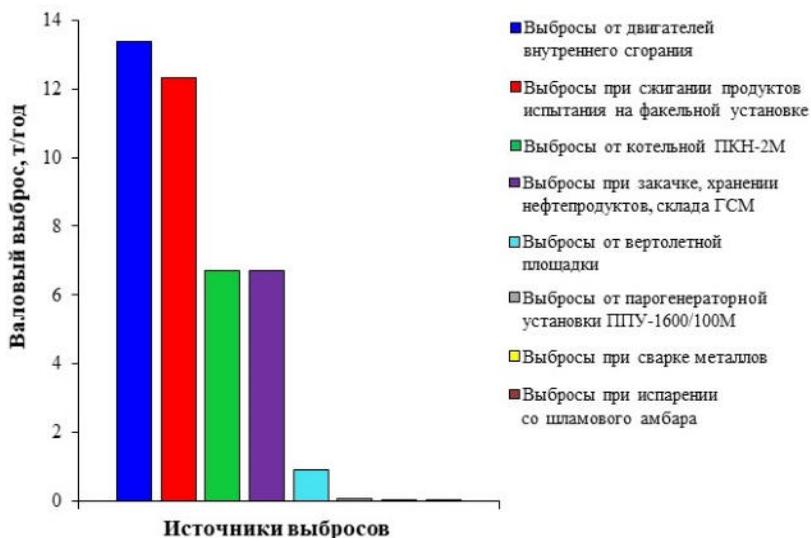


Рис. 1. Валовые выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от источников

Строительство скважин на этапах подготовительных работ, строительно-монтажных и демонтажных работ сопровождается работой дорожно-строительной техники (трактор, краны, бульдозер). Работа спецтехники (цементировочные агрегаты и паропроизводительные установки) осуществляется на этапах бурения и испытания. Загрязнение атмосферы также производится техникой, доставляющей оборудование, материалы, техническую воду на площадку скважины. Загрязнителями являются вещества отработанных газов ДВС [2].

На рисунке 2 представлены диаграммы выбросов загрязняющих веществ от двигателей внутреннего сгорания, на которых видно, что наибольших значений достигают такие вещества, как оксид азота (NO_2), оксид углерода (CO), диоксид серы (SO_2) и керосин, именно эти вещества образуются при работе техники на подготовительных этапах, строительно-монтажных и демонтажных работах.

Котельные установки служат для подогрева до нормальных условий фланцевых и резьбовых соединений спускоподъемного оборудования. Источником подогрева является пар [6].

На рисунке 3 представлены диаграммы выбросов загрязняющих веществ от котельной: наибольших значений достигают такие вещества, как оксид азота, диоксид серы, оксид углерода, образующиеся при сжигании топлива, в качестве которого используются сырая нефть, мазут, газ, дизельное топливо.

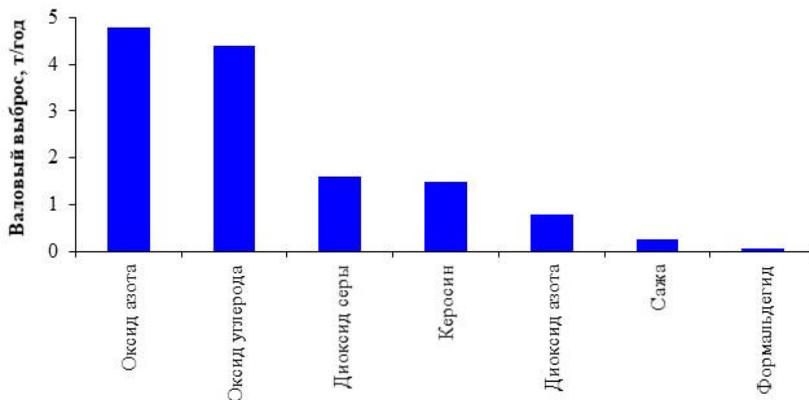


Рис. 2. Выбросы загрязняющих веществ от двигателей внутреннего сгорания

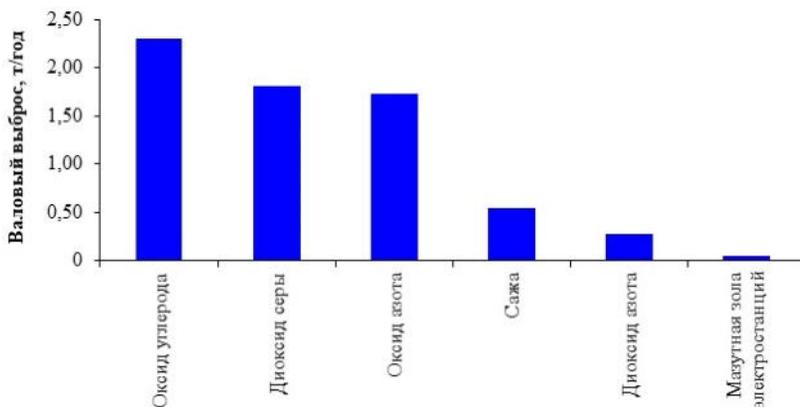


Рис. 3. Выбросы загрязняющих веществ от котельной ПКН-2М

На рисунке 4 представлены диаграммы выбросов загрязняющих веществ от парогенераторной установки. Наибольших значений достигают оксид азота, диоксид серы, оксид углерода. Связано это также с использованием дизельного топлива для парогенераторной установки.

Сварочные работы проводятся в период монтажных работ. Средний расход электродов при строительстве скважин такой глубины составляет 500 кг, значительная часть которых расходуется при строительно-монтажных работах [3]. На рисунке 5 представлен график выбросов загрязняющих веществ при сварке металлов, на котором видно, что наибольших значений достигают следующие вещества: оксид железа, оксид углерода, плохо растворимые фториды. При сварке образуются, как газообразные вещества, так и частички твердых металлов.

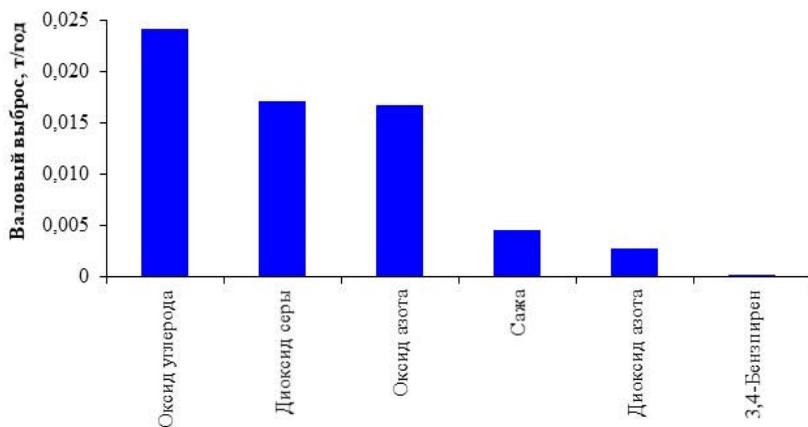


Рис. 4. Выбросы загрязняющих веществ от парогенераторной установки ППУ-1600/100 М

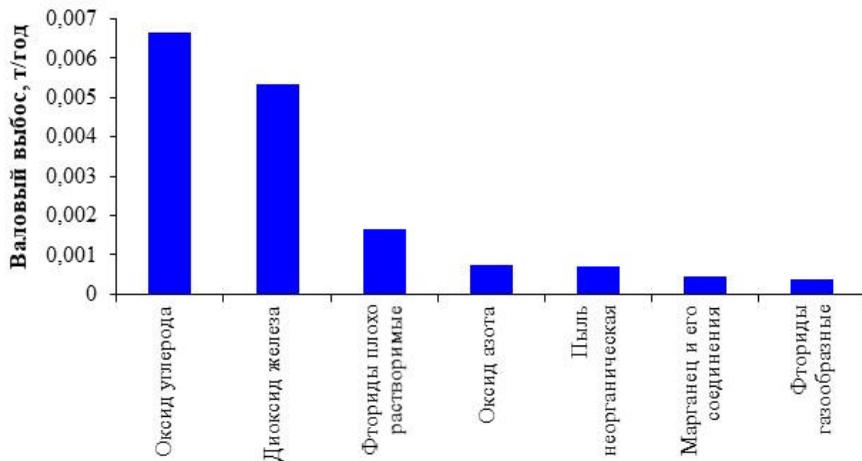


Рис. 5. Выбросы загрязняющих веществ при сварке металлов

На рисунке 6 представлены диаграммы выбросов загрязняющих веществ при испарении со шламового амбара, основные загрязняющие вещества – сероводород и метан. К ним относятся легкие фракции нефти и нефтепродуктов, химические вещества, образующиеся при смешении различных химических реагентов, входящих в состав буровых сточных вод и отработанных буровых растворов.

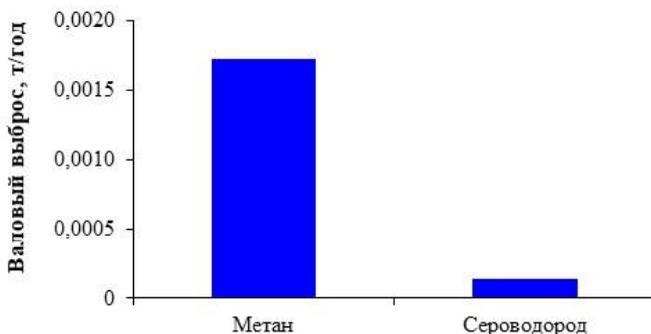


Рис. 6. Выбросы загрязняющих веществ при испарении со шламового амбара

На рисунке 7 представлены диаграммы выбросов загрязняющих веществ при закачке, хранении нефтепродуктов склада горюче смазочных материалов (ГСМ), заправке техники и агрегатов.

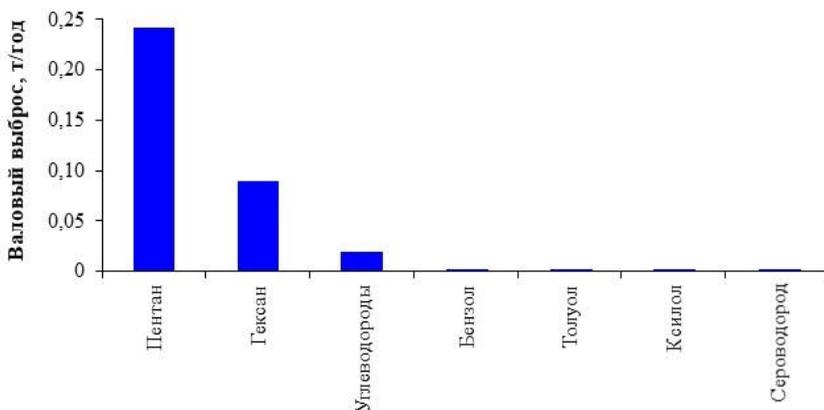


Рис. 7. Выбросы загрязняющих веществ при закачке, хранении нефтепродуктов склада ГСМ, заправке техники и агрегатов

На рисунке 8 представлены диаграммы выбросов загрязняющих веществ при сжигании продуктов испытания на факельной установке, наибольшее загрязнение создается от печи технологической установки и свечей газомоторных компрессоров, в результате работы которых, в атмосферу поступают сажа и оксид азота.

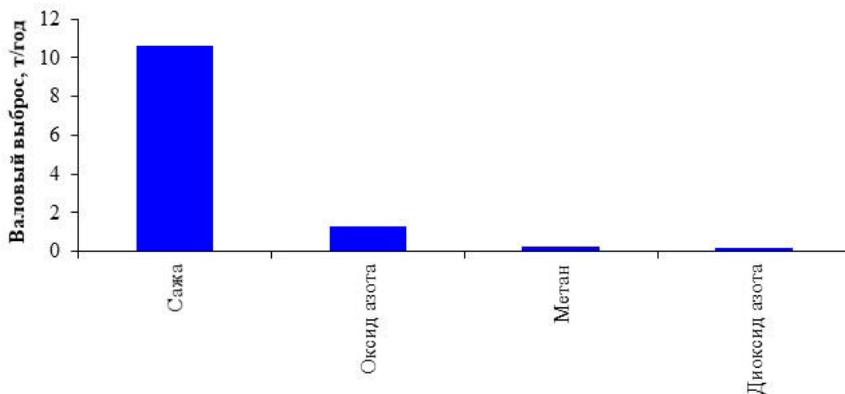


Рис. 8. Выбросы загрязняющих веществ при сжигании попутного газа на факельной установке

Компенсационные платежи за ущерб окружающей среде

Российским природоохранным законодательством установлена плата за негативное воздействие на окружающую среду, которую вносят организации, деятельность которых оказывает негативное воздействие на окружающую среду (ОС). Плата за негативное воздействие на ОС является формой компенсации ущерба, наносимого загрязнением окружающей природной среде. На рисунке 9 представлена диаграмма компенсационных платежей при строительстве поисковой скважины Иктехского участка недр. Таким образом, 56,97 % платежей приходится за выбросы в атмосферный воздух.

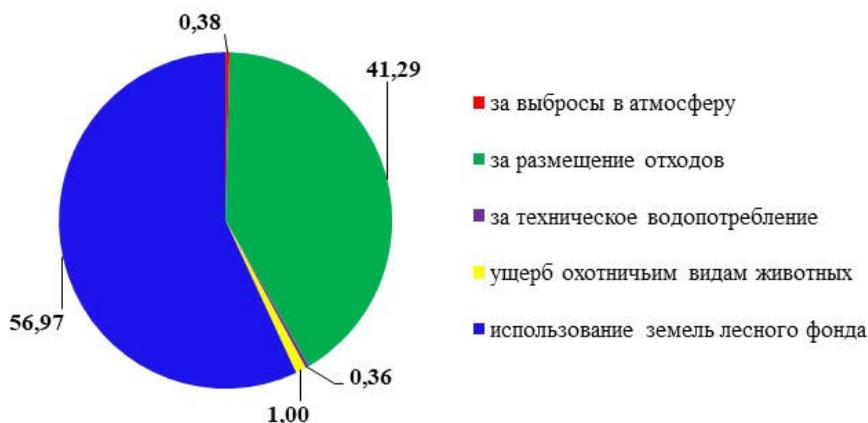


Рис. 9. Компенсационные платежи за ущерб окружающей среде

Заключение

На основании проведенного анализа установлено, что источниками, дающими максимальный вклад в загрязнение атмосферного воздуха при строительстве поисковой скважины № 665 Иктехского участка недр, являются: факельная, стационарные, дизельные и котельные установки. Приоритетными веществами, вносящими наибольший вклад в загрязнение воздушного бассейна на месторождении, являются: оксид озона, оксид углерода, диоксид серы, керосин, сероводород, метан и сажа.

В работе проведен анализ компенсационных выплат за воздействие на окружающую среду в период 2017–2019 гг. Так, за 2019 год сумма компенсационных платежей увеличится в 1,04 раза по сравнению с 2017 г., что свидетельствует об увеличении выбросов в атмосферу, поскольку наибольшая доля экологических платежей приходится именно на этот вид воздействия на ОС.

Подводя итог, следует отметить, что при строительстве поисковой скважины № 665 Иктехского участка недр осуществляется воздействие на атмосферный воздух, требующее дальнейшей разработки комплекса мероприятий по его снижению.

Список литературы

1. Инструкция по охране окружающей среды при строительстве скважин на нефть и газ на суше. РД 39-133-94. М. : Буровая техника, 1990. 34 с.
2. Инструкция о порядке ликвидации, консервации скважин и оборудования их устьев и стволов. РД 08-492-02. М., 2002.
3. Методика расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных дизельных установок. СПб., 2001.
4. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3: Многолетние данные. Л. : Гидрометеониздат, 1990. 60 с.
5. Новиков Д. А. Гидрогеология западной части Енисей-Хатангского регионального прогиба // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2013.
6. Проектная документация. ООО «Иркутская нефтяная компания», ООО «Красноярск НИПИ нефтегаз». Красноярск, 2017. 20 с.
7. Руководство на ведение подготовительных работ к бурению в системе Главтюменнефтегаз. Тюмень : СибНИИИП, 1990.

УДК 551. 5

Крупномасштабная атмосферная циркуляция над территорией Сибири за период 1976–2015 гг.

Н. В. Поднебесных (podnebesnykhnv@inbox.ru)

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

Аннотация. В работе представлены результаты сравнительного анализа характеристик барических образований на территории Сибири за период 1976–2015 гг. по данным приземных синоптических карт. Область исследования была ограничена 50–70° с. ш., 60–110 °в. д. Были рассмотрены такие характеристики циклонов и антициклонов как, количество, давление в центрах и продолжительность нахождения над исследуемой территорией. В работе показано, что в конце исследуемого периода (2012–2015 гг.) циклоны стали более глубокими, а антициклоны более интенсивными, и если учесть, что количество барических образований в данный период увеличилось, а продолжительность уменьшилась, по данным приземных синоптических карт, то можно сказать что все эти факторы являются наглядной картиной неустойчивости атмосферной циркуляции и как следствие нестабильности погоды в последние годы в данном регионе.

Ключевые слова: атмосферная циркуляция, циклоны, антициклоны, синоптические карты, реанализ, Сибирь.

Введение

Неустойчивость погодных условий региона определяется главным образом повторяемостью крупномасштабных атмосферных вихрей: циклонов, несущих облачность и осадки и антициклонов, обеспечивающих периоды устойчивой погоды. Изменение крупномасштабной атмосферной циркуляции связано с потеплением климата, происходящим в последние десятилетия в Северном полушарии. Однако, как показывают расчёты [3; 4], темпы потепления неодинаковы в различных географических регионах, поэтому изучение особенностей региональной циркуляции имеет существенное значение.

Исследованию влияния атмосферной циркуляции на климат посвящено большое количество работ. Наиболее часто рассматриваются связи между климатическими параметрами и телеконнекционными индексами, описывающими скорее глобальную циркуляцию (NAO, SOI, SCAND и др.). В ряде работ для описания циркуляции используются типизации, описывающие чередование определённых форм макропроцессов (индексы Дзерdzeевского, Виттеля, Каца и др.) [5]. В данной работе проводится сравнительный анализ характеристик циклонов и антициклонов над территорией Сибири за период 1976–

2015 гг. по данным приземных синоптических карт, описывающих региональную циркуляцию.

Методы и материалы

Для анализа крупномасштабной атмосферной циркуляции за рассматриваемый период использовались приземные синоптические карты за основные метеорологические сроки (00, 06, 12 и 18 часов СГВ). В выбранном для исследования районе 50–70° с. ш.; 60–110° в. д. прослеживались траектории перемещения центров барических образований (повторяемость), оценивалось давление в их центрах и продолжительность влияния на исследуемую территорию [7]. В качестве циклона (антициклона) рассматривалась область пониженного (повышенного) давления при наличии хотя бы одной замкнутой изобары с характерной циркуляцией и структурой метеорологических полей.

Оценкам погрешностей в детектировании циклонов методом мануального трекинга посвящена статья [7].

Результаты

Результаты сравнения количества барических образований представлены на рис. 1. Среднегодовое количество циклонов в 1976–2016 гг. по данным приземных синоптических карт равно 52 ($\sigma = 17,6$; σ – стандартное отклонение), а антициклонов 41 ($\sigma = 12,0$).

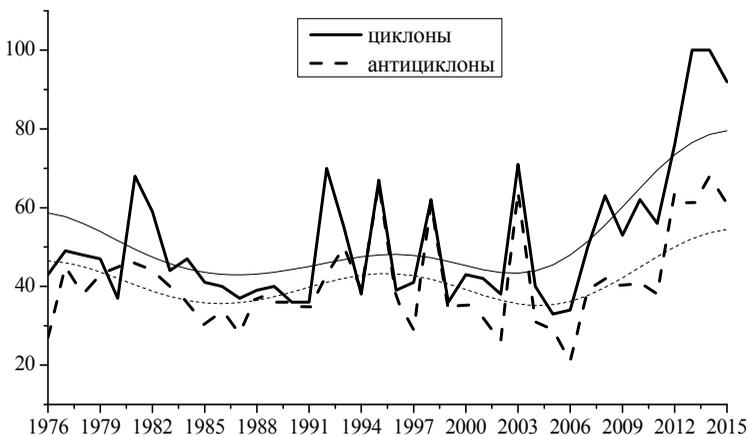


Рис. 1. Количество циклонов (сплошная линия) и антициклонов (прерывистая линия) по данным приземных синоптических карт над Сибирью за период 1976–2015 гг. Здесь и на других рисунках плавные кривые – сглаженные 10-летним окном значения

Изучение динамики количества барических образований показало, что среднее количество циклонов, смещающихся по западным траекториям движения составляет – 11, смещающихся по северным траекториям движения – 21 и смещающихся по южным траекториям движения – 20. В то время как среднее количество антициклонов, смещающихся по западным траекториям движения равно – 10, смещающихся по северным траекториям движения – 14 и смещающихся по южным траекториям движения – 17.

На рисунке 1 видно увеличение количества как циклонов, так и антициклонов за последние годы. Обработка и анализ данных показали, что в 2012–2015 гг. основной вклад в увеличение количества как циклонов, так и антициклонов вносят барические образования, смещающиеся по северным и южным траекториям движения. Данный факт указывает на усиление меридионального и ослабление зонального переносов над территорией Сибири в последние годы.

По данным приземных синоптических карт для многолетнего количества циклонов отмечается положительный значимый тренд на уровне значимости $\alpha < 0,05$ (0,70 циклона/год) наибольший вклад в который вносят северо-западные циклоны; для многолетнего количества антициклонов наблюдается положительный значимый тренд (0,30 антициклона/год) наибольший вклад в который вносят западные и юго-восточные антициклоны.

Во внутригодовом ходе количества барических образований как максимумы, так и минимумы наблюдаются в тёплый период года. Так максимальное количество циклонов (578) и антициклонов (475) за 1976–2015 гг. было зафиксировано в весенний период (со средним годовым значением – 15 и 12 соответственно); минимальное количество циклонов отмечалось в летний период (479, со средним годовым значением – 12), а минимальное количество антициклонов отмечалось в зимний период (359, со средним годовым значением 10).

На рисунке 2 приведено среднемесячное количество циклонов и антициклонов за рассматриваемый период для территории Сибири. Для циклонов и антициклонов максимум среднего количества отмечается в мае, а минимум в июле. Относительное усиление вихревой деятельности в весенне-летний сезон может быть обусловлено большими контрастами температур над территорией Сибири в области рек Обь и Енисей в данный период года, и, как следствие увеличением повторяемости барических образований, что согласуется с работой [6]. В то же время над остальной территорией Сибири отмечается относительное ослабление вихревой деятельности в летний сезон из-за уменьше-

ния контраста температур, что приводит к сокращению количества барических образований [2; 6].

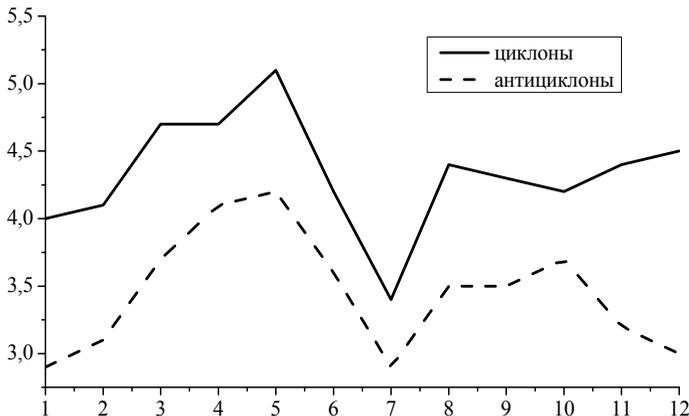


Рис. 2. Среднемесячное количество циклонов (сплошная линия) и антициклонов (прерывистая линия) по данным приземных синоптических карт над Сибирью за период 1976–2015 гг.

Изучение многолетней динамики величины атмосферного давления в центрах барических образований (рис. 3) показало, что среднее многолетнее значение давления в центрах циклонов в 1976–2015 гг., по данным приземных синоптических карт, составляет 1000,3 гПа (изменяясь от 989,6 гПа до 1006,0 гПа), средняя многолетняя величина давления в центрах антициклонов 1030,9 гПа (изменяясь от 1026,3 гПа до 1040,5 гПа).

Так же анализ средних многолетних значений давления в центрах барических образований выявил, что наиболее глубокими за весь период исследования являются циклоны,двигающиеся на исследуемую территорию с северо-западного направления, наименее глубокими местные циклоны, что не удивительно, поскольку данные циклоны являются неглубокими барическими образованиями с небольшой продолжительностью жизни. Наиболее высокими антициклонами являются юго-восточные, а наименее высокими северные антициклоны по данным приземных синоптических карт.

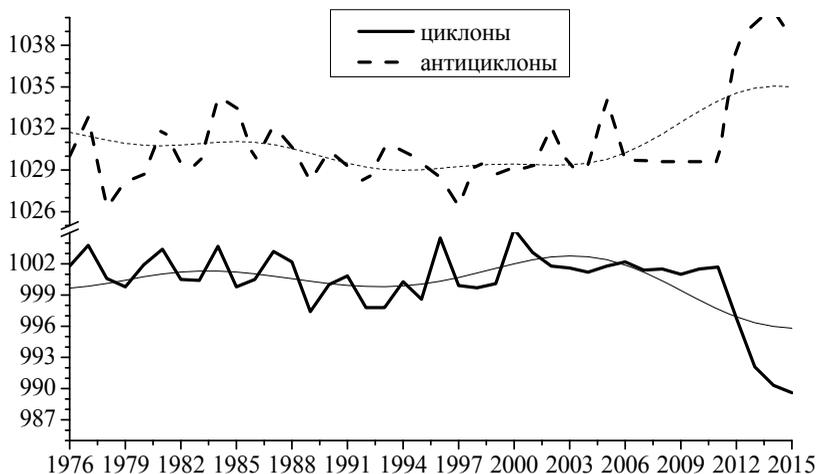


Рис. 3. Давление в центрах (гПа) циклонов (сплошная линия) и антициклонов (прерывистая линия) по данным приземных синоптических карт над Сибирью за период 1976–2015 гг.

На рисунке 3 отчетливо видно падение величины давления в центрах циклонов и рост величины давления в центрах антициклонов за последние годы, а если учесть тот факт, что количество барических образований в данный период увеличилось, а продолжительность уменьшилась, по данным приземных синоптических карт, то можно сказать что все эти факторы являются иллюстрацией неустойчивости атмосферной циркуляции и как следствие нестабильности погоды в последние годы.

Обработка и анализ данных показали, что в 2012–2015 гг. основной вклад в углубление циклонов вносят вихри, смещающиеся по северо-западным траекториям, а основной вклад в интенсификацию антициклонов вносят вихри, смещающиеся по юго-восточным траекториям.

По данным приземных синоптических карт тренд среднего многолетнего давления в центрах циклонов отрицательный ($-0,12$ гПа/год), значимый на уровне значимости $\alpha < 0,05$, тренд среднего многолетнего давления в центрах антициклонов положительный значимый ($0,12$ гПа/год).

Рассмотрение внутрigoдового хода давления в центрах барических образований показало, что наиболее глубокими они являются в зимний период, а наименее глубокие в весенний период. Что касается

антициклонов, то наиболее интенсивными они являются в зимний период, а наименее интенсивными в летний период.

Относительное ослабление циклонов в холодный период года, как и относительное усиление антициклонов в зимний сезон обусловлены господством зимнего Азиатского антициклона над изучаемой территорией [1]. В то время как относительное усиление циклонов в весенний сезон обусловлено интенсивным циклогенезом в данный период года, а относительное ослабление антициклонов в летний сезон уменьшением температурных контрастов [6].

При рассмотрении многолетнего межгодового хода давления в центрах барических образований можно выделить тот факт, что во второй половине рассматриваемого периода величина давления в центрах циклонов по данным приземных синоптических карт, ниже, чем в первой половине, величина давления в центрах антициклонов во второй половине рассматриваемого периода несколько выше, чем в первой половине (рис. 3). Это говорит о том, что во второй половине исследуемого периода циклоны стали более глубокими, а антициклоны более интенсивными.

Кроме того, был проведен анализ продолжительности воздействия барических образований на исследуемую территорию и получено, что средняя многолетняя продолжительность циклонов составила 7 ($\sigma = 2,0$) суток, по данным приземных синоптических карт (рис. 4), продолжительность антициклонов составила 11 суток ($\sigma = 3,3$). Средняя годовая продолжительность общего воздействия на исследуемую территорию циклонов меньше, чем антициклонов, т. е. в течение года антициклональная погода наблюдалась над территорией Сибири чаще, чем циклоническая.

Обработка средних многолетних значений продолжительности воздействия циклонов и антициклонов выявила, что наиболее продолжительными за весь период исследования являются циклоны,двигающиеся на исследуемую территорию с северо-западного направления, их продолжительность составляет 8,4 суток; наименее продолжительны местные циклоны, их продолжительность составляет 2,9 суток. Наиболее продолжительными являются северо-западные и западные антициклоны, их продолжительность составляет 9,8 суток; наименее продолжительны юго-западные антициклоны, их продолжительность составляет 7,8 суток.

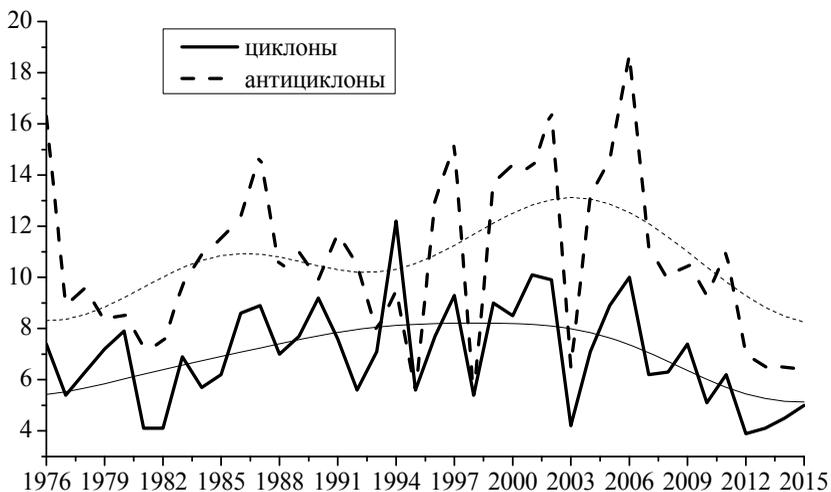


Рис. 4. Продолжительность (сутки) воздействия циклонов (сплошная линия) и антициклонов (прерывистая линия) по данным приземных синоптических карт над Сибирью за период 1976–2015 гг.

На рисунке 4 показано, что в 2012–2015 гг. исследуемого периода как циклоны, так и антициклоны стали менее продолжительными, по данным приземных синоптических карт. Изучение данных показало, что наименее продолжительными являются местные циклоны, а наиболее продолжительными юго-западные антициклоны.

По данным приземных синоптических карт тренд средней многолетней продолжительности циклонов отрицательный незначимый ($-0,02$ сутки/год) наибольший вклад в который вносят северо-западные циклоны. Тренд средней многолетней продолжительности антициклонов отрицательный незначимый ($-0,01$ суток/год) наибольший вклад в который вносят северо-западные и западные антициклоны.

Изучение сезонного распределения продолжительности барических образований показало, что наименее продолжительны циклоны весной, а наиболее продолжительны осенью – 8 суток. Что касается антициклонов, то наименее продолжительны антициклоны летом – 9 суток, а наиболее продолжительны антициклоны зимой – 13 суток.

Заключение

Над Сибирью в 1976–2015 гг. в холодный период года характеристики циклонов и антициклонов связаны с активной деятельностью Азиатского антициклона и частым проявлением приземного антициклологенеза, а также большими контрастами температур и усилением зональной западной циркуляции. В теплый период года на характеристики барических образований оказывает влияние уменьшение контраста температур, нарушение (ослабление) зональной западной циркуляции (усиление меридиональной циркуляции), усиление фронтогенетического механизма образования циклонов и антициклонов, что обуславливает подвижный цикло- и антициклологенез, и влияние термического механизма образования циклонов и антициклонов, обуславливающего возникновение местных барических образований и действующего за счет преимущественного влияния подстилающей поверхности.

В работе показано, что в конце исследуемого периода, а именно в 2012–2015 гг. циклоны стали более глубокими, а антициклоны более интенсивными, и если учесть, что количество барических образований в данный период увеличилось, а продолжительность уменьшилась, по данным приземных синоптических карт, то можно сказать что все эти факторы являются наглядной картиной неустойчивости атмосферной циркуляции и как следствие нестабильности погоды в последние годы в данном регионе.

Список литературы

1. *Бордовская Л. И., Цибульский А. Е.* Повторяемость и скорость движения циклонов и антициклонов над Западной Сибирью // *Вопр. географии Сибири.* 1976. Вып. 9. С. 22–29.
2. *Горбатенко В. П., Ипполитов И. И., Поднебесных Н. В.* Циркуляция атмосферы над Западной Сибирью в 1976–2004 гг. // *Метеорология и гидрология.* 2007. № 5. С. 28–36.
3. *Груза Г. В., Ранькова Э. Я.* Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // *Метеорология и гидрология.* 2004. № 4. С. 50–67.
4. *Современные природно-климатические изменения в Сибири: ход среднегодовых приземных температур и давления / И. И. Ипполитов, М. В. Кабанов, А. И. Комаров, А. И. Кусков // География и природ. ресурсы.* 2004. № 3. С. 90–96.
5. *Кононова Н. К.* Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому. М. : Воентехиниздат, 2009. 372 с.
6. *Погосян Х. П.* Общая циркуляция атмосферы. Л. : Гидрометеоиздат, 1972. 396 с.
7. *Поднебесных Н. В., Ипполитов И. И.* Характеристики циклонов и антициклонов над Сибирью в конце XX – начале XXI в. // *Метеорология и гидрология.* 2017. № 4. С. 27–37.

УДК 551.510.42

Результаты исследований микродисперсного аэрозоля в приземном слое атмосферы г. Улан-Удэ

И. П. Сунграпова (ip.sungrapova@mail.ru)

А. С. Заяханов (lmza@mail.ru)

Г. С. Жамсуева (lmza@mail.ru)

В. В. Цыдыпов (tsydyпов@inbox.ru)

Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ

Аннотация. В работе представлены результаты исследования микродисперсной фракции аэрозоля в атмосфере г. Улан-Удэ. Проведен сравнительный анализ общей счетной концентрации микродисперсной фракции аэрозоля в условиях с разной антропогенной нагрузкой: в атмосфере юго-восточного побережье оз. Байкал (ст. Боярск) и г. Улан-Удэ. Обнаружено, что в г. Улан-Удэ общая счетная концентрация в 9,97 раза больше, чем в атмосфере ст. Боярск. Получен суточный ход общей счетной концентрации микродисперсной фракции аэрозоля для городских и «фоновых» условий, имеющий два максимума – утром и вечером, два минимум – послеполуденное время и во второй половине ночи. Анализ дисперсного состава микродисперсной фракции аэрозоля показал, что в спектре распределения аэрозоля общей закономерностью является наличие моды Айткена $0,01 < d < 0,08$ мкм.

Ключевые слова: атмосфера, микродисперсный аэрозоль, общая счетная концентрация, Байкальский регион, г. Улан-Удэ.

Введение

Исследование мелкодисперсной и субмикронной фракций аэрозоля в настоящее время является актуальной проблемой, поскольку атмосферный аэрозоль, наряду с парниковыми газами принадлежит к числу ключевых, но недостаточно изученных климатообразующих факторов [2]. По мере развития промышленного потенциала человечества экологические проблемы становятся всё более острыми, происходит загрязнение окружающей среды.

Проблемы, связанные с качеством воздуха в городах, относятся к числу наиболее важных экологических проблем, поскольку городское загрязнение атмосферы влияет на качество жизни значительной части населения мира. Недавние токсикологические исследования [5–7] показали, что микродисперсные частицы ($d < 0,2$ мкм) более токсичны, чем более крупные частицы, с тем же химическим составом и при той же массовой концентрации. В городской среде одним из главных источников загрязнения атмосферы являются выбросы от автотранспорта, способствующие значительному росту микродисперсных частиц.

Город Улан-Удэ относится к числу городов, находящихся в неблагоприятной экологической ситуации, входит в список наиболее загрязненных городов России [3]. Это связано с тем, что город расположен в межгорной котловине, в которой наблюдаются застои воздуха и накопление в нем токсичных примесей от выбросов основных источников загрязнения города (автомобильный транспорт, ТЭЦ-1, предприятия стройиндустрии, котельные).

Целью работы является провести экспериментальные исследования микродисперсного аэрозоля в приземном слое атмосферы г. Улан-Удэ.

Материалы и методы исследования

Измерения атмосферных частиц нанометрового диапазона проводились в г. Улан-Удэ на стационарном посту в здании Института физического материаловедения СО РАН в осенний период (октябрь – ноябрь 2017 г.) и на юго-восточном побережье оз. Байкал на научном стационаре «Боярск» в летний период (июль – август 2018 г.) с помощью диффузионного спектрометра аэрозолей (ДСА). Диффузионный спектрометр аэрозолей разработки ИХКиГ СО РАН позволяет с высокой точностью в реальном режиме времени измерять концентрацию аэрозольных частиц в атмосфере, а также распределение их содержания по размерам в диапазоне от 3 до 200 нм [4].

Отбор проб аэрозолей осуществлялся на высоте 2 м над уровнем Земли с использованием тефлоновых трубок. Одновременно выполнялись измерения метеорологических и турбулентных параметров атмосферы с помощью акустического метеорологического комплекса АМК-03 [1].

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлен суточный ход усредненных 10-минутных значений счетной концентрации микродисперсной фракции аэрозоля для г. Улан-Удэ и ст. Боярск. В Улан-Удэ среднее значение общего содержания аэрозоля составляло 8445 частиц/см^3 . В городских условиях суточный ход общей счетной концентрации аэрозоля характерен повышенными концентрациями аэрозольных частиц в утренние и вечерние часы, минимальными значениями – ночью и после полудня. Утром и вечером, как правило, наблюдается высокая интенсивность движения автотранспорта. Максимальные значения общей счетной концентрации аэрозоля утром составляли $10\,368 \text{ частиц/см}^3$, вечером – 9889 частиц/см^3 .



Рис. 1. Суточный ход общей счетной концентрации микродисперсной фракции аэрозоля в Улан-Удэ в осенний период (23.10.2017–30.11.2017), на ст. Боярск в летний период (12.07.2018–23.08.2018)

На юго-восточном побережье оз. Байкал суточный ход счетной концентрации микродисперсного аэрозоля имеет схожий характер с суточными вариациями аэрозоля в атмосфере г. Улан-Удэ, он имеет два максимума – днем и вечером, и два минимума – ночью и послеполуденное время. В вечерние часы увеличение концентрации микродисперсного аэрозоля связано с формированием инверсии температуры и накоплением примесей в приземном слое атмосферы. Среднее значение концентрации – 847 частиц/см^3 .

Обнаружено, что в городских условиях концентрация в 9,97 раза больше, чем в атмосфере ст. Боярск.

Изменчивость временного хода общей счетной концентраций аэрозоля в окружающей среде зависит от метеорологических условий. На рисунке 2 показан временной ход общей счетной концентрации микродисперсного аэрозоля, температуры воздуха, скорости ветра в г. Улан-Удэ. Видно, что с понижением скорости ветра, увеличивается концентрация аэрозоля. Вследствие часто наблюдавшихся слабых ветров и температурных инверсий циркуляция воздуха в городе затруднена, при этом максимальные значения концентрации микродисперсного аэрозоля достигали $2 \cdot 10^4 \text{ частиц/см}^3$ (рис. 2).

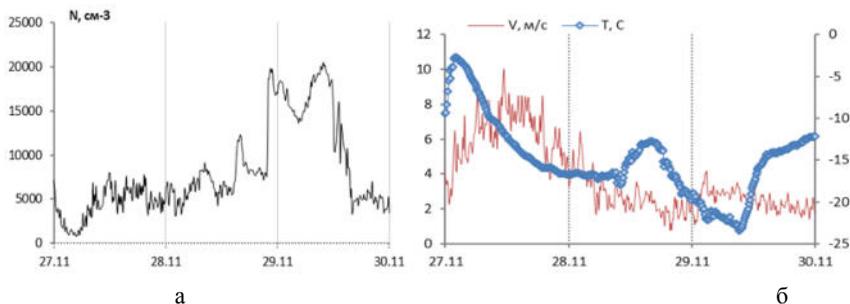


Рис. 2. Временной ход общей счетной концентрации микродисперсного аэрозоля (а), температуры воздуха, скорости ветра (б) в г. Улан-Удэ в осенний период времени (27–30.11.2017)

Для выявления особенностей суточных вариаций дисперсного состава при разной антропогенной нагрузки (г. Улан-Удэ и ст. Боярск) проанализированы данные измерений, полученные при стабильных условиях атмосферы (с высокими дневными температурами и штилевыми условиями). Были выбраны данные измерений, полученные в г. Улан-Удэ 15 ноября 2017 г, когда влажность воздуха составляла в среднем 73 % при температуре 14 °С ниже нуля, скорость ветра – 1,6 м/с. Для береговой зоны озера Байкал отобраны данные измерений за 21 августа. Влажность воздуха составляла в среднем 59 % при температуре 20 °С, скорость ветра 1,6 м/с.

На рисунке 3 представлены спектры распределения частиц по размерам для г. Улан-Удэ и ст. Боярск. Как видно из рис.3, наблюдается существенная разница распределения микродисперсного аэрозоля, как по размерам частиц, так по их концентрациям. Повышенные концентрации числа частиц диаметра 50,4–63,4 нм в Улан-Удэ можно объяснить активным ростом частиц антропогенного происхождения, поскольку высокотемпературное сжигание в автомобильных двигателях приводит к образованию частиц сажи в основном больше 30 нм [5; 6]. Частицы в режиме моды Айткена ($0,01 < d < 0,08$ мкм) возникают из-за роста нуклеационной моды частиц ($d < 0,01$ мкм), а также при производстве в больших количествах первичных источников горения, таких как транспортные средства. В городских условиях, где основной вклад микродисперсных частиц вносит автотранспорт, в спектрах распределения частиц практически не наблюдается нуклеационная мода аэрозоля ($d < 0,01$), в отличие от полученных результатов на оз. Байкал. В атмосфере прибрежной зоны оз. Байкал в спектрах распределения выделяются и аэрозоли нанометрового диапазона разме-

ров, основными источниками которого являются лесные пожары, антропогенные примеси и аэрозоли, имеющие органическое происхождение (рис. 3).

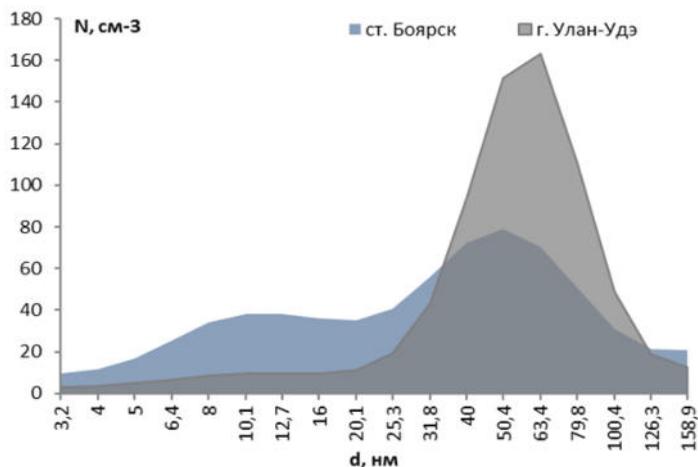


Рис. 3. Сравнительный анализ дисперсного состава атмосферного аэрозоля

Заключение

По результатам экспериментальных измерений в атмосфере г. Улан-Удэ и юго-восточного побережья оз. Байкал (ст. Боярск) проведен анализ общей счетной концентрации микродисперсной фракции аэрозоля. Обнаружено, что в г. Улан-Удэ общая счетная концентрация в 9,97 раза больше, чем в атмосфере ст. Боярск.

Суточный ход общей счетной концентрации микродисперсной фракции аэрозоля для условий г. Улан-Удэ и ст. Боярск имеет общую закономерность: два максимума – утром и вечером, два минимума – после полудня и во второй половине ночи.

Выявлено, что характерной чертой для всех спектров распределения аэрозоля является наличие частиц антропогенного происхождения (мода Айткена $0,01 < d < 0,08$ мкм).

Работа выполнена в рамках госзадания № 0336-2019-0007, часть работ по проведению измерений микродисперсного аэрозоля проведена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-35-00143 мол_a).

Список литературы

1. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 / А. Азбукин, А. Я. Богушевич, В. С. Ильический, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шевелева // Метеорология и гидрология. 2006. № 11. С. 89–97.
2. Кондратьев К. Я. Аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 2. Прямое и косвенное воздействие на климат // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 15, № 4. С. 301–320.
3. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2015 г. : гос. докл. М. : Федер. служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2016. 200 с.
4. Intercomparison of number concentration measurements by various aerosol particle counters / A. Ankilov, A. Baklanov, M. Colhoun, K.-H. Enderle, J. Gras, Yu. Julanov, D. Kaller, A. Lindner, A. A. Lushnikov, R. Mavliev, F. McGovern, A. Mirme, T. C. O'Connor, J. Podzimek, O. Preining, G. P. Reischl, R. Rudolf, G. J. Sem, W. W. Szymanski, E. Tamm, A. E. Vrtala, P. E. Wagner, W. Winklmayr, V. Zaganov // Atmospheric Research. 2002. Vol. 62. P. 177–207.
5. A review of the characteristics of nanoparticles in the urban atmosphere and the prospects for developing regulatory controls / P. Kumar, A. Robins, S. Vardoulakis, R. Britter // Atmospheric Environment. 2010. Vol. 44, Is. 39. P. 5035–5052.
6. Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: Characteristics, ambient processing and implications on human exposure / L. Morawska, Z. Ristovski, E. R. Jayaratne, D. U. Keogh, X. Ling // Atmospheric Environment. 2008. Vol. 42, Is. 35. P. 8113–8138.
7. Murr L. E., Garza K. M. Natural and anthropogenic environmental nanoparticulates: Their microstructural characterization and respiratory health implications // Atmospheric Environment. 2009. Vol. 43, Is. 17. P. 2683–2692.

УДК 911

Североатлантическое колебание и вторжения арктического воздухаА. В. Холопцев^{1,2}, Т. Я. Шульга³¹ Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный Океанографический институт им. Н. Н. Зубова», г. Севастополь² Севастопольский государственный университет, г. Севастополь³ Морской гидрофизический институт, г. Севастополь

Аннотация. Предложена методика обнаружения вторжений арктического воздуха, которая обеспечивает их распознавание на фоне других процессов, приводящих также к образованию полос повышенного атмосферного давления, соединяющих Арктический и соответствующий Субтропический антициклон. Изучено влияние вторжений Арктического воздуха на изменения распределения температуры поверхности Атлантического океана в области Северного субполярного гидрологического фронта и вариации среднесуточных значений индекса Североатлантического колебания.

Ключевые слова: Северная Атлантика, вторжения арктического воздуха, Североатлантическое колебание, температура поверхности океана.

Введение

Североатлантическое колебание (далее САК) – крупномасштабный процесс в системе «Океан-Атмосфера», который является одним из наиболее мощных факторов изменчивости атмосферной циркуляции, поля температуры воздуха (T_v), а также характеристик ветровых течений и поверхностного волнения во многих океанических регионах Северного полушария нашей планеты [2; 4; 7]. Поэтому развитие представлений о причинах изменений его состояния является актуальной проблемой физической географии, метеорологии и океанографии.

САК проявляется в изменениях разности атмосферных давлений ($P_{ат}$) в Азорском максимуме и Исландском минимуме [7], поэтому изменения его состояния могут быть вызваны действием многих факторов, приводящих к вариациям балансов тепла и среднего содержания водяного пара в воздухе над соответствующими районами Северной Атлантики. Подобные изменения могут возникать в результате обмена теплом и влагой между океаном и атмосферой, либо при адвекции упомянутые районы больших объемов воздуха с иным содержанием тепла и водяного пара. Поэтому на изменчивость индекса САК способны влиять продолжительные и сильные ветры северных или южных румбов, возникающие при блокингах [3]. Последнее позволяет предположить, что выявленные в [4; 5] совпадения дат, в которые положительная фаза САК сменяется на отрицательную, а над северо-восточной частью Северной Атлантики возникают блокирующие процессы, не являются случайными. Тем не менее, условия, при которых возникают подобные совпадения, ранее выявлены не были.

Важной разновидностью блокирующих процессов являются вторжения в умеренные широты холодного, сухого и плотного Арктического воздуха (далее ВАВ), методика выявления которых впервые разработана в 1948 г. Б. Л. Дзердзеевским [1]. В соответствии с ней решение об обнаружении ВАВ принимают, при обнаружении полосы, связывающей Арктический антициклон с соответствующим Субтропическим антициклоном, в пределах которой $P_{ат} > 1015$ гПа. Аналогичные барические неоднородности, представляющие собой блокинг, могут возникать и по иным причинам. Поэтому упомянутая методика позволяет обнаруживать любые блокирующие процессы [3], вследствие чего при ее применении для выявления именно ВАВ возможны ложные тревоги. При обнаружении ВАВ, пересекающих барические депрессии, возможны и их пропуски, так как $P_{ат}$ в соответствующих полосах повышенного давления уровня 1015 гПа достигает не всегда.

Тем не менее, данная методика по-прежнему применяется многими современными авторами.

ВАВ – это быстрое воздушное течение с северных румбов, которое образуется при сближении входящего в высокие широты южного циклона, с встречающимся на его пути сегментом Арктического антициклона. Следствием их сближения может являться обострение барического градиента в тыловом секторе такого циклона [8], что служит причиной усиления здесь ветров северных румбов, способных доставлять в умеренные широты Арктический воздух.

При возникновении ВАВ в Атлантическом секторе ($60^{\circ}\text{W}-0$), участвующий в них арктический воздух, проходя над районами, где формируется Исландский минимум, может вызывать повышение в нем $P_{\text{ат}}$. К тому же результату может привести воздействие возникающих при ВАВ, сильных и продолжительных ветров северных румбов, на поверхность океанических акваторий, которое инициирует ветровые течения, доставляющие в те же районы холодную воду. Чем дольше продолжается ВАВ, тем более ощутимыми могут быть вызванные им изменения индекса САК. Вместе с тем вопрос о значимости возникающих при этом его изменений, далеко не очевиден, поскольку на состояние САК влияют и иные факторы [2; 7].

Изложенные соображения позволяют выдвинуть гипотезу: **Чем больше длительность ВАВ, пересекающего область Исландского минимума, тем с большей вероятностью оно приведет к снижению среднесуточных значений индекса САК.**

Подтверждение адекватности выдвинутой гипотезы позволило бы использовать результаты наблюдений за ВАВ и изменениями состояния САК, при моделировании и прогнозировании этих, а также многих других связанных с ними процессов в океане и атмосфере. Поэтому ее проверка представляет существенный теоретический и практический интерес.

Целью данной работы является оценка адекватности выдвинутой гипотезы, а также выявление условий, при которых ВАВ приводят к снижению индекса САК.

Учитывая упомянутые особенности методики [1], для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику обнаружения ВАВ, пригодную для их выявления в области Исландского минимума.
2. Определить условий, при которых данная гипотеза является адекватной.

Фактический материал и методика исследования

При выборе фактического материала, позволяющего достичь указанную цель, учитывалось, что совпадения дат, в которые происходит снижение значений индекса САК, а также образуются ВАВ, пересекающие Исландский минимум, могут быть относительно редкими. Следовательно, для их выявления необходимо рассматривать изменения состояний обоих процессов за период максимально возможной продолжительности.

Поэтому изменения среднесуточных значений индекса САК, изучались по данным [10], которые охватывают период 01.01.1950–31.12.2018.

Учитывалось, что ВАВ проявляются в полях $P_{ат}$, $T_{в}$, абсолютных высот (H_p) некоторых значений геопотенциала (p) и скорости приводного ветра (V). Поэтому, как фактический материал, при их обнаружении использованы результаты реанализа ERA-Interim [12; 13], содержащего данные обо всех упомянутых показателях за период с 01.01.1979 по 2018 г., с разрешением по времени 6 часов и по пространству 79 км.

Как фактический материал об изменениях распределения ТПО в Северной Атлантике, применен реанализ NOAA среднемесячных значений этих характеристик [11], содержащий информацию для каждого узла координатной сетки с шагом $1^\circ \times 1^\circ$, за период, начиная с января 1982 г.

Методика решения первой задачи предполагала ее осуществление в три этапа.

На первом этапе рассматривались причины ошибок, возникающих при обнаружении ВАВ с использованием методики [1].

На втором этапе разрабатывалась новая методика обнаружения ВАВ, пригодная для применения в области Исландского минимума. При этом учитывались представления об откликах на ВАВ, которые могут возникать в полях $P_{ат}$, H_p , $T_{в}$, V . Выявлялись отклики, устойчиво проявляющиеся в Северной Атлантике за период с 01.01.1979 по 31.12.2018 г.

На третьем этапе осуществлялось сопоставление частот правильного обнаружения ВАВ, с применением предложенной и традиционной методики. При этом как фактические, рассматривались даты, в которые местные признаки ВАВ (повышение $P_{ат}$ и снижение $T_{в}$) регистрировались на различных метеостанциях Росгидромета, расположенных на побережье Крымского полуострова.

Методика решения второй задачи включала четыре этапа.

На первом этапе, с применением разработанной методики, производилось обнаружение всех ВАВ, возникавших над Северной Атлантикой в период 01.01.1979–31.12.2018, а также оценивались средние значения среднесуточной V и продолжительность ВАВ над Датским проливом.

На втором этапе оценивалась частота совпадений дат, в которые над тем или иным сектором Северной Атлантики возникали ВАВ различной продолжительности, с датами, в которые происходили уменьшения среднесуточных значений индекса САК.

Третий этап включал выявление районов Северной Атлантики, где межгодовые изменения среднемесячных значений ТПО того или иного месяца значимо связаны с синхронными вариациями суммарной продолжительности ВАВ над Датским проливом и Ферреро-Исландским проходом. Значимость связи оценивалась с применением метода корреляционного анализа и критерия Стьюдента. Пороговый уровень корреляции выбирался таким, чтобы при его превышении достоверность статистического вывода о значимости связи была не ниже 0,9. При отображении расположений выявленных районов применялся метод триангуляции Делоне.

Четвертый этап предусматривал оценку среднего расхода составляющей течения в Датском проливе, возникающего за период существования ВАВ с характеристиками, выявленными на этапе 1. Упомянутый показатель течения, возникающего в проливе под влиянием такого ВАВ, рассчитывался с использованием трехмерной гидродинамической модели РОМ (Princeton Ocean Model) [6]. Параметризация коэффициентов вертикальной вязкости и турбулентной диффузии выполняются в соответствии с дифференциальной моделью Меллора-Ямады [9]. Коэффициент горизонтальной вязкости, вычисляется с использованием модели подсеточной вязкости. Проекции касательных напряжений ветра выражаются через значения его скорости на стандартной метеорологической высоте с поправкой на коэффициент аэродинамического сопротивления поверхности моря.

Предполагалось, что на дне нормальная составляющая скорости течения равна нулю, придонные касательные напряжения связаны со скоростью по логарифмическому закону. На боковых границах выполняются условия прилипания.

Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчиво-

сти для баротропных волн. Пространственное разрешение модельной сетки, составляло 0,925 км, число расчетных уровней по вертикали – 21. Для участка пролива с наименьшими глубинами (227 м), шаг по горизонтали составлял 11 м. Интегрирование системы уравнений производилось для расчетной области, конфигурация береговой линии и рельеф дна которой совпадали с аналогичными характеристиками Датского пролива.

Предполагалось, что в начальный момент времени (до возникновения ВАВ) в расчетной области движения воды отсутствуют.

Результаты исследования и их анализ

Наиболее существенным недостатком методики обнаружения блокирующих процессов [1] при обнаружении ВАВ, пересекающих Исландский минимум, являются их систематические пропуски (за период 01.01.1948–31.12.2018 значение $P_{ат}$ в данном районе, уровня 1015 гПа, не достигало ни разу). Существенным видом ошибок при ее применении здесь являются также ложные тревоги.

Еще один важный недостаток рассматриваемой методики состоит в том, что ее реализация возможна лишь с участием человека, обладающего достаточным опытом работы с картами погоды. В результате, при обнаружении ВАВ с ее применением могут возникать «антропогенные» ошибки.

Как следует из изложенного, для обнаружения ВАВ, которое пересекает Исландский минимум, или другую глубокую барическую депрессию, методика [1] не пригодна. Поэтому для достижения поставленной цели необходима другая методика, при разработке которой целесообразно учесть все известные особенности данного процесса.

Поэтому при ее разработке учитывалось, что ВАВ это быстрое воздушное течение с северных румбов. Меридиональные составляющие вектора его V на всех широтах, где ВАВ существует, имеют повышенные значения и направлены с на юг. В пределах возникающей при ВАВ полосы, связывающей Арктический и Субтропический антициклон, повышенными являются $P_{ат}$, а также H_p , в то время как T_v понижено.

В результате анализа фактического материала установлено, что над ВАВ повышенные H_p регистрируются при любых значениях геопотенциала p , характерных для тропосферы. Этим ВАВ, как неоднородность полей H_p , существенно отличается от циклонов и подвижных антициклонов.

В циклонах и антициклонах, в верхних и нижних слоях тропосферы, отклонения H_p от соответствующих средних значений, противоположны по знаку [8].

В предлагаемой методике учитывались значения H_p , соответствующие 700 гПа и 300 гПа. В те или иные сутки значения $P_{ат}$ и H_p рассматривались как повышенные (а значения T_v как пониженные), если они превышали (или соответственно были ниже) средние уровни $P_{ат}$, H_p и T_v , рассчитанные для тех же суток, по всем узлам координатной сетки реанализа ERA-Interim, расположенным, на той же параллели.

Учитывалось, что при ВAB, в пределах полосы, соединяющей Гренландский антициклон или другой компонент Арктического антициклона с Азорским максимумом, в которой повышены $P_{ат}$, H_p и понижено T_v , среднесуточные V направлены с северных румбов (от СЗ до СВ), а их модуль превышает 5 м/с.

Методика обнаружения ВAB, которая предполагает возможность ее реализации без участия человека, должна учитывать, что упомянутая полоса может иметь произвольную конфигурацию. Поэтому для ее выявления предложена процедура, основанная на полном переборе возможных конфигураций. В ней учитывалось, что из каждого узла координатной сетки реанализа, расположенного внутри такой полосы, воздух при ВAB может двигаться лишь в каких-либо из трех возможных направлений – на ЮЗ, Ю или ЮВ. Предполагалось, что ВAB образуется на параллели 65° с. ш., и достигает параллели 40° с. ш.

При оценке частот правильного обнаружения ВAB с использованием методики [1] и предложенной методики, определялись даты, в которые над учитываемыми метеостанциями происходило обнаружение ВAB, а на них фактически регистрировалось повышение $P_{ат}$ и снижение T_v . Для этого использованы результаты фактических наблюдений за изменениями $P_{ат}$ и T_v на некоторых метеостанциях Крыма в изучаемый период, которые получены из архива Севастопольского отделения ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова». Частоты правильного обнаружения ВAB с применением предложенной и традиционной методики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Частоты выявления повышений $P_{ат}$ и снижений T_v на учитываемых метеостанциях в периоды времени, для которых по предложенной методике (А), а также по традиционной методике [1] (Б) были обнаружены достигающие их ВАВ

	Методика			Методика	
	А	Б		А	Б
Метеостанция			Метеостанция		
Черноморское	0,95	0,73	Ялта	0,92	0,75
Евпатория	0,96	0,77	Алушта	0,95	0,74
Севастополь	0,96	0,68	Феодосия	0,90	0,76
Херсонесский маяк	0,95	0,69	Керчь	0,93	0,72
Мысовое	0,94	0,72	Опасное	0,95	0,70

Как следует из табл. 1, частоты выявления местных признаков ВАВ на учитываемых метеостанциях в периоды времени, для которых по предложенной методике обнаружены достигающие их ВАВ, заметно больше, чем аналогичные показатели для традиционной методики. Из этого следует, что предложенная методика пригодна для обнаружения ВАВ, а ее применение приводит к ошибкам реже, чем использование методики [1].

Предложенная методика применена при решении второй задачи. Установлено, что средние значения характеристик ВАВ, выявленных над Датским проливом за 1979–2018 гг., составили: длительность – 5,6 суток, направление $5,8^\circ$, модуль скорости ветра $-21,7$ м/с.

Исходя из количества обнаруженных ВАВ той или иной длительности, установлено, что значимым может быть признано превышение уровня 0,5 частотой возникновения события, при котором в период существования ВАВ индекс САК уменьшается, не менее чем на 0,1.

Для каждого сектора Северной Атлантики, имеющего ширину $2,5^\circ$, определены значения частот (F), с которыми случаи снижения среднесуточных значений индекса САК происходили в даты, соответствующие периодам существования ВАВ некоторой длительности, обнаруженных над тем или иным сектором.

Некоторые примеры полученных при этом результатов приведены в табл. 2.

Из таблицы 2 следует, что отклонения от уровня 0,5 частоты, с которой снижения среднесуточных значений индекса САК происходят в периоды ВАВ, обнаруженных в том или ином секторе, зависят от расположения этого сектора, а также от минимальной длительности таких ВАВ.

Таблица 2

Значения частот (F), с которыми среднесуточные значений индекса САК в даты, соответствующие периодам существования над тем или иным сектором ВАВ, были меньше, чем в непосредственно предшествующие им даты

Уровень минимальной длительности ВАВ 3 суток									
Сектор (°, з. д.)	F	Сектор (°, з. д.)	F	Сектор (°, з. д.)	F	Сектор (°, з. д.)	F	Сектор (°, з. д.)	F
60–57,5	0,47	47,5–45	0,50	35–32,5	0,57	22,5–20	0,57	10–7,5	0,47
57,5–55	0,48	45–42,5	0,51	32,5–30	0,57	20–17,5	0,55	7,5–5	0,47
55–52,5	0,49	42,5–40	0,52	30–27,5	0,58	17,5–15	0,53	5–2,5	0,46
52,5–50	0,50	40–37,5	0,56	27,5–25	0,59	15–12,5	0,51	2,5–0	0,45
50–47,5	0,51	37,5–35	0,58	25–22,5	0,59	12,5–10	0,49		
Уровень минимальной длительности ВАВ 7 суток									
60–57,5	0,47	47,5–45	0,49	35–32,5	0,60	22,5–20	0,61	10–7,5	0,49
57,5–55	0,48	45–42,5	0,50	32,5–30	0,60	20–17,5	0,57	7,5–5	0,48
55–52,5	0,47	42,5–40	0,52	30–27,5	0,61	17,5–15	0,55	5–2,5	0,47
52,5–50	0,49	40–37,5	0,58	27,5–25	0,63	15–12,5	0,53	2,5–0	0,46
50–47,5	0,50	37,5–35	0,59	25–22,5	0,63	12,5–10	0,51		
Уровень минимальной длительности ВАВ 10 суток									
60–57,5	0,48	47,5–45	0,50	35–32,5	0,60	22,5–20	0,60	10–7,5	0,48
57,5–55	0,47	45–42,5	0,50	32,5–30	0,62	20–17,5	0,57	7,5–5	0,46
55–52,5	0,48	42,5–40	0,53	30–27,5	0,62	17,5–15	0,56	5–2,5	0,46
52,5–50	0,48	40–37,5	0,60	27,5–25	0,61	15–12,5	0,53	2,5–0	0,46
50–47,5	0,49	37,5–35	0,64	25–22,5	0,63	12,5–10	0,50		

Такие отклонения являются значимыми лишь при ВАВ, минимальная длительность которых составляет 7 суток и более. Чем больше длительность ВАВ, тем количество соответствующих секторов больше, а частота подобных превышений выше.

На третьем этапе решения данной задачи для каждого месяца оценены значения частот, с которыми за период 2000–2018 гг. ВАВ, пересекающие Исландский минимум, располагались над районами Датского пролива и Фареро – Исландского прохода. Установлено, что с ноября по март ВАВ проходили преимущественно над Фареро – Исландским проходом (частота в пределах 0,6–0,8). При этом над Датским проливом они наблюдались с частотой 0,2–0,4.

В месяцы с апреля по сентябрь ВАВ проходили чаще (частота 0,65–0,75) над Датским проливом. В октябре частоты, с которыми ВАВ проходили над указанными районами, различались в наименьшей степени.

С использованием разработанной методики для каждого месяца в период 1979–2018 гг. оценены значения СП ВАВ, из которых сформированы соответствующие временные ряды. С использованием метода

корреляционного анализа и критерия Стьюдента для того или иного месяца определены расположения в Северной Атлантике областей значимой корреляции межгодовых изменений СП ВАВ над Датским проливом, а также синхронных с ними вариаций ТПО. Для проверки наличия статистической устойчивости выявляемых связей, подобный анализ проведен для всех возможных различных отрезков указанных временных рядов, длиной 36 членов и более (при общей длине ряда 40, всего таких отрезков 15). Для каждого отрезка определен 95 % уровень достоверной корреляции. Для отрезков длиной 36 членов он равен 0,34.

Связь между изменениями СП рассматриваемых ВАВ и вариациями ТПО некоторого участка изучаемой акватории признавалась устойчивой, если решение о ее значимости принималось при анализе любых отрезков соответствующих временных рядов. Расположения районов Северной Атлантики, где межгодовые изменения ТПО значимо и устойчиво связаны с вариациями СП ВАВ, проходящими через область Исландского минимума, выявлены для всех месяцев.

На рисунке 1 в качестве примера отображены расположения в Северной Атлантике областей значимой и устойчивой корреляции межгодовых изменений СП ВАВ, которые проходят над Датским проливом в апреле, июне и сентябре, а также синхронных с ними вариаций ТПО.

Из рисунка 1, *a–в* следует, что в апреле, июне и сентябре существуют обширные районы Северной Атлантики, где корреляция межгодовых изменений среднемесячных значений их ТПО, а также СП ВАВ, которые проходили над Датским проливом, является значимой, устойчивой и отрицательной.

Из расположения выявленных акваторий следует, что, как правило, они включают те же участки Северного субполярного гидрологического фронта, через которые проходят рассматриваемые ВАВ. Аналогичные закономерности расположения таких акваторий характерны и для мая, июля и августа. В зимние месяцы аналогичные устойчивые связи выявлены для Фарреро – Исландского прохода.

Оценка с помощью модели РОМ приращения среднесуточного расхода течения в Датском проливе, вызванного действием ВАВ, с параметрами, близкими к средним за период 1979–2018 гг. (продолжительность 5 сут., направление – 0° , модуль скорости –20 м/с), показала, что значение данного показателя составляет $457\,000\text{ м}^3/\text{с}$. Подобный расход составляет 12,4 % от среднего расхода арктических вод, поступающих в Атлантику через Датский пролив ($3\,694\,444\text{ м}^3/\text{с}$).

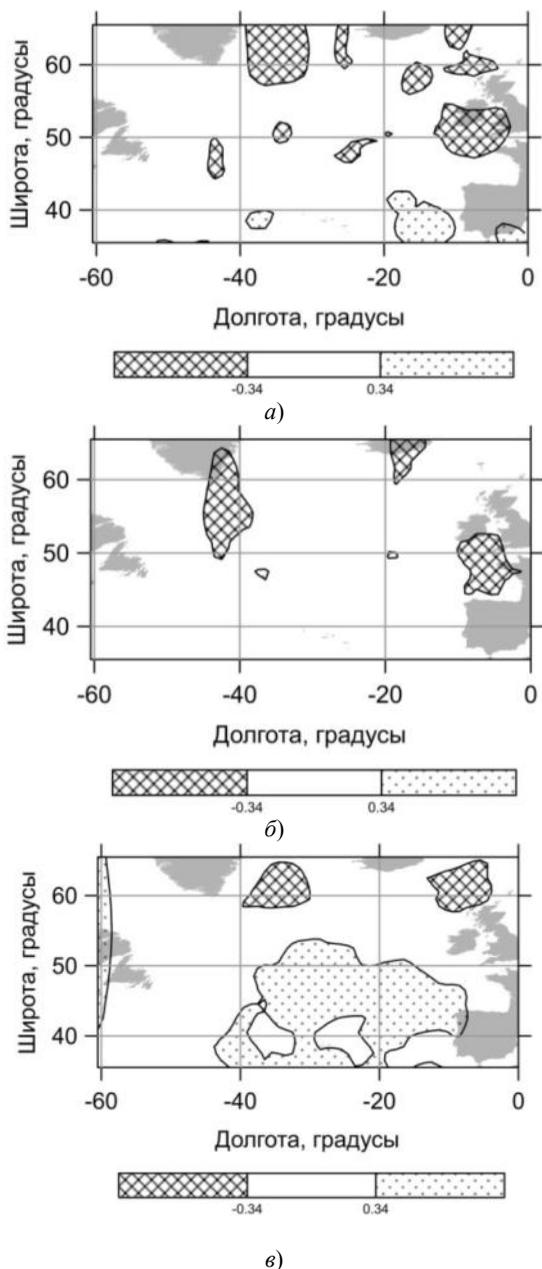


Рис. 1. Расположения акваторий Северной Атлантики, где межгодовые изменения среднемесячных значений ТПО и СП ВАВ над Датским проливом связаны между собой значимо и устойчиво: а) апрель, б) июнь, в) сентябрь

Поскольку течение в проливе, которое инициировано ВАВ, в отличие от Восточно-Гренландского течения, является ветровым, и большая часть его расхода приходится на приповерхностный слой, вывод о значимости влияния ВАВ на распределение ТПО на некоторых участках зоны Северного приполярного гидрологического фронта представляется адекватным.

Выводы

Таким образом, установлено, что выдвинутая гипотеза адекватна.

1. Частота, с которой возникновение ВАВ приводит к снижению индекса САК, определяется длительностью ВАВ, а также его расположением.

2. Возникновение ВАВ, как фактор САК, является значимым при его длительности не менее 7 суток.

3. Механизм действия этого фактора – влияние ВАВ на расходы течений, в Датском проливе и Фарреро – Исландском проходе, доставляющих арктическую воду в область Исландского минимума.

Список литературы

1. Дзердзеевский Б. Л., Курганская В. М., Витвицкая З. М. Типизация циркуляционных механизмов в северном полушарии и характеристика синоптических сезонов : тр. науч.-исслед. учреждений Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Сер. 2: Синоптическая метеорология. Вып. 21. Центральный институт прогнозов. М. ; Л. : Гидрометиздат, 1946, 80 с.
2. Североатлантическое колебание: диагноз и моделирование десятилетней изменчивости и ее долгопериодной эволюции / И. И. Мохов [и др.] // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36, № 5. С. 605–616.
3. Мохов И. И., Акперов М. Г., Прокофьева М. А. Блоклинги в Северном полушарии и Евро-Атлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам // Докл. Акад. наук. 2013. Т. 449, № 5. С. 1–5.
4. Нестеров Е. С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М. : Триада, ЛТД, 2013. 144 с.
5. Шакина Н. П., Иванова А. Р. Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирования // Метеорология и гидрология. 2010. № 11. С. 5–18.
6. Blomberg A. F., Mellor G. L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model // Three Dimensional Coastal Ocean Models, Coastal Estuarine Science. 1987. Vol. 4. P. 1–16.
7. An overview of the North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact / J. W. Hurrell, Y. Kushnir, G. Ottersen, M. Visbeck // Geophys. Monogr. 2003. Vol. 134. P. 1–35.
8. Mankin M. Atmospheric dynamics. London : Cambridge Univ. press., 2011. P. 512.
9. Mellor G. L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys. 1982. N 20. 851–875.
10. База данных. Среднесуточные значения индекса САК [Электронный ресурс]. URL: norm.daily.nao.index.b500101.current.ascii/.
11. База данных об изменениях среднемесячных значений ТПО различных районов мира [Электронный ресурс]. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html>.
12. База данных. Результаты ERA–Interim reanalysis. Среднесуточные значения компонентов скорости ветра [Электронный ресурс]. URL: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/era-interim>.
13. The ERA–Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. Vol. 137, N 656. P. 553–597. doi:10.1002/qj.828.

УДК 504.3.054

Результаты маршрутных измерений малых газовых примесей в атмосфере юго-восточного побережья оз. Байкал в летний период 2018 г.

В. В. Цыдыпов (tsydyпов@inbox.ru)

А. С. Заяханов (lmza@mail.ru)

Г. С. Жамсуева (lmza@mail.ru)

Т. С. Бальжанов (tbalzhanov@gmail.com)

И. П. Сунграпова (ip.sungrapova@mail.ru)

С. А. Нагуслаев (naguslaev@mail.ru)

А. Л. Дементьева (ayunadem@gmail.com)

Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ

Аннотация. В работе представлены результаты маршрутных измерений малых газовых примесей в атмосфере юго-восточного побережья оз. Байкал в летний период 2018 г. Измерения проводились в атмосфере береговой зоны 9 станций с априорно разной степенью и характером антропогенной нагрузки: пос. Култук, г. Байкальск, с. Выдрино, пос. Танхой, г. Бабушкин, пос. Боярский, пос. Новый Энхалук, с. Гремячинск, с. Турка. Выявлен определенный контраст вариаций концентраций диоксида серы, диоксида азота, оксида углерода в зависимости от направления и скорости ветра, а также от влияния местных локальных источников выброса. Проведен анализ распределения концентраций газовых примесей по диапазонам значений в зависимости от направления ветра на научном стационаре «Боярский». Обнаружена высокая повторяемость концентрации малых газовых примесей при юго-западном направлении ветра.

Ключевые слова: атмосфера, малые газовые примеси, концентрация, маршрутные измерения.

Введение

Мониторинг параметров атмосферных компонентов, контроль процессов переноса загрязнений в атмосфере является необходимой предпосылкой для решения глобальных проблем экологии и изучения изменений климата. Именно в атмосфере распространение загрязнений происходит наиболее быстрым образом и локальные катастрофы приобретают глобальный характер.

Актуальной проблемой остается изучение пространственно-временной изменчивости атмосферных примесей в уникальном природном регионе озера Байкал. Регион все еще недостаточно и неравномерно изучен в отношении антропогенного загрязнения атмосферы [1]. В настоящее время экспериментальные исследования количе-

ственного и качественного состава атмосферных примесей в регионе оз. Байкал, их пространственные и временные вариации носят эпизодический характер. Атмосфера оз. Байкал наиболее уязвима от антропогенных воздействий, вследствие орографической изолированности Байкальской котловины и специфического характера циркуляции воздушных потоков над акваторией озера.

С развитием туристической деятельности в летний период увеличивается антропогенная нагрузка на атмосферу и водную среду региона озера Байкал. В этой связи актуально выяснить насколько будут сказываться эти негативные процессы на содержание малых газовых примесей в атмосфере юго-восточного побережья оз. Байкал

Материалы и методы исследования

В период 15–21 августа 2018 г. проводились маршрутные измерения концентраций диоксида серы (SO_2), оксидов азота (NO_x), оксида углерода (CO), диоксида углерода (CO_2) в атмосфере береговой зоны оз. Байкал. В маршрут входило 9 станций с априорно разной степенью и характером антропогенной нагрузки: пос. Култук, г. Байкальск, с. Выдрино, пос. Танхой, г. Бабушкин, пос. Боярский, пос. Новый Энхалук, с. Гремячинск, с. Турка. Отбор проб воздуха проводился на высоте 2 м от уровня земли с помощью газоанализатора оксида углерода «МГЛ-19М», газоанализатора окислов азота P310A, газоанализатора углекислого газа «ОПТОГАЗ-500.4» и газоанализатора диоксида серы C-310A. Калибровка и установка нуля осуществляется автоматически при помощи встроенных источников микропотоков по командам процессора газоанализаторов. Подача электроэнергии обеспечивалась бензоагрегатом, который находился на значительном расстоянии от места отбора проб атмосферного воздуха.

В период 5–24 августа 2018 г. проводились измерения концентраций малых газовых примесей на научном стационаре «Боярский». Одновременно измерялись метеорологические параметры атмосферы с помощью акустического метеорологического комплекса АМК-03 [2].

Результаты исследования и их обсуждение

Маршрутные измерения начались с самого западного населенного пункта побережья оз. Байкал – пос. Култук. Поселок имеет развитую транспортную систему: автомобильная магистраль Р258 (трасса М55), федеральная автодорога А333 (Тункинский тракт), Транссибирская магистраль. Погодные условия в Култуке не позволили зафиксировать ожидаемых высоких антропогенных значений газовых приме-

сей. В период измерений была пасмурная погода с небольшими осадками, преобладал ветер слабый восточного направления.

На рис.1 представлено пространственно-временное распределение концентраций SO_2 , NO_2 , CO и CO_2 .

Повышенные концентрации SO_2 , CO , NO_2 отмечены в пос. Новый Энхалук, осредненные значения которых составляют $7,4 \text{ мкг/м}^3$, $2,8 \text{ мг/м}^3$ и 11 мкг/м^3 , соответственно (рис. 1, а–в). Антропогенная нагрузка на атмосферу в туристической зоне активного отдыха пос. Новый Энхалук, прежде всего, связана с влиянием дыма от костров и автомобильных выхлопов.

Содержание диоксида серы в остальных пунктах наблюдения было невелико и изменялось в диапазоне значений, в основном, от $3,2$ до $4,7 \text{ мкг/м}^3$.

За весь период маршрутных измерений средние концентрации диоксида азота NO_2 были невелики и находились в пределах от 6 до 11 мкг/м^3 .

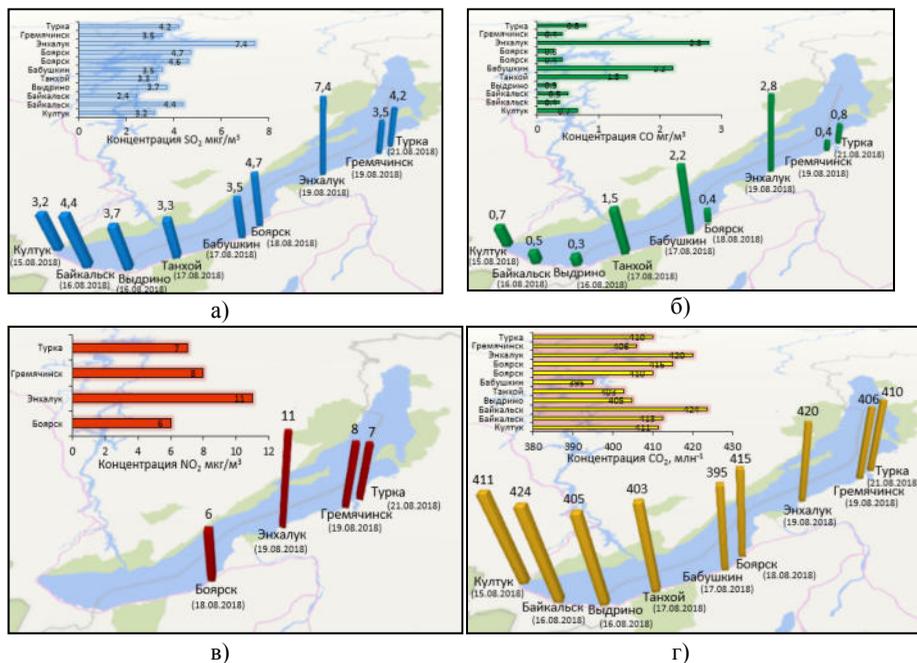


Рис. 1. Пространственно-временное распределение осредненных концентраций:
 а) диоксида серы SO_2 (мкг/м^3); б) диоксида азота NO_2 (мкг/м^3);
 в) оксида углерода CO (мг/м^3); г) диоксида углерода CO_2 (млн^{-1})

Повышенные концентрации оксида углерода CO наблюдались в береговой зоне г. Бабушкин и пос. Танхой, достигавшие средних значений $2,2 \text{ мг/м}^3$ и $1,5 \text{ мг/м}^3$, соответственно. Высокий уровень оксида углерода в этих пунктах, вероятно, связан с влиянием локального источника загрязнения атмосферы – дымящего мусорного полигона, расположенного в лесу вдоль трассы М55 вблизи ст. Ключевка.

Измерения малых газовых примесей в приземной атмосфере по маршруту Култук-Турка выявили определенный контраст вариаций концентраций диоксида серы, диоксида азота, оксида углерода в зависимости от направления и скорости ветра, а также от влияния местных локальных источников выброса.

Во время маршрутных измерений параллельно проводились наблюдения на научном стационаре «Боярский». На рисунке 2 представлен временной ход усредненных 10-минутных значений концентрации оксида и диоксида азота, озона и направления ветра. Концентрации оксида и диоксида азота в большинстве случаев не превышали 20 мкг/м^3 , их средние значения составляют $2,4 \text{ мкг/м}^3$ и $3,4 \text{ мкг/м}^3$, соответственно. В отдельные дни наблюдались повышенные значения NO_2 , достигавшие 52 мкг/м^3 . Чаще всего максимальные значения оксидов азота были зафиксированы в вечерние часы при слабом ветре (менее 3 м/с) юго-западного направления. Вероятно, основной причиной увеличения оксидов азота является перенос примесей в пункт наблюдения от локальных антропогенных источников выбросов. Из рисунка 2 видно, что минимальным значениям концентрации O_3 соответствуют повышенные значения оксида азота. Следовательно, с ростом концентрации NO происходит процесс разрушения озона.

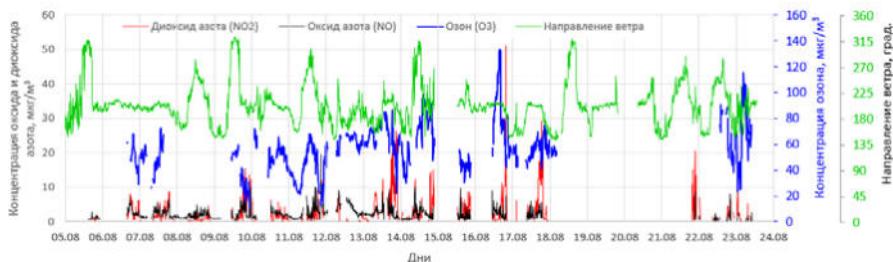


Рис. 2. Временной ход усредненных 10-минутных значений концентрации оксида и диоксида азота, озона и направления ветра на научном стационаре «Боярский» за период 5–24 августа 2018 г.

Проведен анализ распределения концентраций газовых примесей по диапазонам значений в зависимости от направления ветра (рис. 3). Как следует из диаграммы на рис. 3, а, за период 5–24 августа 2018 г. на стационаре «Боярский» преобладающими направлениями ветра были юго-западное (56 %), южное (26 %) и западное (10 %).

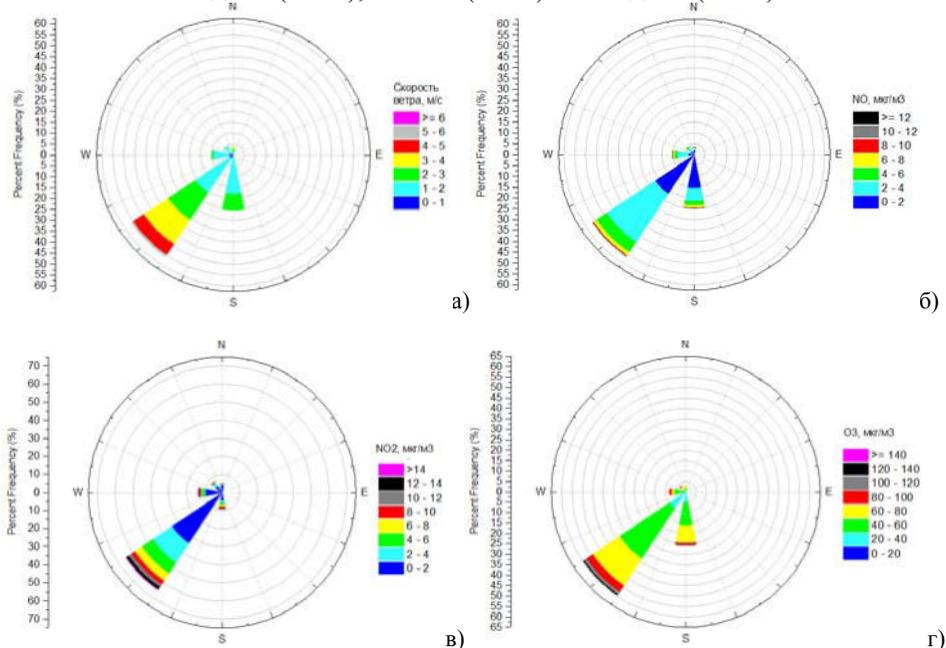


Рис. 3. Зависимость распределения скорости ветра (а), оксида азота (б), диоксида азота (в), озона (г) от направления ветра на научном стационаре «Боярский» за период 5–24 августа 2018 г.

Наибольшая повторяемость NO в диапазонах значений 0–2 мкг/м³, 2–4 мкг/м³, 4–6 мкг/м³ наблюдалась при юго-западном направлении ветра, и составляла 21,7 %, 26,7 %, 5,7 %, соответственно (рис. 3, б). Повторяемость NO для значений, превышающих 6 мкг/м³, составляла 2,25 %. При южном направлении ветра также наблюдалась относительно высокая повторяемость NO, составляющая 24,9 % для всего диапазона значений. Повторяемость NO при западном направлении ветра составляла 10,2 %.

Выявлено, что высокая повторяемость концентрации диоксида азота в основном наблюдалась при юго-западном направлении ветра и составляла 64,9 %, при западном направлении ветра – 13,4 %, при

южном направлении ветра – 9,2 %, при северо-западном направлении ветра – 7,4 % (рис. 3, в).

Отмечена наибольшая повторяемость O_3 в диапазонах значений 40–60 мкг/м³ и 60–80 мкг/м³ при юго-западном направлении ветра, составляющая 28,9 % и 15,6 %, соответственно (рис. 3, з).

Повторяемость распределения газовых примесей относительно остальных направлений ветра слабо выражено.

Заключение

По результатам измерений малых газовых примесей в приземной атмосфере по маршруту Култук-Турка обнаружен определенный контраст вариаций концентраций диоксида серы, диоксида азота, оксида углерода в зависимости от направления и скорости ветра, а также от влияния местных локальных источников выброса.

Проведен анализ распределения концентраций газовых примесей по диапазонам значений в зависимости от направления ветра на научном стационаре «Боярский». Обнаружена высокая повторяемость концентрации малых газовых примесей при юго-западном направлении ветра.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-45-030007 p_a), в части исследований на научном стационаре «Боярский» при поддержке гранта РФФИ (проект № 18-45-030032 p_a).

Список литературы

1. Суточная динамика озона и других малых газовых примесей в прибрежной зоне озера Байкал (стационар «Боярский») / А. С. Заяханов, Г. С. Жамсуева, В. В. Цыдыпов, Т. С. Бальжанов // Метеорология и гидрология / ФГБУ НИЦ Планета, 2017. № 8. С. 85–92.
2. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 А. А. Азбукин, А. Я. Богусевич, В. С. Ильический, В. А., Корольков А. А. Тихомиров, В. Д. Шевелева // Метеорология и гидрология / ФГБУ НИЦ Планета, 2006. № 11. С. 89–97.

УДК 551.465.71

«Вариации затока Атлантических вод на шельф Западного Шпицбергена как отклик на форсирующие воздействия атмосферной циркуляции»

Е. А. Чистякова (bumkat@mail.ru)¹Р. М. Алояров (romaaloyarov@mail.ru)¹Л. О. Неелова (murs2000@mail.ru)²¹ ФГБУ «АНИИ», г. Санкт-Петербург³ ФГБОУ ВО «РГМУ», г. Санкт-Петербург

Аннотация. В статье сделана попытка найти связь двух периодов затока (весна 2014 г. и весна 2017 г.) Атлантических вод на шельф Западного Шпицбергена с атмосферной циркуляцией. Рассмотрены непосредственно траектории циклонов в выбранные периоды. Так как результаты проведенных исследований продемонстрировали неявную связь между данными явлениями, то рассматривалось влияние форм циркуляции и климатических индексов (NAO, AO, EA) на наличие затоков, так как именно эти метеорологические параметры оказывают воздействие на траектории и глубину прохождения циклонов вблизи архипелага. С помощью данных со спутниковых альтиметров получены и проанализированы аномалии уровня для участка, находящегося на пути затока Атлантики во фьорды Западного Шпицбергена. В периоды заполнения атлантической водой фьордов, аномалии уровня были положительные.

Ключевые слова: атлантические воды, Западный Шпицберген, климатические индексы, альтиметрия.

Введение

Как известно, во фьорды Западного Шпицбергена периодически происходит заток теплых атлантических вод. Его можно наблюдать в течение всего года. Данное явление приносит потепление воды в акваториях исследуемой территории. Есть два предположения причины такого затока. Первая – это изменение свойств Западного Атлантического течения, воды которого стремятся к Шпицбергену. Вторая – межгодовые изменения в крупномасштабной атмосферной циркуляции в Арктике и в проливе Фрама, которые могут иметь существенное значение для обмена воды в шельфах фьордов и температуры вод Западного Шпицбергена. В пользу второй гипотезы о динамическом отклике на направление ветра, потенциально оказывающем влияние на температуру воды на шельфе, высказываются как российские, так и зарубежные исследователи [1; 7].

За период 2011–2018 гг. накоплен большой объем данных по результатам океанографических исследований, выполненных на базе

РНЦШ в заливах Западного Шпицбергена институтом Арктики и Антарктики. По результатам анализа этих данных выявляются существенные вариации затока Атлантических вод на шельф Западного Шпицбергена [1].

Причиной этих вариаций предположительно является отклик на атмосферный форсинг, что так же описывается в ряде статей [2; 7]. Прохождение глубоких циклонов в проливе Фрам вызывает нагон масс воды к береговой линии Западного Шпицбергена, что модулирует баротропную составляющую Западно-Шпицбергенского течения на шельфовом склоне, определяемую перепадом высот водной поверхности. При этом возникают топографически направленные потоки в желоба на шельфе Западного Шпицбергена.

Целью данного исследования является выявить, есть ли связь вариаций затока Атлантических вод в акватории Западного Шпицбергена с атмосферными воздействиями. Поскольку Архипелаг Шпицберген и пролив Фрама являются «воротами» для прохождения теплых течений в полярный регион, рассмотрение причин такого проникновения, является важной частью изучения изменения климата Арктики.

Исходные данные

Океанологические данные о прибрежной температуре и солёности на разных глубинах взяты за период 2011–2018 гг. по результатам океанографических исследований, выполненных на базе РНЦШ ФГБУ «АНИИ» в заливах Западного Шпицбергена. Подробный реанализ метеоинформации ERA-Interim, а именно давление на уровне моря и приводный ветер, получен из архива Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) с дискретностью 6 часов с шагом по сетке 0,5 (<https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>). Значения превышения уровня вдоль траектории пролёта спутника взяты по трекам спутниковых альтиметров AVISO (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data.html>). В работе использовались среднемесячные данные климатических индексов NAO и AO с 2011 по 2018 г.: (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/>) и индекс EA: (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>). Данные по среднемесячным аномалиям повторяемости форм циркуляции предоставлены Лабораторией долгосрочных метеорологических прогнозов погоды ФГБУ «АНИИ».

Результаты и их обсуждение

В [1] по результатам океанографической съемки выявляются периоды существенного затора Атлантических вод (АВ) во фьорды Западного Шпицбергена с 2011 по 2018 г.: март – июнь 2014 г. и 2017 г. Атлантические воды (АВ) распространяются вдоль архипелага в виде Западно-Шпицбергенского течения, являющегося продолжением Норвежского течения. По результатам недавних исследований установлено, что именно воды Западно-Шпицбергенского течения переносят большую часть всего объема АВ, поступающих в Арктический бассейн, и являются основным переносчиком тепла в Центральную Арктику [6].

В эти периоды (весна 2014 и 2017 г.) и за весь рассматриваемый период (2011–2018 гг.) были проанализированы глубина и траектории циклонов, которые проходили из Атлантического океана к Шпицбергену. В [6] сделан вывод о том, что атлантическим водам необходимо как минимум от 50 до 90 дней, для того, чтобы они смогли как-то повлиять на характеристики вод устья Исфьордена. Иными словами, именно столько составляет задержка отклика вод на изменение атмосферных процессов. По результатам анализа синоптического архива было выявлено, что с декабря 2013 г. по март 2014 г. и с декабря 2016 г. по март 2017 г. 60 % траекторий всех глубоких циклонов направлены на юго-восток от Шпицбергена в Баренцево море, 30 % проходят к западу через пролив Фрама и траектории 10 % циклонов пролегают по континенту через о. Гренландия или Скандинавский полуостров (рис. 1).

В [7] было высказано предположение, что для того, чтобы АВ заполнила фьорды Западного Шпицбергена, атмосферные потоки должны проходить прямо через пролив Фрама. Но полученные результаты не показывают однозначную картину. Поэтому в дальнейшем было рассмотрены иные факторы, которые могли привести к изменению структуры вод.

Первое – это формы циркуляции. В работе рассмотрены аномалии форм циркуляции в периоды затора АВ с заблаговременностью до одного года (рис. 2). Как предполагается в [5], западная форма циркуляции W отражает преобладание зональных процессов, при которых барические образования смещаются на Европу преимущественно с Атлантики. Формы E и C соответствуют меридиональному состоянию циркуляции атмосферы. При форме E над Европой устанавливается мощный гребень, над Атлантикой и Западной Сибирью отмечаются сопряженные с ним высотные ложбины. При процессах формы C над Европой располагается высотная ложбина, а над Атлантикой и Западной Сибирью – сопряженные с ней гребни. Происходит мощный вынос атлантического тепла в Арктику.

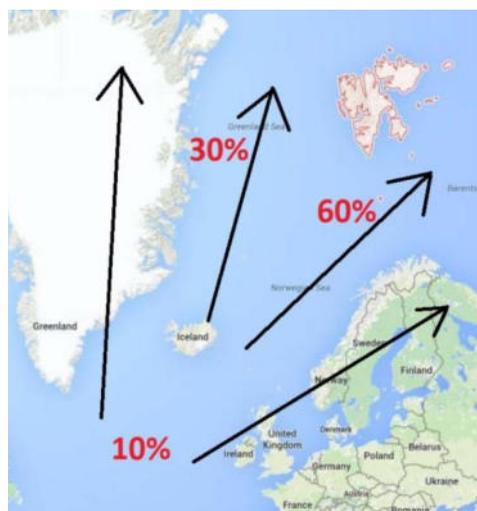


Рис. 1. Траектории циклонов

Как видно из рис. 2, аномалии всех трех форм циркуляции меняют знак в обоих случаях затока АВ в сентябре-октябре, т. е. примерно за 180 дней до возникновения АВ во фьордах Западного Шпицбергена. При этом формы Е можно наблюдать отрицательную аномалию повторяемости в периоды затока, а W и С – положительную. Такие аномалии хорошо проявляются особенно для второго периода – весна 2017 г. Такие результаты сопоставимы с характерными расположениями ложбин и гребней, которым соответствуют траектории циклонов в направлении Шпицбергена.

Как отмечается в [3; 4], климатические индексы обуславливают прохождение циклонов от Атлантики к Арктике. Индекс NAO (Северо-Атлантическое колебание) отражает широтные изменения траектории циклонов, индекс EA (Восточно-Атлантическое колебание) – изменения в интенсивности и количестве циклонов. Максимальное количество глубоких циклонов определяется в основном положительной фазой EA, а взрывные циклоны возникают наиболее часто при положительной фазе NAO, при этом усиливается западный перенос, увеличивается частота и сила зимних штормов, пересекающих Северную Атлантику, при этом их траектории сдвигаются к северу. При положительной фазе AO зона высокого давления в умеренных широтах вызывает сдвиг западно-восточного переноса и струйного течения на север.

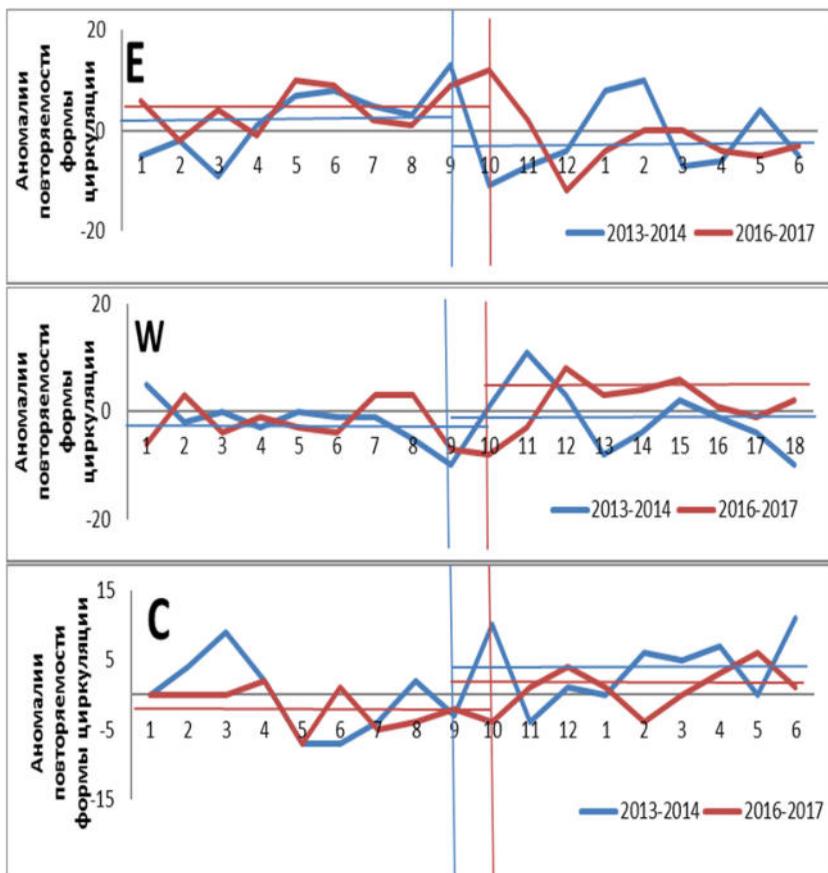


Рис. 2. Аномалии повторяемости форм циркуляции для двух периодов затора АВ

На рисунке 3 представлены значения трех индексов для случаев затора АВ и с заблаговременностью до 2 лет. Для случая весны 2014 г. хорошо видно, что за год до затора индексы NAO и AO переходят из отрицательной фазы в положительную фазу, а индекс EA увеличивается свое значение. Такие результаты могут определять увеличение количества циклонов, идущих к Шпицбергену и увеличение их глубины. К сожалению, для весны 2017 г. выводы не столь однозначные.

С помощью спутниковых альтиметров AVISO получены аномалии уровня для участка, отмеченного на рис. 4 черным прямоугольником (77–79° с. ш., 8–10° в. д.). Выбор именно этого участка обусловлен нахождением его на пути основных потоков АВ к фьордам Западного Шпицбергена. Участок выбирался не в плотную к архипе-

лагу, так как спутниковые альтиметры показывают большую погрешность на границе стыка вода-суша.

На рисунке 5 показан график ежедекадных аномалий уровня на выбранном участке за исследуемый период с 2011 по 2018 г. На графике хорошо прослеживается годовой ход с наибольшими аномалиями в летне-осенний период и с наименьшими – в зимне-весенний. Красными линиями отмечены периоды затока АВ на шельф (весна 2014 г. и весна 2017 г.). Как видно на графике, этим периодам соответствуют положительные аномалии уровня, хотя в те же месяцы, но в другие года (2011–2013 гг., 2015 г.) аномалии отрицательные. Получается, возникают топографически направленные потоки в желоба на шельфе Западного Шпицбергена. Это подтверждает наличие затока АВ во фьорды.

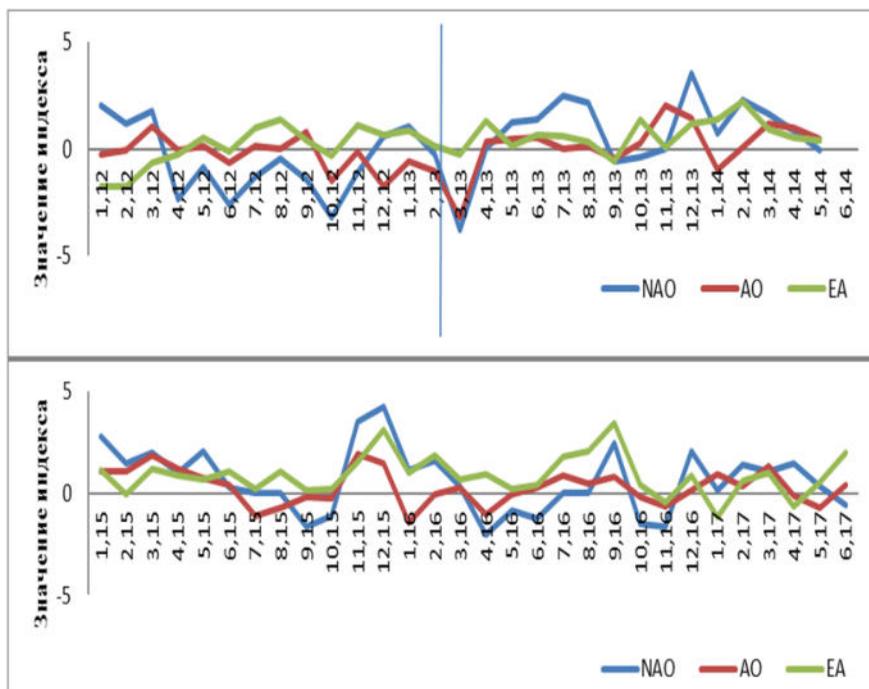


Рис. 3. Значения климатических индексов NAO, AO и EA для двух случаев затока АВ



Рис. 4. Участок, выбранный для расчета аномалий уровня по альтиметрическим данным

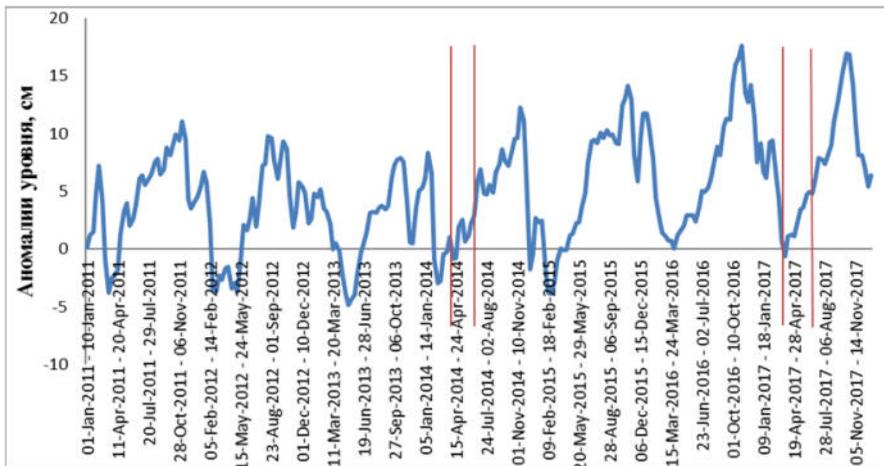


Рис. 5. Ежедекадные аномалии уровня на выбранном участке с 2011 по 2018 г.

Заключение

При построении поля давления на прилежащей к Западному Шпицбергену акватории с дискретностью 6 часов за два периода затора АВ (весна 2014 г. и весна 2017 г.) было выявлено, что в 60 % случаев траектории циклонов пролегают через Баренцево море, иными словами, проходят на ЮВ от Шпицбергена. И только в 30 % случаев циклоны имеют траектории непосредственно через пролив Фрама. Остальные 10 % траекторий пролегают по территории о. Гренландия и Скандинавского полуострова.

В рассматриваемый нами период и до полугода до него преобладали положительные аномалии повторяемости формы W. Западная форма циркуляции W отражает преобладание зональных процессов, при которых барические образования смещаются на Европу преимущественно с Атлантики. Также положительные аномалии наблюдаются у формы С. Это соответствует прохождению циклонов в сторону Шпицбергена. Формы Е наоборот наблюдались отрицательные аномалии. Такие аномалии хорошо проявляются особенно для второго периода – весна 2017 г.

Анализируя глобальные индексы, можно сделать вывод, что для первого периода затора АВ (весна 2014 г.) характерны положительные фазы NAO и AO и более высокие значения положительной фазы EA, чем в период до этого. Такие результаты могут определять увеличение количества циклонов, идущих к Шпицбергену и увеличение их глубины. Для периода весны 2017 г. фазы индексов менее определенные.

Анализ альтиметрических данных показал положительные аномалии уровня вблизи фьордов Западного Шпицбергена в периоды затора АВ, что указывает на топографические токи из Атлантики к фьордам.

Список литературы

1. *Блошкина Е. В., Фильчук К. В.* Современное состояние вод фьордов Западного Шпицбергена // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. 64(2). 462 с.
2. *Максимовская Т. М.* Межгодовая динамика распространения атлантических вод в заливе Ис-фьорд о. Западный Шпицберген в 2001–2017 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. 64(1). 386 с.
3. *Нестеров Е. С.* Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М. : Триада, ЛТД, 2013. 144 с.
4. *Нестеров Е. С.* Экстремальные циклоны в атлантико-европейском регионе. М. : Гидрометцентр России, 2018. 104 с.
5. *Узрюмов А. И.* Долгосрочные метеорологические прогнозы : учеб. пособие. СПб . : Изд. РГГМУ, 2006. 84 с.

6. *Finlo R. Cottier, Mark Inall, Vigdis Tverberg.* Wintertime warming of an Arctic shelf in response to large-scale atmospheric circulation // Journal of geophysical research. ResearchGate, 2007. 110(5). 275 p.

7. *Frank Nilsen, Ragheid Skogseth, Juni Vaardal-Lunde.* A Simple Shelf Circulation Model: Intrusion of Atlantic Water on the West Spitsbergen Shelf // JOURNAL OF PHYSICAL OCEANOGRAPHY. American Meteorological Society, 2016. 46(3). 1354 с.

УДК 551.583.1

Воздействие современных климатических изменений на экосистему Северного Дагестана

3. 3. Щербуль (ipgzina@rambler.ru)

Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, г. Махачкала

Аннотация. В работе рассматриваются особенности и современные тенденции изменения климата территории Северного Дагестана на фоне глобального потепления.

Ключевые слова: глобальное потепление, аридный климат, температурные тренды, коэффициенты корреляции.

Рост глобальных температур воздуха, наблюдаемый на современном этапе климатических изменений, способствует нарастанию естественной аридности засушливых территорий, что, в сочетании с антропогенными факторами, приводит к деградации почв, опустыниванию больших площадей Земли и другим необратимым последствиям для экосистем различного уровня. Несмотря на то, что в большинстве случаев сохраняется тенденция роста температур, существуют регионы, где отмечаются отрицательные температурные тренды. Распределение величины изменения среднегодовых температур воздуха в приземном слое атмосферы неоднородно как территориально, так и во времени и зависит от множества факторов природного и антропогенного характера.

По данным Росгидромета, коэффициенты линейного тренда среднегодовой температуры приземного воздуха за 1976–2012 гг. составляют: 1) осреднённые по территории суши Северного полушария – 0,328 °C/10 лет; 2) осреднённые по территории России – 0,43 °C/10 лет; 3) регионально осреднённые по Северо-Кавказскому ФО – 0,4 °C/10 лет [1].

Рассмотрим изменение температуры и осадков за сорокалетний период в крупных населенных пунктах Северного Дагестана, где существуют многолетние метеорологические наблюдения: Терекли-

Мектебе, Южносухокумске, Кочубее (Терско-Кумское междуречье), Кизляре и Махачкале (Терско-Сулакская низменность).

Территорию Северного Дагестана по геоморфологическим и гидрогеологическим условиям можно разделить на две примыкающие друг к другу низменности: Терско-Кумскую и Терско-Сулакскую. Первая представляет собой равнинную зону с эрозионно-аккумулятивным рельефом, незначительно наклоненную в восточном и северо-восточном направлении. Абсолютные отметки изменяются от 100 м на юго-западе до –28 м на побережье Каспийского моря, причем большая часть низменности лежит ниже уровня мирового океана. Широтное направление русла реки Кумы отделяет равнину на севере от Калмыцких степей, южная граница проходит по реке Терек. Других водных артерий, помимо этих двух рек, в районе междуречья нет. Основными элементами рельефа территории являются покрытые растительностью песчаные массивы.

Вторая – Терско-Сулакская низменность – аллювиальная равнина с множеством рек и разветвленной сетью больших и малых ирригационных каналов. Абсолютные отметки изменяются от 200 м и более на западе и юго-западе до –28 м – абсолютной отметки уровня Каспия. В состав Терско-Сулакской низменности входят Терско-Сулакское междуречье и Присулакская низменность – равнина, простирающаяся от реки Сулак вплоть до Махачкалы. Для территории Терско-Сулакского междуречья характерны многочисленные мелкие озера, часть которых приурочена к дельтовым и пойменным областям двух крупных рек – Терека и Сулака, происхождение других связано с многоводными предгорными реками Акташ, Аксай, Ярыксу, Ямансу, Шураозень, которые не доносят свои воды до моря, заболачивая большие пространства равнины.

Для климата Терско-Кумского междуречья характерно малое количество атмосферных осадков – 200–400 мм/год при испаряемости 800–1000 мм/год. Максимальное количество осадков приходится на летние месяцы (июнь) и на сентябрь; минимальные – на зимние месяцы. Максимальные температуры достигаются в июле месяце, до 43 ° в Терекли-Мектебе; минимальные отмечаются в январе. Среднегодовая температура воздуха – +8–10 °С. Высокому испарению способствуют, помимо летних высоких температур, продолжительные сильные ветры: летом преобладают среднеазиатские суховеи с востока, зимой – западные, приносящие мороз и холод. Таким образом, климат Терско-Кумской низменности имеет засушливый аридный и полуаридный

характер с жарким летом и холодной зимой. Ближе к морю он заметно смягчается, становится более влажным.

Среднегодовые температуры воздуха на территории Терско-Сулакской низменности колеблются незначительно: от 10,8 °С в Хасавюрте, 11,1 °С в Кизляре до 11,6 °С в Махачкале. Распределение осадков в рассматриваемой зоне неоднородно: наблюдается их увеличение с востока на запад и севера-востока на юго-запад. Минимальные осадки – 175–250 мм/год – на северо-востоке, на о. Чечень, максимальные – в западной части, в верховьях предгорных рек – от 400 до 600 мм/год. В прибрежной зоне увеличение количества осадков идет в южном направлении, так, в Махачкале, где наблюдения ведутся более ста лет, среднегодовые величины осадков изменяются в пределах от 250 до 500 мм/год. Величина испаряемости растет в направлении с юга на север и юго-запада на северо-восток. В предгорье она составляет 650–700 мм/год, на острове Чечень 1000 и более мм/год. Максимальная испаряемость, как и максимальные атмосферные осадки приходится на лето и поэтому большая часть атмосферных осадков не проникает в грунтовые воды и тратится на испарение.

Линейные тренды абсолютных температур воздуха отражают увеличение среднегодовой температуры в среднем на 1,4 °С по всей площади Северо-Дагестанской равнины. Расчёт коэффициентов линейных трендов среднегодовых температур воздуха, произведенный на основе данных Дагестанского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (табл. 1) показывает, что скорость роста температур не превышает среднюю по Северо-Кавказскому ФО в Южносухокумске, совпадает со средней в Терекли-Мектебе и уменьшается в восточном и юго-восточном направлении, достигая минимальных значений в прибрежной полосе. Сравнивая полученные коэффициенты с аналогичными, рассчитанными за период с 2008 по 2017 г. (табл. 1), можно сделать вывод, что скорость роста среднегодовой температуры воздуха в Южносухокумске и Терекли-Мектебе значительно возросла именно в последнее десятилетие.

Распределение величины изменения температуры по месяцам показывает, что рост температур по всей площади Северо-Дагестанского артезианского бассейна идёт в основном за счёт увеличения температуры марта, августа месяца и июня (рис. 1).

Таблица 1

Коэффициенты линейного тренда среднегодовой температуры воздуха

№	Населённый пункт	Расстояние до береговой линии, км	Рост среднегодовой температуры воздуха, °С		
			с 1978 по 2017 г.	с 1978 по 2017 г.	с 2008 по 2017 г.
1	Махачкала	0	1,1	0,28	0,45
2	Терекли-Мектеб	114	1,6	0,40	0,6
3	Кочубей	20	1,6	0,40	0,25
4	Южносухокумск	103	1,5	0,38	0,7
5	Кизляр	60	1,5	0,38	0,15

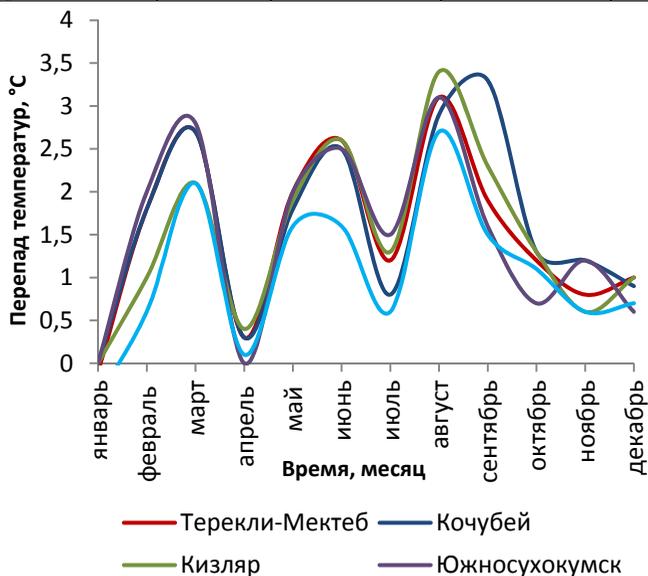


Рис. 1. Рост среднемесячных температур воздуха в населённых пунктах Северного Дагестана за 40-летний период

Рассмотрим, как влияет рост температуры в самой жаркой точке Северного Дагестана – Терекли-Мектебе – на суммарное годовое количество осадков. На рисунке 2 прослеживается обратная корреляция среднегодовых температур воздуха и суммарных годовых осадков за сорокалетний период. Линейные тренды суммарных годовых осадков за последнее десятилетие показывают снижение количества осадков более чем на 100 мм (17 мм/°С), т. е. в районе с минимальным количеством осадков наблюдается тенденция к ещё большему их уменьшению.

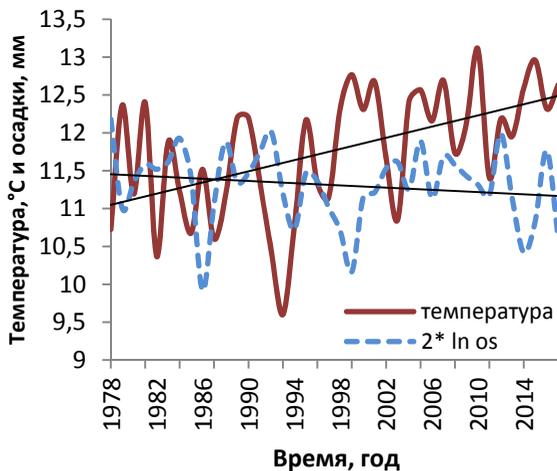


Рис. 2. Линейные тренды среднегодовых температур воздуха и суммарных годовых осадков в Терекли-Мектебе за сорокалетний период

На востоке Северо-Дагестанской равнины, ближе к побережью Каспия, в Кочубее (табл. 1), рост среднегодовой температуры сопровождается незначительным повышением количества осадков, порядка 20 мм. В работе [2] линейные тренды температур и количества осадков за период с 1977 по 2007 г. показывали обратную корреляцию этих параметров и уменьшению осадков на 23 мм; за последние 10 лет количество среднегодовых осадков восстановилось до прежнего уровня – 290 мм/год. Картина распределения изменения температуры за сорокалетний период по месяцам для Кочубея в целом сходна с подобным распределением для Терекли-Мектеба: максимальные приросты приходятся на август (3,0 °С), март (2,7 °С) и июнь (2,4 °С) месяцы (рис. 1).

Темпы роста среднегодовых температур воздуха в Кизляре, расположенном на границе двух областей, за последние 10 лет, одни из самых низких (табл. 1), однако, распределение температур по месяцам показывает, что значительную часть общего прироста составляют температуры августа – 3,2 °С, июня – 2,7 °С, а также марта и сентября – по 2,1 °С (рис. 1). На рис. 3.1 отображена корреляция среднегодовых температур воздуха и суммарных годовых осадков за сорокалетний период:

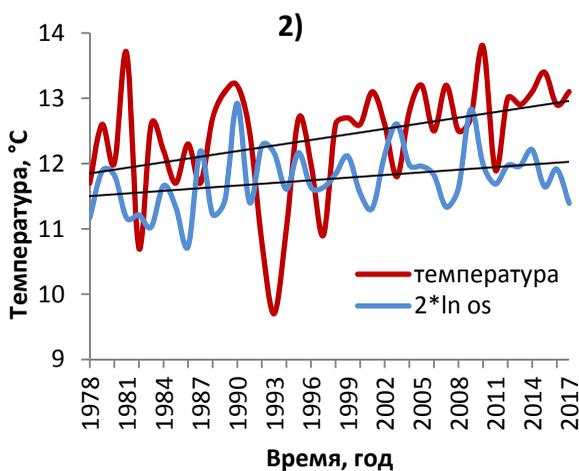
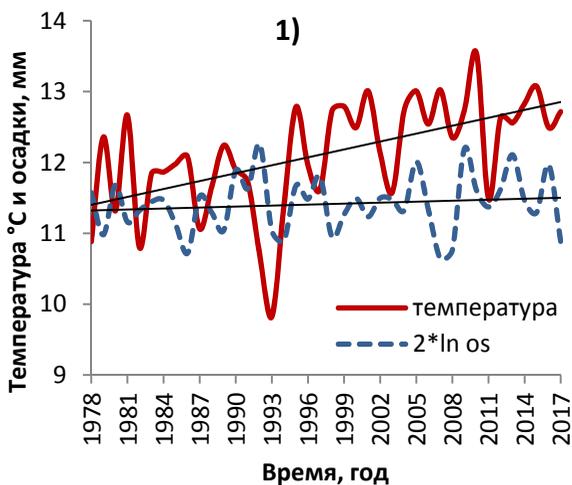


Рис. 3. Линейные тренды среднегодовых температур воздуха и суммарных годовых осадков за сорокалетний период: 1) Кизляр; 2) Махачкала

Анализ соответствующих линейных трендов для населённых пунктов Терско-Сулакская низменности, в частности, для Махачкалы, находящейся на берегу моря, устанавливает прямо пропорциональную зависимость между увеличением температуры и осадков (рис. 3.2). При среднем росте температуры за сорокалетний период в 1,1 °С, рост температур в августе и марте соответственно 2,6 °С и 2,1 °С, увеличе-

ние суммарного годового количества осадков при этом составило 96 мм (табл. 2).

Таблица 2

Изменение суммарных годовых температур воздуха и количества осадков

Населённый пункт	Рост суммарный годовых температур воздуха за 40 лет, °С	Изменение суммарного годового количества осадков за 40 лет, мм
Терекли-Мектеб	16	-44
Кочубей	19,6	20
Кизляр	18	33
Махачкала	12,5	96

Для областей Терско-Сулакской междуречья с высокими гипсометрическими отметками также прослеживается прямая корреляция между ростом среднегодовых температур воздуха и суммарными годовыми осадками. Так, в Хасавюрте, при среднем росте среднегодовой температуры воздуха на 1,4 °С, суммарное годовое количество осадков увеличилось на 90 мм. Как и для прибрежных территорий, рост температур в предгорных районах, который ниже средних значений по Северному Дагестану, сопровождается существенным увеличением (на 100 мм) количества среднегодовых осадков, однако картина распределения максимальных изменений температуры по месяцам отличается от подобных распределений для низменных районов: максимальные приросты наблюдаются в августе, сентябре (3,1 °С) и январе месяце (2,9 °С).

Заключение

Представленные оценки линейных трендов среднегодовых температур и суммарных годовых осадков для северных районов Дагестана позволяют сделать выводы относительно степени воздействия современных климатических изменений на экосистему региона.

Наличие на территории Терско – Сулакского междуречья разветвлённой речной сети, большого количества каналов, естественных и искусственных водоёмов способствует росту количества осадков и значительному их увеличению (до 100 мм) в предгорных и прибрежных районах, что благоприятно сказывается на состоянии водных ресурсов и экологии региона в целом.

На территории Терско-Кумской низменности, расположенной в аридной зоне, повсеместный рост среднегодовых температур воздуха и снижение суммарных годовых осадков (более чем на 100 мм) за сорокалетний период является одним из факторов, приводящих к даль-

нейшей аридизации климата и опустыниванию засушливых земель Ногайского и Тарумовского районов.

Ситуация на западе Терско-Кумской области, где коэффициенты линейных трендов среднегодовых температур воздуха намного превышают не только средние значения по Северному Дагестану, но и средние по Северо-Кавказскому ФО, может свидетельствовать о том, что, помимо глобального потепления, существует ряд факторов антропогенного характера, влияние которых на экосистему региона соизмеримо с природными воздействиями [3].

Список литературы

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М. : Росгидромет. 2014. 58 с.
2. Щербуль З. З. Экологические последствия климатических изменений на территории Равнинного Дагестана // Возобновляемая энергетика: Проблемы и перспективы : V Междунар. конф. Секция 4: Энергетика и окружающая среда. Махачкала, 2017. Т. 2. С. 213–218.
3. Щербуль З. З. Гидродинамические аспекты проблемы опустынивания на примере Северо-Дагестанского артезианского бассейна // Вестн. ДНЦ РАН. 2008. № 31. С. 16–19.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

УДК 551.52

Измерения пространственной изменчивости температуры над неоднородным ландшафтом с помощью квадрокоптера

А. Ю. Артамонов (sailer@ifaran.ru)¹, М. И. Варенцов^{1,2}
А. Д. Пашкин^{1,2}, И. А. Репина^{1,2}

¹ *Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, г. Москва*

² *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва*

Аннотация. Приведены результаты экспериментов по изучению термических характеристик атмосферы над различной неоднородной поверхностью.

Ключевые слова: квадрокоптер, БПЛА, неоднородный ландшафт, метеорологические параметры.

Развитие БПЛА (беспилотных летательных аппаратов) открывает широкие перспективы для их использования для изучения вертикальной и горизонтальной изменчивости метеорологических параметров в атмосферном пограничном слое (АПС), в том числе в условиях неоднородного ландшафта (над границей суша-вода, лед-вода, лес-поле, город-пригород и т. д.). БПЛА разных типов являются многообещающим инструментом для исследований вертикального или горизонтального распределения температуры, влажности, ветра, характеристик турбулентности и т. д. Мультикоптеры способны делать строго вертикальные разрезы и совершать полеты на малой скорости, что способствует уменьшению инерции датчиков. Благодаря перечисленным особенностям, применение мультикоптеров особенно перспективно для измерений вблизи поверхности.

В работе рассмотрен опыт проведения подобных измерений с использованием квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro, оборудованного блоком датчиков iMet-XF. Высота полета квадрокоптера такой модели составляет 500 м, дальность полета – 1–2 км, время непрерывного по-

лета на одном аккумуляторе – 20–25 мин. Квадрокоптер оснащен набором датчиков iMet-XF (табл. 1) производства International Met Systems (<http://www.intermetsystems.com>). Подробная схема размещения датчиков, а также методические исследования приводились подробно в работах нашего коллектива [1; 2; 5]. Схема включает в себя центральную плату со встроенным датчиком давления и несколькими внешними датчиками, в том числе датчиком температуры и влажности воздуха EE03, термистор NTC (Negative Temperature Coefficient), инфракрасный датчик радиояркостной температуры поверхности и приемник GPS (табл. 1). Система может быть дополнена и другими совместимыми датчиками. Одновременно проводились измерения и с автономным датчиком iMet-XQ2 UAV Sensor.

Таблица

Список и характеристики датчиков, используемых в рамках системы iMet-XF

Название и тип датчика	Производитель	Диапазон измерений	Точность	Время отклика
Датчик давления, встроенный в центральную плату iMet-XF	International Met Systems	10–1200 гПа	±0,24 гПа	8 мс
Датчик температуры воздуха (термистор NTC Shibauro PSB-S5)		-95–50 °C	±0,3 °C	1 с
Температура воздуха (T) и влажность (RH) с полимерным сенсором HC103 модуль EE03	E+E Electronik	-40–80 °C (T) 0–95 % (RH)	±0,3 °C (T), ±3 % (RH) при 20°C	1 с
Инфракрасный термометр (IR)	Melexis	-50–125 °C	±0,3 °C	1 с
GPS приемник (CAM-M8Q)	UBlox	-	-	-

В данной работе приведены примеры двух измерительных компаний.

Беломорская кампания. Измерительная система на базе квадрокоптера использовалась в рамках полевой экспериментальной кампании, проходившей на территории Беломорской биологической станции (ББС МГУ) на побережье Белого моря (66,554 ° с. ш., 33,104 ° в. д.) в феврале 2018 г. Кампания была направлена на исследование атмосферной турбулентности в неоднородном ландшафте, как и предыдущая аналогичная кампания [3; 4]. Во время кампании наблюдались различные погодные условия, в том числе ясная и безветренная погода с интенсивными приземными температурными инверсиями. Большая часть полетов выполнялась, когда солнце было ниже горизонта, или же в облачных условиях, поэтому датчики не подвергались воздействию прямого солнечного нагрева. Серия горизонтальных разрезов

была выполнена на разных высотах незамерзающей полыньей в проливе Большая Салма (рис. 1, *a*), формирование которой обусловлено локальными течениями. Целью таких полетов было исследование влияния полыньи на температуру и влажность. Край полыньи был удален на 300 м от пирса ББС, ее ширина составляла примерно 500 м.

В нашем исследовании рассмотрен опыт использования квадрокоптера для исследования колебаний температуры и влажности внутри КПС, который формируется над незамерзающей полыньей в проливе Большая Салма. Его формирование часто сопровождается развитием низкоуровневых облаков над полыньей. В ходе кампании на ББС было выполнено 6 полетов над полыньей. К сожалению, во время этих полетов развитие облаков не наблюдалось. Каждый полет включал горизонтальные разрезы на высотах 5, 10–20 и 40–50 м. Маршрут и высота полета контролировалась вручную, поэтому траектории полетов несколько различаются. В дальнейшем анализе рассматриваются проекции траекторий полета на линию, идущую от пирса ББС через пролив (рис. 1, *a*).

Предварительные результаты эксперимента по изучению КПС над полыньей показаны на примере двух случаев с более сильной (рис. 1, *б*) и более слабой (рис. 1, *в*) температурной инверсией. Данные измерений радио яркостной температуры поверхности позволяют определить края полыньи (диаграммы 1б, в верхние панели). Температура открытой воды (≈ -3 °С) немного ниже точки замерзания ($-1,8$ °С), что может быть объяснено наличием тонких ледяных пятен на воде. Температура поверхности значительно ниже для льда (≈ -10 °С) и заснеженной суши (до -15 °С). Неопределенность положения краев полыньи (± 25 м) обусловлена различиями между траекториями полета квадрокоптера на разных высотах и различным наклоном квадрокоптера.

Все выполненные приповерхностные разрезы (на высотах порядка 5 м) указывают на повышение температуры воздуха до 2 °С над полыньей. В двух рассмотренных случаях сплошная область повышения температуры наблюдается в средней части полыньи, ближе к ее южному краю. Однако в других точках над полыньей наблюдается несколько обособленных областей повышения температуры, что свидетельствует о существовании различных режимов конвекции. Области повышения температуры совпадают с областями повышения влажности (рис. 1, *в*, нижние панели). Горизонтальные разрезы выше 20 м показывают преимущественно однородное распределение температуры без каких-либо заметных возмущений над полыньей. То же самое касается влажности, за исключением одного случая, показанно-

го на рис. 1, б. Для этого случая с сильной инверсией температуры увеличение влажности над полярной прослеживается даже на высоте 40 м.

Полученные результаты позволяют предположить, что, несмотря на отсутствие облаков, над полярной развивается тонкий конвективный пограничный слой. Его высота может быть очень грубо оценена в 20–40 м, что согласуется с толщиной облачного слоя облаков, формирующегося над полярной в благоприятных условиях.

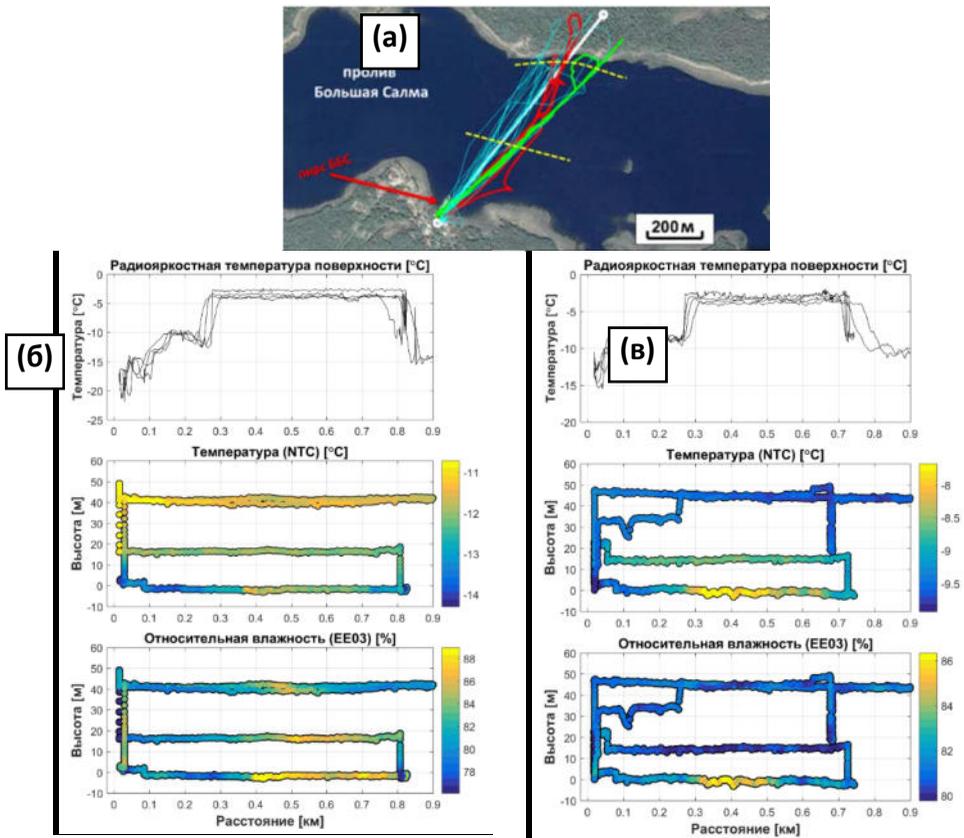


Рис. 1. Траектории всех полетов над полярной, которые выполнялись на БС (а), где траектории двух рассмотренных полетов (б, в), показаны зеленым и красным цветом соответственно. Желтые пунктирные линии указывают на приблизительное положение краев полярной. Для двух рассматриваемых полетов распределение радиояростной температуры поверхности, температуры воздуха и относительной влажности отображено вдоль проекции на отрезок, показанный белой линией на схеме (а). Ноль на оси абсцисс – точка взлета вблизи пирса

Горизонтальные разрезы над незамерзающей полыньей показали возможность проведения контактных измерений труднодоступными областями и позволили изучить влияние полыньи на температуру и влажность. Такой опыт открывает широкие возможности для новых экспериментальных кампаний, которые могли бы улучшить общее понимание атмосферных процессов над неоднородными ландшафтами, такими как лесные озера [4], полыньи и урбанизированные территории, включая мегаполисы и арктические города, где недавно были обнаружены характерные городские острова тепла, ярко выраженные в зимних условиях.

Кампания на Горьковском водохранилище. Для изучения горизонтальной неоднородности температуры и влажности над крупным водным объектом в течение 8 июня 2018 г. был выполнен ряд горизонтальных разрезов в нескольких районах прибрежной зоны Горьковского водохранилища. Ниже рассматриваются, как наиболее показательные, следующие разрезы: разрез через устьевую зону реки Юг ($\approx 14:20$, рис. 2, *а*), разрез через устьевую зону реки Троча ($\approx 15:50$, рис. 2, *б*), разрез в прибрежной зоне водохранилища в районе г. Чкаловск ($\approx 17:20$, рис. 2, *в*) и разрез в районе яхт-клуба «Белая речка» вблизи плотины Горьковской ГЭС ($\approx 21:20$, рис. 2, *г*). В каждой из точек вначале выполнялся разрез вблизи поверхности (высота полета составляла порядка 5 м), затем разрез по схожей траектории на высоте порядка 40 м над поверхностью.

Результаты измерений на Горьковском водохранилище позволили диагностировать характерные различия температуры и влажности воздуха над водой и сушей. В дневных условиях воздух над сушей ожидается более теплый, а вечером имеет место обратная ситуация. Влажность воздуха вблизи поверхности ожидается выше над водой. Такие результаты тривиальны, однако их получение подтверждает корректность метода измерений. Среди менее тривиальных результатов можно отметить следующее. Во-первых, различия температуры и влажности отмечаются не только у поверхности, но и на высоте порядка 30–50 м. Это наглядно показано как для дневных условий неустойчивой стратификации, так и для вечерних условий с устойчивой стратификацией. Во-вторых, различия достаточно малы и не превышают 1°C . Исключение составляет только Рисунок 3, *а*, где, вероятно, в первые секунды полета имел место эффект от перегрева датчика от нагретой почвы. При этом изменчивость радиояркостной температуры подстилающей поверхности разительно отличается и составляет порядка 10°C . Днем отдельные участки суши прогреваются до 25°C .

Температура водной поверхности для всех разрезов составляла порядка $13\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом ее пространственная изменчивость не выходит за рамки разброса значений между повторными измерениями в одних и тех же точках.

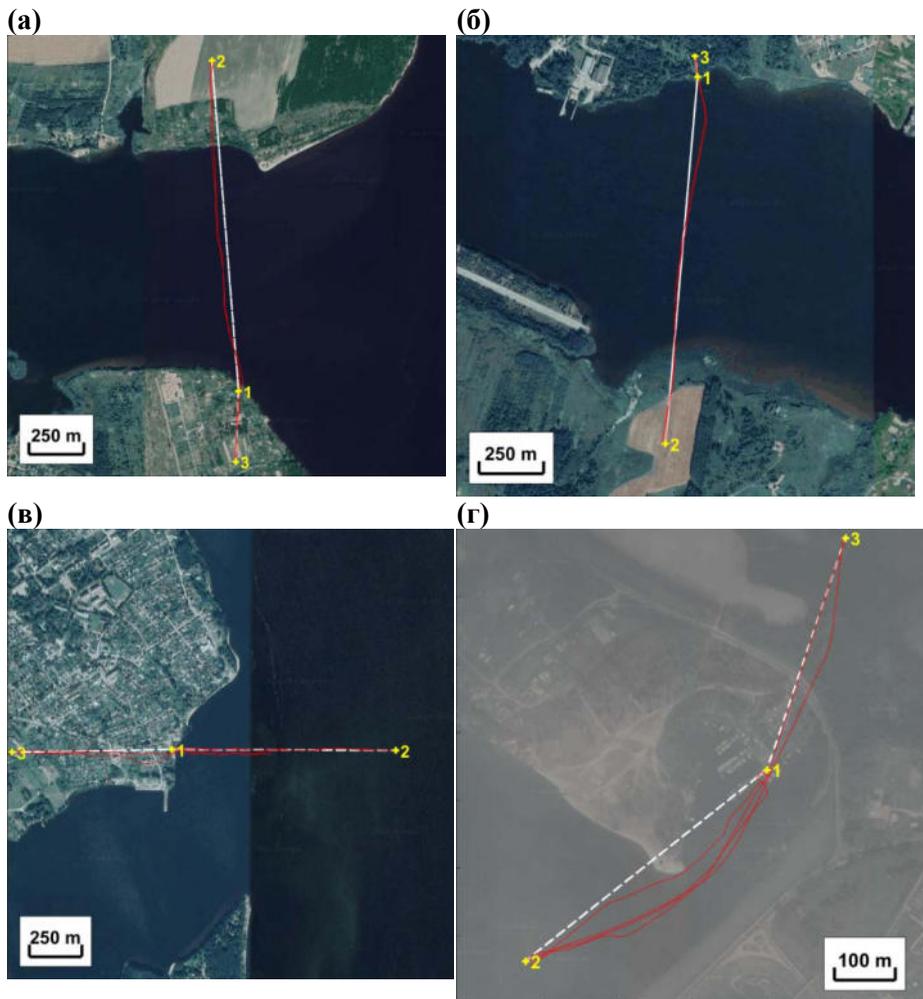


Рис. 2. Схемы выполнения горизонтальных разрезов с использованием квадрокоптера. Красным цветом показана траектория полета. Белая пунктирная линия показывает прямые, вдоль которых отсчитывается расстояние на рис. 3 (точка 1 соответствует нулевой отметке, точка 2 – максимальной положительной отметке, точка 3 – максимальной отрицательной отметке)

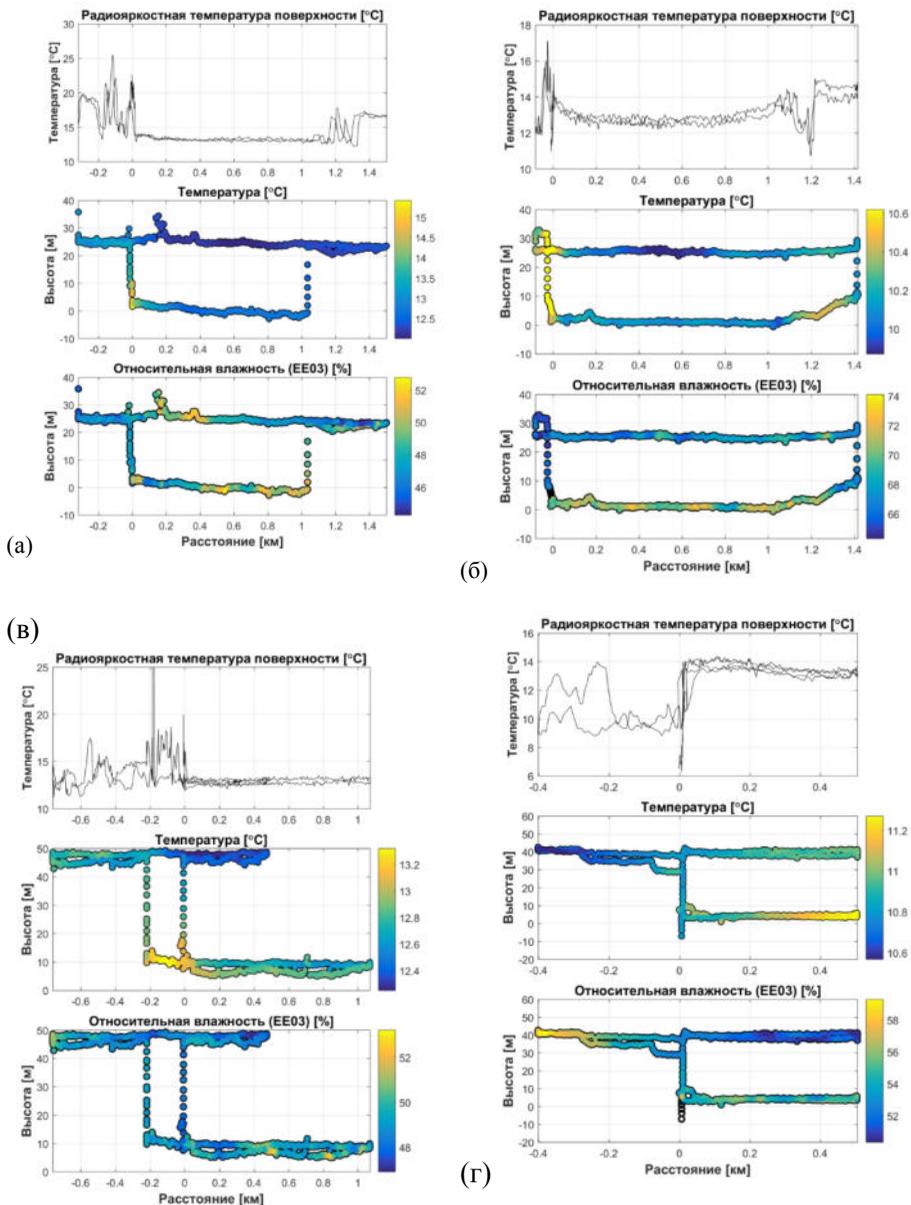


Рис. 3. Изменчивость радиояростной температуры поверхности, температуры воздуха и относительной влажности для горизонтальных разрезов (рис. 2, а–г) вдоль проекции на отрезки (белые пунктирные линии на рис. 2). Ноль на оси абсцисс – точка взлета, обозначена как № 1 на рис. 2

Выводы

Проведенные исследования показали, что квадрокоптер, оборудованный метеорологическими датчиками, является эффективным и многообещающим инструментом для исследования пограничного слоя атмосферы над неоднородными ландшафтами.

Горизонтальные разрезы над незамерзающей полыньей показали возможность проведения контактных измерений труднодоступными областями и позволили изучить влияние полыньи на температуру и влажность. Показано, что влияние полыньи на температуру воздуха распространяется на лишь первые десятки метров от поверхности. Для более крупного объекта – Горьковского водохранилища – показано, что его влияние на температуру и влажность воздуха прослеживается как минимум до высоты в 40–50 м, как в условиях устойчивой (ночной), так и неустойчивой (дневной) стратификации. Однако различия между температурой над водохранилищем и берегом не превышают 1 °С, тогда как над полыньей наблюдались более интенсивные температурные контрасты до 2 °С.

Полученный опыт открывает широкие возможности для новых экспериментальных кампаний, которые могли бы улучшить общее понимание атмосферных процессов над неоднородными ландшафтами, такими как лесные озера, полыньи и урбанизированные территории.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 18-05-60126 и 17-05-41095.

Список литературы

1. Опыт использования квадрокоптера для метеорологических измерений в пограничном слое атмосферы / А. Ю. Артамонов, М. И. Варенцов, А. Д. Пашкин, И. А. Репина // Турбулентность, динамика атмосферы и климата : тез. докл. Междунар. конф., посвящ. столетию со дня рождения акад. А. М. Обухова (г. Москва, 16–18 мая 2018 г.). М. : Физматкнига, 2018. С. 60.
2. Исследование динамики пограничного слоя атмосферы с использованием летательных аппаратов / М. И. Варенцов, А. Ю. Артамонов, А. Д. Пашкин, И. А. Репина // Турбулентность, динамика атмосферы и климата : сб. тр. М. : Физматкнига, 2018. С. 202–212.
3. Исследование структуры атмосферной турбулентности над неоднородным ландшафтом / В. М. Степаненко, И. А. Репина, К. В. Барсков, А. Ю. Артамонов, В. Ю. Богомолов, М. И. Варенцов, А. В. Гавриков, А. Д. Пашкин // Турбулентность, динамика атмосферы и климата : сб. тр. М. : Физматкнига, 2018. С. 81–93.
4. Barсков K. V., Chernyshev R. V., Stepanenko V. M., Repina I. A., Artamonov A. Y., Guseva S. P., Gavrikov A. V. Experimental study of heat and momentum exchange between a forest lake and the atmosphere in winter IOP Conf. Ser. Earth Environ. 2017 Sci. 96 012003
5. Varentsov M. I., Artamonov A. Y., Pashkin A. D., Repina I. A. Experience in the quadcopter-based meteorological observations in the atmospheric boundary layer. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 231, 2019, 012053.

УДК 551.501.7

Единство аэрологических измерений

А. М. Балагуров (a.balagurov@mail.ru)

Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, г. Долгопрудный

Аннотация. При обеспечении единства аэрологических измерений необходимо учитывать, что радиозонд является средством измерения разового действия и в лабораторных условиях невозможно воспроизвести весь комплекс величин, влияющих на результаты измерений, отсутствуют эталонные средства измерения с необходимыми диапазонами, динамикой и возможностью учета влияющих факторов. В работе приведены сведения о состоянии метрологического обеспечения аэрологических измерений, методах исследований, необходимости повышения точности данных сети радиозондирования Росгидромета.

Ключевые слова: радиозонд, метрологическое обеспечение, точность, эталонные средства.

1. Специфика метрологического обеспечения аэрологических измерений

Радиозонды являются основным средством получения информации о состоянии тропосферы и нижней стратосферы. Информация, получаемая с сети радиозондирования, является основой для анализа и прогноза погоды, метеообеспечения авиации и вооруженных сил, других форм оперативного обслуживания населения и народного хозяйства. Данные радиозондирования поступают в государственный фонд и международный обмен данными о состоянии природной среды. Надежность и точность этих данных определяет качество прогнозов погоды, и это является для деятельности гидрометслужбы стратегическим фактором, позволяет снизить риски угрозы жизни населения, ущерба экономике страны от опасных гидрометеорологических явлений.

При обеспечении единства аэрологических измерений необходимо учитывать, что радиозонд является средством измерения разового действия и в лабораторных условиях невозможно воспроизвести весь комплекс величин, влияющих на результаты измерений, отсутствуют эталонные средства измерения, имеющие необходимые диапазоны измерений, динамику и учет влияющих факторов.

Ряд проблем метрологического обеспечения радиозондирования решены на достаточном для практического применения уровне [1]. Обсуждены результаты метрологических исследований системы радиозондирования, модели процессов измерения температуры и влажности при радиозондировании, определены вероятностные оценки

точности измерений, рассмотрены специальные средства измерений (СИ) для определения и контроля МХ радиозондов. При исследовании достоверности радиозондовых измерений проводились уникальные натурные эксперименты.

Радиозонды проходят испытания с целью утверждения типа СИ и при серийном производстве проводится их поверка в аккредитованных Росстандартом органах. Метрологическое обеспечение аэрологических измерений в соответствии с нормативными документами Росгидромета обеспечивает ФГБУ «ЦАО» – базовая организация Росгидромета в области метрологии и стандартизации. С момента своего основания ЦАО обеспечивала работы по разработке методик и средств измерений, нормативных документов, контролю и надзору, обязательной сертификации, государственному регулированию обеспечения единства измерений при проведении аэрологических измерений. Ни одна структура Росстандарта не может выполнять эти работы в силу специфики диапазонов измерений температуры, влажности и давления, отсутствия возможности применения эталонов в реальных условиях измерений, наличия влияющих факторов, переводящих эти измерения в разряд косвенных, одноразового применения средств измерений, особенности функционирования Государственной наблюдательной сети (распределенность по территории, труднодоступность и т. п.). Качество получаемых данных зондирования атмосферы определяется не только основными погрешностями измерений (записанными в свидетельствах на тип СИ, выдаваемых Росстандартом), но и сопоставимыми, а то и превосходящими их по величине, дополнительными погрешностями от влияния солнечной радиации, температуры, давления, осадков, обдува и т. п.

Эти особые условия, а также изначально (с момента основания гидрометслужбы) высокие требования к метрологии гидрометеорологических наблюдений, которые определены необходимостью своевременного обеспечения достоверными данными, получения надежной информации о состоянии окружающей среды, высокой оправдаваемости прогнозов, снижения рисков ущерба экономике, здоровью граждан, обороне и безопасности государства, обуславливают необходимость возложения на Росгидромет, в пределах его компетенции, прав и обязанностей по контролю и надзору, обязательному подтверждению соответствия, обязательной сертификации, государственного регулирования обеспечения единства измерений при осуществлении деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях.

2. Метрология измерений температуры при радиозондировании

Результаты международных сравнений радиозондов в Китае в 2010 г. (российские радиозонды не принимали участия в сравнениях) показали, что датчики температуры всех радиозондов, участвовавших в сравнениях, по техническому уровню превосходят датчики температуры отечественных радиозондов [3]. Антирадиационная эмаль ВЛ-548, для которой были определены радиационные поправки, снята с производства. Датчики такого типа уже не используются в мировой практике, все основные типы радиозондов перешли на миниатюрные, «бусинковые» или тонкопроволочные датчики температуры с алюминизированным покрытием, которое имеет значительное преимущество перед белым антирадиационным покрытием. С заметным повышением в последние годы высот зондирования на аэрологической сети РФ проблема радиационных погрешностей вновь приобрела особую актуальность. Максимальная радиационная поправка зарубежных радиозондов не превышает $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время, как для основного датчика температуры отечественных радиозондов – ММТ-1, максимальная поправка согласно действующей схеме обработки данных достигает $15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, и то – при условии применения эмали ВЛ-548. При этом необходимо отметить, что эти поправки применяются и для других датчиков температуры российских радиозондов, без проведения соответствующих исследований.

За полноту (т. е. исчерпывающую спецификацию всех параметров, обеспечивающих точность) и соответствие спецификациям (т. е. гарантирование необходимого уровня точности в заданных условиях) метрологических характеристик изготавливаемого измерительного средства отвечает производитель. Тем не менее, учитывая специфику радиозондирования, ЦАО, как базовая организация метрологической службы Росгидромета вынуждена проводить соответствующие исследования и испытания, позволяющие определить метрологические характеристики радиозондов для обеспечения единства аэрологических наблюдений.

В реальных условиях применения радиозондов, как средства измерения, точность измерений зависит от высоты, даже если рассматривать измерения *in situ*, т. е. измерения собственно температуры и влажности без вертикальной привязки, однако, в основном, эта зависимость определяется условиями измерений. В частности, ниже рассмотрены два примера, которые показывают взаимосвязь между метрологическими характеристиками радиозондов и точностью измерений.

Так, например, одним из факторов, определяющих неопределенность измерений температуры при радиозондировании, является остаточная радиационная погрешность, т. е. разность между действительной и средней для всех условий применения радиационной погрешности (она же с обратным знаком – радиационная поправка). Для зарубежных радиозондов, характеризующихся высокой стабильностью производства датчиков температуры и воспроизводимостью их характеристик (геометрических, радиационных и т. д.), вариации остаточной радиационной погрешности на некотором уровне подъема радиозонда будут определяться в первую очередь разностью термодинамической и радиационной температуры (т. е. потоками радиации, определяемыми высотой подъема Солнца, температурой и альбедо подстилающей поверхности и т. п.) и температурой атмосферы на этом уровне, а также вариациями скорости подъема радиозонда. Таким образом, если на одну и ту же оболочку подвесить несколько таких радиозондов (как это делается в международных сравнениях), то на их расхождения рассматриваемая неопределенность не будет оказывать практически никакого влияния.

Аналогичные заключения можно сделать и для динамической погрешности, так как она определяется в основном двумя факторами – вертикальной стратификацией температуры (в частности, на участках подъема, на которых вертикальный градиент равен нулю, соответственно, нулю будет равна и динамическая погрешность) и скоростью подъема радиозонда.

При анализе погрешности данных радиозондирования необходимо учитывать следующую дополнительную информацию:

1) величина вариации остаточной радиационной погрешности составляет около 30 % процентов от величины собственно радиационной погрешности, которая для лучших зарубежных радиозондов не превышает $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для российских радиозондов эта величина может достигать $2\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$);

2) постоянная времени датчика температуры в первом приближении изменяется обратно пропорционально корню квадратному из отношения давлений на опорном и заданном уровне, т. е. на уровне, например, 10 гПа она будет в 10 раз больше, чем на уровне 1000 гПа;

3) постоянная времени датчика влажности увеличивается экспоненциально при снижении температуры и, например, при температуре минус $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ может достигать для российских радиозондов значений более 10 минут.

Погрешность данных, доходящих до конечного потребителя, определяется точностью их вертикальной привязки, которая не зависит от данных, измеряемых радиозондом, а полностью определяется точностью измерения вертикальных координат радиозонда наземной станцией. По технической документации производителей радиолокационных станций (которые установлены на более, чем 90 % аэрологической сети Росгидромета) это 30 и 45 м для систематической и с.к.о. случайной составляющих погрешности измерения. Однако и в этом случае инструментальная точность не определяет однозначно искомую точность вертикальной привязки, так как последняя зависит от траектории полета радиозонда (т. е. опять же от условий выполнения измерений). При больших углах места точность определения высоты будет определяться точностью измерения дальности, в то время как на больших удалениях погрешность из-за неточного определения вертикального угла будет определяющей.

Выше шла речь о точности вертикальной привязки данных зондирования к геометрической или однозначно (для данной широты) с ней связанной геопотенциальной высоте, которая определяется точностью измерения высоты в тот же момент времени, в который произведено измерение температуры. Точность вертикальной привязки и, соответственно, вклад инструментальной (т. е. зависящей от типа применяемого радиозонда) погрешности температуры определяется точностью определения давления посредством интегрирования уравнения статики и обуславливается всей историей изменения погрешности температуры и высоты от момента выпуска до заданного уровня, а также и стратификацией температуры. Как пример, высокочастотные составляющие погрешностей будут частично фильтроваться при интегрировании, в то время как низкочастотные – накапливаться. Аналогичная ситуация и с геопотенциалом на заданных изобарических уровнях – он определяется неявным методом из рассчитанного описанным выше способом распределения давления в зависимости от высоты.

Таким образом, для расчетного определения искомых погрешностей, или сравнительного сопоставления погрешностей, обеспечиваемых при использовании разных радиозондов, необходимо изучение прежде всего корреляционной структуры погрешностей радиолокационного измерения вертикальных координат зонда, так как погрешности измерения температуры на соседних уровнях сильно коррелированы. К сожалению, исследования такого класса достаточно сложны и их проведение для определения погрешности измерений конкретного типа радиозонда требует значительных затрат времени и средств.

3. Метрология измерений влажности при радиозондировании

Обеспечение единства измерений влажности при радиозондировании наиболее сложно, так как сейчас отсутствуют эталонные средства измерения, имеющие необходимые диапазоны измерений, динамику и учет влияющих факторов. Сравнительные выпуски радиозондов с радиозондами повышенной точности в последние годы оставались единственным способом оценки достоверности измерений влажности при радиозондировании

В соответствии с российским законодательством в области метрологии все радиозонды, применяемые на сети гидрометслужбы, должны пройти испытания на утверждение типа СИ в рамках утвержденной в России Государственной поверочной схемы для СИ влажности газов (ГПССИВГ). Кроме того, при разработке чувствительных элементов и конструкции датчиков влажности для применения в радиозондировании необходимо получить результаты их конкретных метрологических характеристик. Для датчиков влажности радиозондов имеют место следующие основные оцениваемые метрологические характеристики (МХ):

- a) статическая (как правило – индивидуальная) характеристика преобразования;
- b) погрешность измерений;
- c) постоянная времени;
- d) функции влияния на перечисленные метрологические характеристики.

Первые два пункта МХ для нормальных условий могут быть определены в рамках поверочной схемы ГПССИВГ. Для определения МХ по п. c и d отсутствуют аттестованные СИ. Одной из самых трудных проблем испытаний датчиков влажности радиозондов является отсутствие малогабаритного и точного образцового гигрометра, который мог бы определить значения истинной влажности в испытательной установке, где также установлен испытуемый радиозонд, или непосредственно при подъеме в атмосферу вместе с радиозондом. Кроме того, для полного воспроизведения в лаборатории всех влияющих факторов, которые имеют место при подъеме радиозонда, необходимо соответствующее эталонное оборудование.

Международные сравнения радиозондов (2010 г.) подтвердили, что датчики влажности зарубежных радиозондов по своей точности существенно превосходят датчики российских радиозондов. Кроме того, в отечественных радиозондах допускаются нарушения важней-

шего положения «Руководства по приборам и методам наблюдений» ВМО [4] о необходимости размещения датчика влажности в невозмущенном потоке. В результате искажаются показания датчика влажности, что влечет за собой не только нарушение однородности климатических рядов данных наблюдений, но и может приводить к ошибкам в прогнозах погоды, в особенности авиационных, в условиях сложной облачности. В 2012 г. ЦАО была вынуждена отозвать выданное в 2010 г. положительное заключение по результатам испытаний одного из радиозондов, поставленных для использования на государственной наблюдательной сети, поскольку их применение не обеспечивало единства измерений на аэрологической сети.

В последние годы на российской сети появились радиозонды с датчиками влажности (ДВ), изготовленными на основе емкостных чувствительных элементов зарубежного производства, которые разработаны не для применения в радиозондировании, имеют ограниченный диапазон измерений и большую постоянную времени. Радиозонды с этими ДВ не прошли обычных в таких случаях сравнительных испытаний, согласований, зачастую не получали разрешения на использование при оперативном зондировании. Данные радиозондирования, получаемые с их использованием, в некоторых случаях просто недостоверны. Использование таких ДВ является существенным тормозом для повышения качества данных радиозондирования на аэрологической сети Российской Федерации. Из-за высокой динамической погрешности, особенно при прохождении радиозондом облачных слоев, суммарная погрешность достигает 30–40 % относительной влажности, в то время, как рекомендованная ВМО величина предельной погрешности для радиозондовых измерений влажности составляет 15 % относительной влажности во всем температурном диапазоне измерений ниже тропопаузы. При этом для станций ГРУАН (реперной сети образцового зондирования) предельная погрешность измерения влажности не должна превышать 5 %. В соответствии со свидетельствами на тип средств измерений (СИ) радиозондов, оформленными Росстандартом, погрешность радиозондов по влажности не превышает 15 %, однако, фактически записанные в свидетельствах значения не отражают реальных метрологических характеристик измерений влажности при радиозондировании. При этом главными причинами являются отсутствие эталонных приборов и оборудования, позволяющих проводить испытания в рабочих условиях радиозондирования, и проведение испытаний радиозондов на тип СИ без участия специалистов в области радиозондирования (в частности – головной организации по

радиозондированию атмосферы – Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета).

Анализ результатов Восьмых международных сравнений систем радиозондирования ВМО в Китае в 2010 г. [3] показывает, что наивысшие оценки из сетевых радиозондов получили радиозонды RS92 (Vaisala), а также радиозонды LMS6 (Lockheed Martin Sippican). Для предотвращения влияния осадков у всех радиозондов, кроме RS92, ДВ прикрыты колпачками, при этом обеспечиваются измерения температуры ДВ для исключения ошибки, вызванной отличием температуры датчика влажности от температуры окружающей среды. В радиозонде RS92 используются два поочередно подогреваемых чувствительных элемента (ЧЭ).

Проблемы, связанные с искажением показаний датчиков во время полета и очень большими величинами постоянной времени (инерции) датчиков при низкой температуре и низком давлении, на сегодняшний день ограничивают практическую пригодность качественных радиозондовых измерений относительной влажности тропосферой [4].

В соответствии с приказом Минприроды № 436 от 19 октября 2015 г. «Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений и выполняемых при осуществлении деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях, и обязательных требований к ним, в том числе показателей точности измерений» для радиозондирования установлены обязательные метрологические требования к измерениям температуры и влажности (п. 21, 22 табл. 1).

Таблица 1

Обязательные метрологические требования к измерениям температуры и влажности для радиозондирования

N	Измерения	Обязательные метрологические требования к измерениям	
		Диапазон измерений	Предельно допустимая погрешность
Основные измерения при осуществлении деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях			
21	Измерение температуры воздуха при аэрологическом зондировании атмосферы, °С	от минус 90 до 50 °С	от поверхности Земли до уровня 100 гПа: $\Delta = \pm 1,25$ °С на уровнях выше 100 гПа: $\Delta = \pm 2,5$ °С
22	Измерение относительной влажности воздуха при аэрологическом зондировании атмосферы, %	от 0 до 98 %	от поверхности Земли до уровня тропопаузы: $\Delta = \pm 15$ %

4 Методы исследования точности данных радиозондирования

В работе [1] приведены оценки суммарных погрешностей измерений влажности с использованием отечественных радиозондов вследствие влияния вышеперечисленных факторов. Суммарная погрешность измерений влажности резко возрастает на уровнях 300–200 гПа (соответствует высотам 5–8 км), достигая значений 30–40 %. Выше этого уровня температура становится менее минус 50 °С и датчики влажности отечественных радиозондов полностью теряют чувствительность к изменениям влажности.

В ходе большинства сравнений радиозондов результаты, полученные с радиозондов одной конструкции, сравниваются с результатами, полученными с радиозондов другой конструкции, с тем чтобы получить оценку их систематических расхождений. Погрешности радиозонда и случайные отклонения могут, как правило, быть оценены с помощью соответствующего метода расчета среднеквадратического отклонения расхождений между результатами измерений радиозондов двух разных типов.

На рисунке 1 приведен пример сравнительного выпуска современного российского радиозонда и зарубежного радиозонда повышенной точности. Видно, что после 1800 сек датчик влажности российского радиозонда существенно отстает от радиозонда повышенной точности. На 1880 сек разница составляет $54 - 16 = 38$ %. После 2200 сек датчик влажности российского радиозонда при температуре ниже минус 50 °С практически перестает реагировать на изменения влажности и отклонение показаний от радиозонда повышенной точности достигает 30 %. Аналогичная картина наблюдается практически во всех сравнительных выпусках. После прохождения капельных облаков при температурах минус 10–20 °С датчики отечественных радиозондов также прекращают реагировать на изменения влажности и их показания зачастую существенно превышают 100 % насыщения надо льдом.

В таблице 2 приведены оценки погрешности измерений влажности российских радиозондов и радиозондов повышенной точности при некоторых тенденциях изменений и сочетаниях атмосферных параметров.

Таким образом, несмотря на полученные свидетельства Росстандарта на утверждение типа СИ, в соответствии с которыми формально погрешность не превышает ± 15 %, современные российские радиозонды фактически не удовлетворяют законодательству в области метрологического обеспечения (МО) метеорологических измерений.

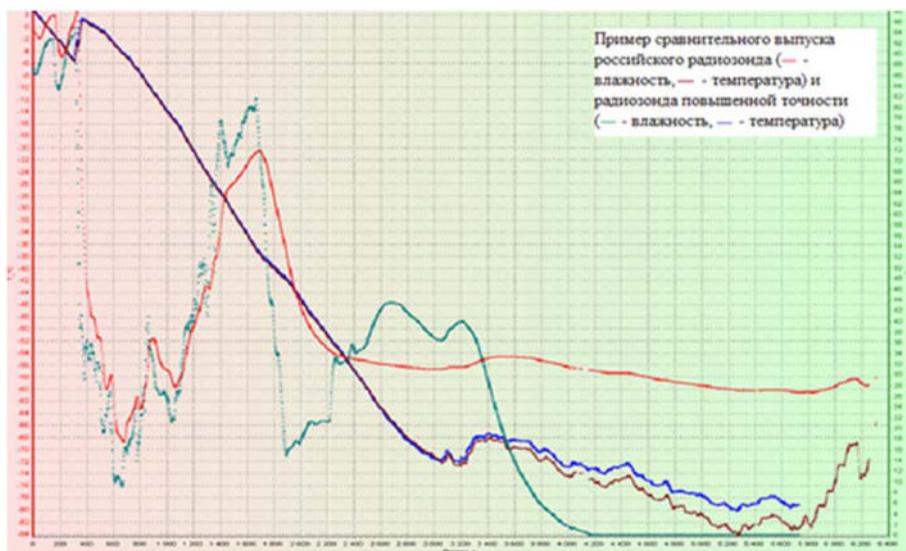


Рис. 1. Пример сравнительного выпуска радиозондов

Таблица 2

Оценки погрешности измерений влажности при радиозондировании

Наименование	Оценка погрешности при использовании обычных радиозондов	Оценка погрешности при использовании радиозондов повышенной точности
Относительная влажность воздуха в тропосфере ниже 20 % при температуре воздуха ниже минус 20 °С	10–40 %	2–5 %
Скорость изменения влажности превышает 20 % на 100 м подъема при температурах выше 0 °С	до 10 %	до 2 %
Скорость изменения влажности превышает 40 % на 200 м подъема при температурах ниже минус 20 °С	до 30 %	до 5 %
Наличие значительного слоя облачности с появлением обледенения датчиков радиозонда.	до 2 °С. до 40 %	до 0,5 °С до 5 %
Температура воздуха ниже минус 50 °С	влажность не измеряется	5–7 %

В 1980–1990-х гг. Россия была мировым лидером в области создания эталонных средств измерения для МО измерений влажности при радиозондировании атмосферы. В Центральной аэрологической обсерватории были созданы и успешно работали уникальные приборы

и установки, аттестованные Госстандартом России – образцовый гигрометр «ГОРОС» и универсальный генератор влажного воздуха «ДИПОЛЬ». Эти средства в совокупности позволяли в максимальной степени моделировать условия работы датчиков и не только определять с высокой точностью их основные погрешности, но и их динамические характеристики, а также функции влияния различных атмосферных факторов на их показания. В 1995–1997 гг. на основе этой уникальной лабораторной базы проводились Международные сравнения датчиков влажности радиозондов, организованные Росгидрометом под эгидой ВМО. В 2006 г. ВМО опубликовала итоговый Отчет об этих сравнениях [2].

В Руководстве № 8 по метеорологическим приборам и методам наблюдений [4] отмечено, что «существует несколько национальных структур, в которых можно проверить точность и надежность радиозондовых датчиков при различных давлениях и температурах в лабораторных условиях. Взаимное сравнение радиозондовых датчиков влажности (WMO, 2006b) позволило получить результаты лабораторных сравнений со стандартами влажности в Российской Федерации».

Для полного воспроизведения в лаборатории всех влияющих факторов, которые имеют место при подъеме радиозонда, необходимо соответствующее эталонное оборудование. Принцип работы универсального генератора влажного воздуха «ДИПОЛЬ» – совмещенный метод двух температур и двух давлений. Генератор содержит две камеры насыщения, в которых поток воздуха достигает насыщенного состояния по влажности при различных температурах и давлениях. В рабочей камере объемом около 10 л устанавливается специальная микрокамера (рабочий объем микрокамеры составляет около 25 см. куб.), необходимая при проведении исследований динамических характеристик датчиков влажности. При подаче управляющего сигнала в рабочий объем микрокамеры подается воздух из первой или второй камер насыщения со скоростью до 7 м/с. При этом время переходного процесса изменения относительной влажности (RH) в рабочем объеме микрокамеры не превышает 0,25 с, а температура и давление воздуха не изменяются. Каждая из камер насыщения, как и рабочая камера, установлены в отдельном термостате, что позволяет независимо изменять температуру в каждой отдельной камере в диапазоне от минус 70 °С до 30 °С. Давление в зависимости от заданного режима может выбираться в камерах насыщения в диапазоне от 1100 до 3500 гПа, а в рабочей камере от 10 до 1100 гПа. Поскольку микрокамера установлена в рабочей камере, то температура и давление потока воздуха в

ней соответствует тем же параметрам рабочей камеры. Генератор «ДИПОЛЬ» аттестован Российским государственным комитетом стандартов в 1983 г. Характеристики универсального генератора влажного воздуха «ДИПОЛЬ»:

- диапазон температур $-70...30\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- диапазон давлений $1100...10\text{ hPa}$ (гПа);
- скорость потока воздуха $0,5...7\text{ m/s}$ (м/с);
- диапазон относительной влажности
 $1...95\%$ (при положительных температурах),
 $5...95\%$ (при отрицательных температурах);
- скачок влажности в микрокамере
 15% относительной влажности за $0,25$ сек;
- максимальная погрешность
 1% относительной влажности ($0...30\text{ }^{\circ}\text{C}$);
 3% относительной влажности ($-20...0\text{ }^{\circ}\text{C}$);
 5% относительной влажности ($-70...-20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Принцип работы образцового гигрометра «ТОРОС» – метод точки росы, т. е. измерение температуры поверхности охлаждаемого зеркала при появлении на нем капель росы (инея). Датчики гигрометров – проточного типа, охлаждение зеркала производится полупроводниковыми термоохлаждильниками. Гигрометр «ТОРОС» имеет компактный датчик с малыми размерами зеркала и холодильника, что позволило использовать его при проведении испытаний в генераторе «ДИПОЛЬ». Гигрометр «ТОРОС» аттестован Российским государственным комитетом стандартов в 1984 г. Характеристики образцового конденсационного гигрометра «ТОРОС»:

- диапазон измерения точки росы (инея) $-80...29\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- диапазон рабочих температур $-70...30\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- диапазон рабочих давлений $1100...10\text{ hPa}$ (гПа);
- основная погрешность:
 - в области положительных значений точки росы $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$,
 - в области отрицательных значений точки инея $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- скорость охлаждения зеркала гигрометра не менее $15\text{ }^{\circ}\text{C/s}$;
- время установления показаний при скачкообразном изменении точки росы анализируемой среды при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ не более 2 с .

В настоящее время оба этих уникальных средства утрачены. Для повышения точности и обеспечения единства измерений влажности на сети радиозондирования Российской Федерации необходимо обеспечить восстановление подобных эталонных приборов, восстановить участие ЦАО в проведении испытаний радиозондов на тип СИ и роль

Росгидромета в допуске технических средств радиозондирования к применению на государственной сети.

5. Радиозонды повышенной точности, выводы и рекомендации

Как вариант решения задачи обеспечения единства измерений на российской сети радиозондирования можно рассматривать возобновление производства российских радиозондов повышенной точности, в которых использовать современные датчики фирмы Вайсала, признанные лучшими в мире на последних международных сравнениях радиозондов в Китае в 2010 г. Такой опыт уже имел место в конце 90-х – начале 2000-х гг., когда аналогичные радиозонды в течение 10 лет выпускались на 20 аэрологических станциях Росгидромета. По сравнению с обычными радиозондами инерция датчиков температуры была уменьшена в 50 раз, а датчиков влажности – в 40 раз. За счет этого, а также повышенной в 15 раз скорости опроса датчиков, вертикальное разрешение данных при радиозондировании было уменьшено со 100 м до 10 м.

Для достижения эффективного повышения точности данных сети радиозондирования Росгидромета целесообразно использовать методику комбинированного зондирования обычными радиозондами и зондами повышенной точности, при которой доля радиозондов повышенной точности составит около 15 % на обычных аэрологических станциях. Применение радиозондов повышенной точности имеет особенно важное значение для 12 российских аэрологических станций сети ГУАН, на которых требуются улучшенные климатические наблюдения, в особенности по влажности. На станциях ГУАН доля радиозондов повышенной точности должна составить около 40 %.

Применение радиозондов повышенного качества позволит повысить точность радиозондовых данных по температуре – на 1,5–2 °С и по относительной влажности – на 25–35 %, уменьшить число нерезультативных выпусков радиозондов. При обеспечении выпуска радиозондов повышенной точности на уровне 5780 радиозондов в год в соответствии с методикой комбинированного зондирования будет существенно повышено качество радиозондовых данных аэрологической сети, что приведет к повышению точности прогнозов погоды и повысит эффективность использования гидрометеорологической информации.

Учитывая глобальность гидрометобеспечения и практику применения средств измерений иностранного производства в деятельности гидрометслужб всего мира, Росгидромет, в пределах его компетенции,

должен получить права по признанию результатов испытаний типов средств измерений иностранного производства, проведенных в зарубежных странах, а также сертификатов на средства измерений, выданных квалифицированными зарубежными организациями. В частности, такие права должна получить Центральная аэрологическая обсерватория по направлению радиозондирования.

Выполнение функций ЦАО позволит обеспечить применение на сети качественных средств измерений, что, в результате, повысит уровень своевременного обеспечения достоверными данными о состоянии атмосферы в тропосфере и стратосфере, повышению качества прогнозов, снижению рисков ущерба экономике, здоровью граждан, обороне и безопасности государства.

Список литературы

1. *Иванов В. Э., Фридзон М. Б., Ессяк С. П.* Технические и метрологические аспекты разработки и использования радиозондовых измерительных средств. Радиозондирование атмосферы : науч. изд. НИСО УрО РАН. Екатеринбург, 2004. 590 с.
2. *A. Balagurov, A. Kats, N. Krestyannikova (Russian Federation), F. Schmidlin (USA).* The WMO Radiosonde Humidity Sensor Intercomparison – Final Report of Phase I and Phase II, report No 85. WMO. 2006. 88 p.
3. *John Nash (United Kingdom).* Measurement of upper-air pressure, temperature and humidity. Instrument and Observing Methods, report No 121. WMO. 2015. 89 p.
4. *World Meteorological Organization.* Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. 2008. N 8. 569 p.

УДК 535.36; 551;501.706

Влияние метеорологических условий на особенности микроструктуры конденсационных следов самолётов

И. Д. Брюханов (plyton@mail.tsu.ru)

О. Ю. Локтюшин (lega.lega123@mail.ru)

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

Аннотация. Представлены результаты экспериментов по поляризационному лазерному зондированию конденсационных следов самолётов. Экспериментальные данные сопоставлены с метеорологической обстановкой на высотах наблюдавшихся аэрозольных образований.

Ключевые слова: конденсационные следы самолётов, облака верхнего яруса, метеорологические параметры, высотный поляризационный лидар НИ ТГУ, матрица обратного рассеяния света.

Растущая интенсивность [1] регулярного авиасообщения влечёт за собой необходимость исследований влияния конденсационных следов самолётов на микрофизические свойства атмосферы. В ряде исследований показано, что такие следы существенно загрязняют верхнюю тропосферу и нижнюю стратосферу, повышая концентрацию двуокиси углерода, водяного пара и других веществ в воздухе [2; 3]. Вместе с тем этим аэрозольные образования влияют не только на химические, но и на оптические свойства атмосферы. Являясь облаками верхнего яруса (ОВЯ) антропогенного происхождения, они не только сами вносят вклад в радиационный баланс атмосферы, но и инициируют рост перистой облачности [4]. Воздействие самолётных следов на атмосферу усиливается в случае преимущественной горизонтальной ориентации кристаллов льда в них, приводящих к аномальному обратному рассеянию. Облака с такой ориентацией частиц получили название зеркальных [5; 6].

Исследованию микроструктуры ОВЯ посвящён ряд экспериментальных и теоретических работ [7–10]. Пропускание облаками оптического излучения определяется параметрами их микроструктуры: параметрами распределений частиц в них по форме, размерам и пространственной ориентации. При исследовании микроструктуры аэрозольных образований контактными методами ориентация частиц нарушается. Неразрушающие исследования микроструктуры облаков могут выполняться на основе анализа изменения состояния поляризации оптического излучения при его взаимодействии с исследуемой средой. Эта идея применена в методе поляризационного лазерного зондирования [11]. Согласно методу атмосфера зондируется пучками лазерного излучения с определённым состоянием поляризации и измеряются интенсивности обратно рассеянного излучения для каждой из четырёх его компонент с состояниями поляризации, определяющими вектор Стокса излучения. Определение таких векторов при использовании аналогичного набора состояний поляризации для зондирующего излучения позволяет экспериментально получить матрицу обратного рассеяния света (МОРС). Указанный метод реализован в высотном поляризационном лидаре Национального исследовательского Томского государственного университета (НИ ТГУ). Его уникальной особенностью является возможность определения всех 16 элементов МОРС. Кроме того, методика работы лидара включает в себя определение динамики лидарных сигналов и получаемых на их основе параметров исследуемых аэрозольных образований с временным разрешением 2 с. Пространственное разрешение при этом составляет величину

ны от 37,5 до 150 м. Принимаемое обратно рассеянное излучения разделяется призмой Волластона на две компоненты со взаимно ортогональными состояниями поляризации, которые регистрируются отдельными приёмными каналами. На рисунке 1 представлен пример наборов вертикальных профилей интенсивности лидарного сигнала для всех 16 комбинаций состояний поляризации зондирующего и принимаемого обратно рассеянного излучения для обоих каналов приёмной системы лидара.

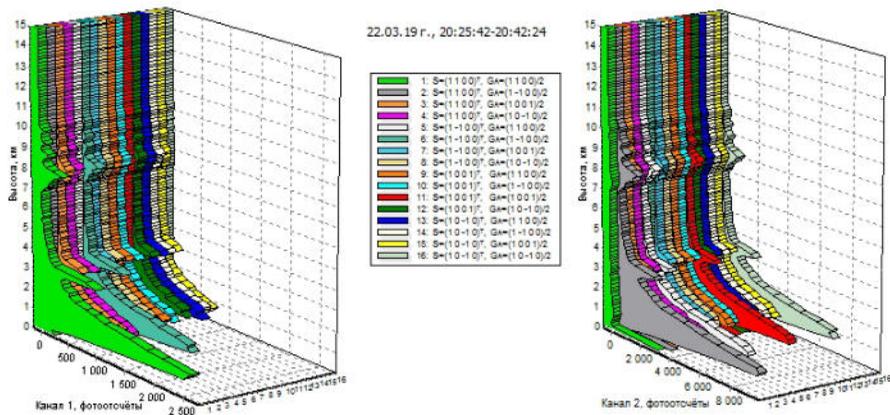


Рис. 1. Вертикальные профили интенсивности регистрируемого сигнала в обоих приёмных каналах лидара НИ ТГУ

В радиусе 100 км от лидара НИ ТГУ расположен ряд трасс регулярного гражданского авиационного сообщения (рис. 2). Определённые метеоусловия приводят к «дрейфу» конденсационных следов самолётов к месту расположения лидара, обеспечивая возможность исследования их геометрических и оптических характеристик. Для этого выполняется совместный анализ траекторий полётов самолётов [12] вместе с метеорологическими и лидарными данными [13]. Информация о метеорологических параметрах на высотах исследуемых аэрозольных образований забирается с сайта Вайомингского университета [14; 15]. В качестве наиболее близких к месту расположения лидара выбраны метеостанции в городах Колпашево и Новосибирск [5; 13]. Данные измерений обеих станций на высотах формирования ОВЯ, в том числе и регистрируемых в экспериментах конденсационных следов самолётов, обычно близки несмотря на удалённость обеих станций от Томска.



Рис. 2. Трассы регулярного авиасообщения вблизи Томска [12; 13]

В табл. 1 представлены результаты нескольких экспериментов по зондированию конденсационных следов самолётов и метеопараметры, соответствующие диапазонам высот зарегистрированных в лидарных экспериментах аэрозольных образований. Вертикальные профили метеорологических величин представлены на рис. 3. Временные динамики вертикальных профилей лидарного сигнала всех трёх экспериментов показаны на рис. 4. В табл. 1 и графиках указано местное, Томское, время (UTC+7).

Таблица 1

Данные экспериментов по зондированию конденсационных следов самолётов лидаром НИ ТГУ и соответствующие метеопараметры (2018 г.)

Дата и время серии лидарных измерений	8 августа, 14:49–15:06	1 октября, 13:31–13:48	9 октября 17:27–17:44
Рассчитанное время появления следа в поле зрения лидара	14:48	13:31	17:36
Высота полёта самолёта, км	10,97	9,14	9,75
Время дрейфа до лидара, мин	44,3	13,9	23,6
Диапазон высот конденсационного следа, км	9,5–10,9	5,9–9,1	8,5–9,5
Оптическая толщина τ	0,05	0,31	0,48
Отношение рассеяния R	93,07	31,73	13,54
Давление, гПа	241–300	300–500	300–349
Относительная влажность, %	33–38	34–51	44–58
Температура, °C	–53,5...–42,1	–47,5...–19,3	–49,3...–40,4
Точка росы, °C	–61,5...–52,1	–53,5...–31,3	–56,3...–45,5

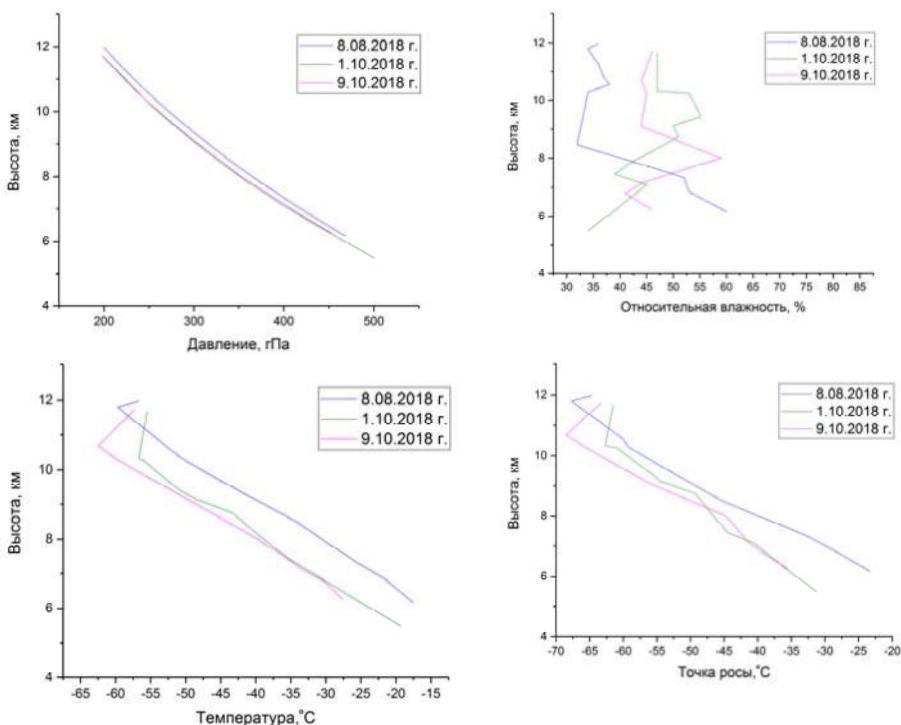


Рис. 3. Вертикальные профили метеорологических параметров, соответствующие времени экспериментов по зондированию конденсационных следов самолётов [14]

В ходе эксперимента, выполненного 8 августа, регистрировался конденсационный след самолёта с аномальным обратным рассеянием. Этот вывод сделан на основе экспериментальных данных: оптическая толщина ($\tau_1 = 0,05$) на два порядка меньше единицы, а отношение рассеяния ($R_1 = 93,07$) превышает 20. Это явление вызвано преимущественной горизонтальной пространственной ориентацией кристаллов в слое [6; 13]. Самолётный след, зарегистрированный 1 октября, также был зеркальным, однако имел оптическую толщину $\tau_2 = 0,31$, на порядок превышающую таковую в предыдущем эксперименте. Наконец, оптическая толщина $\tau_3 = 0,48$ следа, наблюдавшегося 9 октября, близка к измеренной 1 октября. Однако отношение рассеяния $R_3 = 13,54$, меньшее 20, не позволяет говорить о преимущественной горизонтальной ориентации кристаллов в аэрозольном слое.

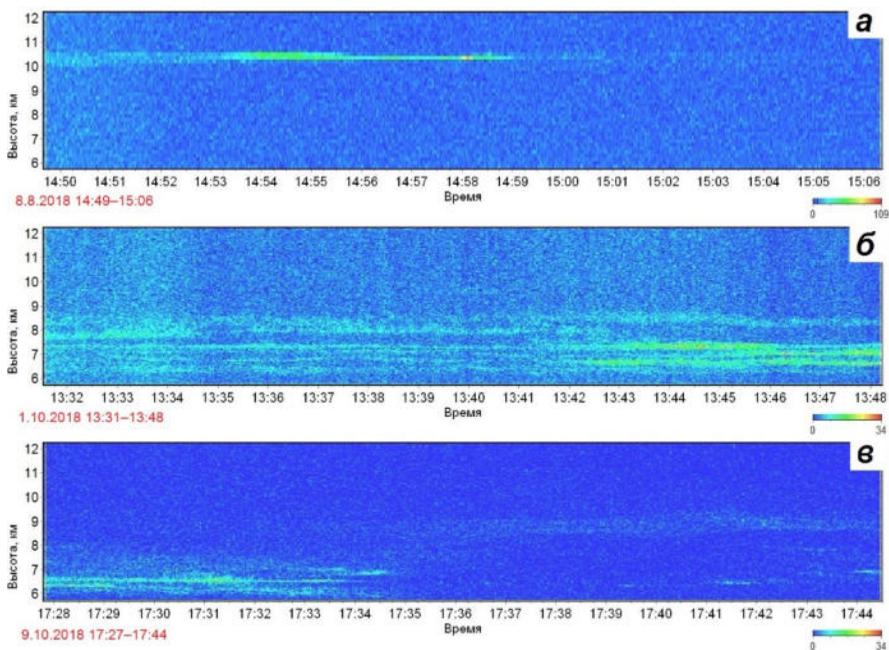


Рис. 4. Временная динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала: а – 8.08.18 г., б – 1.10.18 г., в – 9.10.18 г.; цветами обозначены значения интенсивности от минимальной (синий) до максимальной (красный)

В результате совместного анализа данных лидарных экспериментов и шар-зондовых измерений для диапазонов высот исследованных конденсационных следов выявлено отличительное поведение метеопараметров, установившихся во время зондирования зеркального слоя 8 августа 2018 г. Этому эксперименту соответствовали более низкие значения всех четырёх рассмотренных метеорологических величин: давления, относительной влажности, температуры и точки росы. Следует отметить, что время дрейфа этого слоя к месту расположения лидара (44,3 минуты) в 3,2 и 1,9 раз превысило значения октябрьских экспериментов (13,9 и 23,6 минуты, соответственно).

Приведённые выводы позволяют заключить, что в ряде случаев ледяные кристаллы в конденсационных следах самолётов имеют преимущественную горизонтальную ориентацию и образуют зеркальные аэрозольные слои. Оптическая толщина сформировавшихся зеркальных конденсационных следов достигает значений до 0,3, незеркальных – до 0,5. Высотная протяжённость конденсационных следов, образованных из выбросов самолётов может варьироваться от 1 до 3 км.

Список литературы

1. Mannstein. H., Schumann U. Aircraft induced contrail cirrus over Europe // *Meteorologische Zeitschrift*. 2005. Vol. 14, N 4. P. 549–554.
2. Kärcher B. Formation and radiative forcing of contrail cirrus // *Nature Communications*. 2018. Vol. 9. 1824 (17 p.).
3. Горшков В. Г., Довгалюк Ю. А., Ивлев Л. С. Физические основы экологии. СПб. : Изд-во Санкт-Петербург. ун-та, 2005. 252 с.
4. Transformation of contrails into cirrus during SUCCESS / P. Minnis [et al.] // *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol. 25, N 8. P. 1156–1160.
5. Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоев облаков верхнего яруса, образованных кристаллическими частицами, преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости / И. В. Самохвалов [и др.] // *Оптика атмосферы и океана*. 2012. Т. 25, № 5. С. 403–411.
6. Shanks J. G., Lynch D. K. Specular scattering in cirrus clouds // *Proc. SPIE*. 1995. Vol. 2578. P. 227–238.
7. Kaul B. V., Samokhvalov I. V., Volkov S. N. Investigating particle orientation in cirrus clouds by measuring backscattering phase matrices with lidar // *Appl. Opt.* 2004. Vol. 43, N 36. P. 6620–6628.
8. Sassen K., Benson S. A midlatitude cirrus cloud climatology from the Facility for Atmospheric Remote Sensing: II. Microphysical properties derived from lidar depolarization // *J. Atmos. Sci.* 2001. Vol. 58, N 15. P. 2103–2112.
9. Depolarization ratio and attenuated backscatter for nine cloud types: analyses based on collocated CALIPSO lidar and MODIS measurements / H. M. Cho [et al.] // *Opt. Express*. 2014. Vol. 16, N 6. P. 3931–3948.
10. Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N., et al. // *Opt. Express*. 2012. Vol. 20, N 27. P. 2822–2823.
11. Развитие высотного лидара Томского государственного университета как уникального комплекса для мониторинга атмосферы / И. В. Самохвалов [и др.] // *Оптика атмосферы и океана*. 2006. Т. 19, № 11. С. 995–999.
12. Flightradar24. Live air traffic/ URL: <https://www.flightradar24.com> (дата обращения: 25.03.2019 г.).
13. Оценка микрофизических характеристик конденсационных следов самолётов по данным поляризационного лидара: теория и эксперимент И. В. Самохвалов [и др.] // *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т. 32, № 3. С. 193–201.
14. University of Wyoming. URL: <http://weather.uwyo.edu> (дата обращения: 25.03.2019 г.).
15. Брюханов И. Д. Проблема интерпретации данных поляризационного лазерного зондирования конденсационных следов самолётов: оценка метеопараметров // *Тр. Воен.-косм. Акад. им. А. Ф. Можайского*. 2018. Вып. 662. С. 102–106.

УДК 550.4: 504.0549(571.50)

Мониторинг химического состава снежного покрова: концепция, методология и результаты за 30 лет наблюдений

В. А. Ветров (vetrov.igce@mail.ru)

Институт глобального климата и экологии им. акад. Ю. А. Израэля, г. Москва

Аннотация. Разработаны основные положения концепции мониторинга химического состава снежного покрова (ХССП). Цель мониторинга ХССП – получение необходимых знаний для научного обоснования и информационного обеспечения мероприятий по предотвращению загрязнения подстилающей поверхности земли за счет выпадения атмосферных осадков. Основные задачи: мониторинг показателей ХССП на всей территории страны; оценка атмосферных потоков химических веществ на площадь территории страны и на произвольные участки территории (регионы, водосборные бассейны, промышленные районы и др.); определение роли природных и антропогенных источников в формировании ХССП; оценка влияния ХССП на гидрохимию поверхностных вод при весенних паводках. Методология мониторинга ХССП опирается на методологию снегосъемки и на методы химического анализа атмосферных осадков и пресных поверхностных вод. Даны примеры применения методологии для данных мониторинга ХССП почти за весь период наблюдений (1987-2018 гг.).

Ключевые слова: снежный покров, мониторинг, химический состав, кислотность, программы наблюдений, атмосферные осадки, атмосферные потоки, качество измерений.

Введение

Снежный покров как естественный планшет-накопитель даёт возможность определения величины сухих и влажных выпадений загрязняющих веществ (ЗВ) в холодный сезон, и является индикатором изменения кислотности атмосферных осадков (АО). Возможность использования снежного покрова в качестве индикатора загрязнения природной среды послужила основой для организации мониторинга химического состава снежного покрова (ХССП) на территории СССР на базе существовавшей снегомерной сети для определения влагозапаса в снежном покрове [2].

Государственная сеть наблюдений в рамках мониторинга ХССП является уникальным инструментом получения данных о воздействии атмосферных выпадений загрязняющих веществ на подстилающую поверхность. В совокупности с данными мониторинга химического состава атмосферных осадков (АО), получаемых на других сетях наблюдений – загрязнение в городах, трансграничный перенос, кислотность и химический состав атмосферных осадков (ХСО), комплексный фоновый мониторинг – данные ХССП могут детально ха-

рактизовать атмосферные выпадения как на глобальном и региональном, так и на локальном уровнях.

Краткий анализ деятельности по мониторингу ХССП за период от начала наблюдений (1985 г.) до 2011 г. не дал ясных представлений о научном обосновании программ этого вида мониторинга загрязнения природной среды. Начиная с 2012 г., нами были проведены значительные усовершенствования методологии наблюдений на основе современной концепции мониторинга состояния окружающей среды. В настоящем сообщении кратко изложены предлагаемые нами концептуальные основы мониторинга ХССП, методология мониторинга и примеры результатов её применения для данных за более 30 лет наблюдений.

Основные положения концепции мониторинга ХССП

В самом общем виде мониторинг загрязнения окружающей среды определяется нами как система наблюдений за содержанием химических веществ в объектах природной среды (в атмосфере, атмосферных осадках, природных водах, почвах и т. п.) с целью научного и информационного обеспечения мероприятий по сохранению состояния этих объектов на определенных конвенциональных уровнях, соответствующих принятым экологическим нормам/стандартам (рис. 1) [3]. Ключевая задача мониторинга загрязнения окружающей среды – **определение степени антропогенного влияния на природные («фоновые», «доиндустриальные») концентрации химических веществ в наблюдаемых природных средах в текущем времени и в обозримом будущем.**

Для достижения этой цели наблюдения за ХССП должны решать следующие *задачи*:

1. Мониторинг основных *показателей* ХССП (термином «*показатель* мониторинга» мы обозначаем данные наблюдений и расчетные параметры, характеризующие результаты мониторинга) на всей территории страны в конце периода формирования (накопления) снежного покрова.

2. Оценка показателей ХССП на площади территории страны и на произвольных участках территории (регионы, **водосборные бассейны**, городские и промышленные районы и т. п.).

3. Определение динамики показателей (временных трендов) ХССП за периоды наблюдений на площади территории страны и на произвольных участках территории.

4. Определение роли природных и антропогенных источников в формировании ХССП на различных участках территории.

5. Определение доли антропогенных источников в потоках химических веществ на различные участки территории страны в зимний (холодный) период года (например, доли промышленных выбросов, выпадающих в локальном и региональном масштабах от источника).

6. Оценка влияния ХССП на гидрохимию поверхностных вод при весенних паводках.

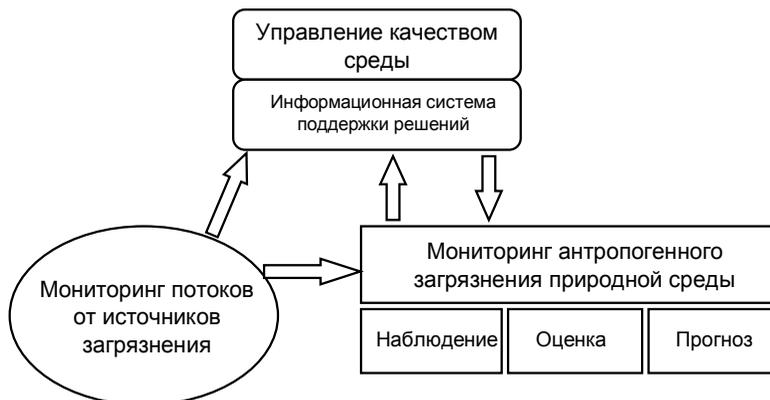


Рис. 1. Общая концептуальная схема мониторинга состояния окружающей среды для решения задач управления качеством среды

Исходя из этих задач, результаты мониторинга ХССП предполагается использовать:

- в ежегодных государственных обзорных изданиях РФ в области охраны окружающей среды;
- для прогноза влияния весеннего паводка на гидрохимию поверхностных вод;
- для информационной поддержки природоохранной деятельности на всех административных. уровнях;
- для совершенствования систем мониторинга загрязнения атмосферных осадков;
- для оценки влияния региональных источников атмосферных выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) на загрязнение территорий за счет атмосферных осадков.

Методология мониторинга ХССП

Содержание блока «Мониторинг антропогенного загрязнения окружающей природной среды» (рис. 1) представляет собой, по существу, описание методологии деятельности по мониторингу ХССП на этапах «Наблюдение», «Оценка», «Прогноз».

Наблюдение. Методология наблюдений мониторинга ХССП содержит:

1. Требования к наблюдениям на основе целей и задач мониторинга ХССП и совокупности знаний в области мониторинга АО.

2. Обоснование плотности сети, расположения пунктов наблюдений (ПН) и метода отбора проб. Сеть ПН ХССП создается и функционирует на основе существующей и развивающейся сети снегомерной съемки; отбор проб осуществляется в конце периода накопления снежного покрова при проведении плановой снегосъемки. При этом на контролируемой каждым УГМС территории вводится классификации по двум категориям ПН в сети мониторинга ХССП по степени их удаленности от местных источников атмосферных выбросов:

I – ПН, испытывающие заметное влияние местных (до 10–15 км от ПН) источников атмосферных эмиссий; в основном, это «городские» ПН (в границах и ареалах нас. пунктов с населением более 20 тыс. человек) и ПН в ареалах влияния крупных промышленных предприятий;

II – остальные («фоновые») ПН.

3. Набор определяемых характеристик ХССП и соответствующих аналитически методов. Определяемые характеристики и методики должны опираться на методологию мониторинга ХСО и гидрохимического мониторинга пресных поверхностных водоемов (см., например, статью автора в этом же сборнике, также [3]).

Оценка ХССП. Следует заметить, что название этапа «Оценка» довольно условно, поскольку на этом этапе проводится *анализ* качества первичных данных наблюдений, пополнение *базы данных* мониторинга (БД-ХССП), расчет *показателей* мониторинга и, собственно, *оценка состояния ХССП*.

Анализ качества первичных данных наблюдений относится к данным пробоотбора и к результатам лабораторных анализов, которые УГМС предоставляют в ФГБУ ИГКЭ в виде таблиц первичных данных наблюдений, которые служат основой для включения в БД-ХССП. *Анализ* качества первичных данных состоит в экспертном определении заносимых в БД-ХССП значений первичных данных путем выяснения возможных ошибок, технических сбоев и т. п.

Показатели мониторинга – данные наблюдений и расчетные параметры, необходимые для выполнения задач мониторинга ХССП: кислотность (рН), компоненты химического состава, концентрации ЗВ, атмосферные потоки химических веществ, доли эмиссий ЗВ от антропогенных источников в снежном покрове, характеристики влияния ХССП на гидрохимию паводковых вод и др.

Оценка состояния ХССП понимается как набор его *показателей*, соотнесенных к природным (незагрязненным, «фоновым») гидрохимическим характеристикам АО. Необходимо иметь четкие количественные (по крайней мере, полуколичественные) критерии для оценки ХССП и его изменений под действием антропогенных факторов.

В итоге, *оценка* ХССП должна дать ответы на два основных вопроса:

- обнаружено ли достоверное изменение ХССП относительно уровней природного («незагрязненного») фона ХСО за счет действия антропогенных или иных факторов?

- являются ли обнаруженные изменения (временные тренды) угрожающими с точки зрения влияния снежных осадков на состояние природных сред на рассматриваемой территории?

Таким образом, методология на этапе «**Оценка**» должна обеспечивать:

- 1) ведение электронной БД-ХССП;
- 2) анализ достоверности (надежности) первичных данных, занесимых в БД-ХССП; процедуры корректировки БД для обеспечения надежности расчетов показателей мониторинга ХССП;
- 3) разработку и применение алгоритмов (методов) обработки и анализа первичных данных и расчета показателей ХССП, необходимых для решения задач мониторинга;
- 4) методы представления показателей мониторинга ХССП на основе современных ГИС-технологий и методов статистического анализа;
- 5) разработку и применение критериев и методов оценки ХССП.

При этом БД ХССП мы рассматриваем как часть более общей информационно-аналитической системы ИАС-ХСО, используемой для исследований в области задач мониторинга ХСО.

Прогноз. Выходные результаты этапа «**Прогноз**» могут иметь решающее значение для блока «Управление качеством среды» (рис. 1). Это наиболее «научоемкий» раздел мониторинга, поскольку требует использования прогнозных моделей для экстраполяции результатов/показателей мониторинга в обозримое будущее (с горизонтом 10–20 лет).

Наиболее доступная и простая прогнозная модель – функция (обычно линейная) временного тренда показателя мониторинга, т. е. изменение показателя во времени за последние 10–20 лет наблюдений. Более сложные модели должны строиться на феноменологическом подходе, предполагающем знание физико-химических процессов формирования ХССП.

Сбор, анализ и обобщение научных знаний о предмете мониторинга – одна из задач этапа «**Прогноз**». Для мониторинга ХССП эта задача решается путем анализа данных наблюдений для определения роли антропогенных и природных источников в формирование ХССП и доли антропогенных источников в потоке химических веществ на различные участки территории, т. е. решением концептуальных задач мониторинга ХССП. Системная взаимосвязь мониторинга и научного исследования в блоке «**Прогноз**» – необходимое условие разработки оптимальных программ мониторинга при неизбежной ограниченности ресурсов.

Таким образом, этап «**Прогноз**» в концепции мониторинга ХССП выполняет функции:

- анализа показателей мониторинга для определения роли антропогенных и природных источников в формирование ХССП и доли антропогенных источников в потоке химических веществ на различные участки территории;
- выбора прогнозных моделей;
- проектирования (экстраполяции) показателей мониторинга в обозримое будущее (с горизонтом 10–20 лет).

Обзор результатов мониторинга ХССП

Наблюдение

По состоянию на 1 января 2019 г. сеть мониторинга ХССП в 23 УГМС состояла из 513 ПН, из которых на Европейской территории России (ЕТР) приходилось 268, на Азиатской территории (АТР) – 245 ПН. Площадь контролируемой каждым УГМС территории варьирует в пределах от 85–140 тыс. км² (Мурманское, Башкирское, Сахалинское УГМС) до 2,5–3 млн км² (Среднесибирское, Якутское УГМС), т. е. с разбросом более чем в 30 раз. При средней (для всей территории страны) плотности сети около 30 000 км² на 1 ПН, разброс этого параметра для контролируемых УГМС территорий составляет от 5000–6500 км²/ПН (Сахалинское, Мурманское УГМС) до 85 000–102 000 км²/ПН (Северо-Кавказское, Якутское, Чукотское УГМС).

После отбора в конце зимнего периода пробы снежного покрова направляются в региональные лаборатории УГМС. Работы на сети наблюдений за ХССП выполнялись по программам двух видов [9].

По программе *первого вида* (выполнялась почти в 50 % ПН) в лабораториях измеряются: кислотность (рН), электропроводность, концентрация основных ионов – сульфат-иона (SO_4^{2-}), нитрат-иона (NO_3^-), хлорид-иона (Cl^-), гидрокарбонат-иона (HCO_3^-), ионов аммония (NH_4^+), натрия (Na^+), калия (K^+), кальция (Ca^{2+}) и магния (Mg^{2+}), а также содержание микрокомпонентов: фосфат-ионов, цинка, свинца, кадмия, марганца и никеля.

Программа *второго вида* – анализ только основных ионов, выполнялась на всех ПН; по этой программе в лабораториях определяются: кислотность (рН), электропроводность, концентрацию сульфатов, нитратов, аммония, хлоридов, ионов калия, натрия, магния, кальция.

Оценка

БД-ХССП Основным назначением БД-ХССП является хранение первичной информации, полученной от УГМС за многолетний период наблюдений на сети мониторинга ХССП. Работа с БД-ХССП осуществляется с помощью СУБД Access 2007, которая состоит из 5 блоков (таблиц) – «Годы», «УГМС», «Субъекты РФ», «Метеостанции», «Характеристики пробы». По состоянию на конец 2018 г. БД-ХССП содержала данные 23 УГМС, действующих на территории РФ в 2018 г., которые были получены на сети ПН мониторинга ХССП в период 1986-2018 гг. Количество ПН за каждый год менялось от 365 в 1996 г. до 575 в 1988 г.

Анализ надежности) данных. Примером анализа первичных данных служит оценка надежности ключевой (для расчетов всех показателей ХССП) величины в данных пробоотбора – значения влагозапаса $W_{\text{ПН}}$ (мм) в снежном покрове конкретного ПН. Его правильность контролируется тремя величинами: 1) рассчитанной по значениям параметров пробоотбора величиной $W_p = 10\Delta h \cdot \rho$ мм (Δh – высота снежного покрова, см; ρ – плотность снега, г/см^3); 2) приведенной в отчете УГМС суммой осадков F , мм за период Δt дн. залегания устойчивого снежного покрова; 3) значением величины влагозапаса, рассчитанного исходя из полного объема и площади отбора пробы снега – $W_0 = 10V/S_w$, мм (V – объем воды в пробе, мл; S_w – суммарная площадь пробоотбора, см^2).

В случае, если приведенное в отчете УГМС значение $W_{\text{ПН}}$ хорошо согласуется со всеми тремя контрольными величинами – W_p , F и

W_0 , значение $W_{\text{ПН}}$ заносится в БД-ХССП без какой-либо корректировки. К сожалению, как показал анализ всего массива первичных данных мониторинга ХССП содержащихся в отчетах УГМС, случаи надежного (достоверного) значения $W_{\text{ПН}}$ относительно редки. В большинстве случаев имеют место значительные расхождения между отчетным значением $W_{\text{ПН}}$ и одним или более значениями из трех контрольных параметров. В этих случаях производится экспертное определение заносимого в БД-ХССП значения $W_{\text{ПН}}$ путем выяснения возможных ошибок, технических сбоев и т. п.

При этом необходимо отметить, что расхождения между $W_{\text{ПН}}$ и F , если не считать простых технических огрехов (например, в записях), имеют глубокую причину. В холодный (зимний) период значительные объемы снега испаряются (сублимируют) даже при отрицательных температурах. С учетом эффекта сублимации (10-25 % согласно [7]), величина влагозапаса в снежном покрове $W_{\text{ПН}}$, определяемая на некотором ПН/МС, должна быть меньше примерно на 10-25 % величины суммы осадков F , полученной на той же МС за период формирования снежного покрова Δt . Это будет иметь место только при правильном выборе маршрута снегосъемки, т. е. когда определяемый на маршруте влагозапас $W_{\text{ПН}}$ соответствует среднему влагозапасу на площади, контролируемой данным ПН/МС, сформированному за счет осадков F за период Δt .

Параметр $(F - W_{\text{ПН}})/W_{\text{ПН}}$ характеризует относительную величину отклонения $W_{\text{ПН}}$ от F . Принимая во внимание приведенные выше соображения, мы вводим доверительный интервал для параметра $(F - W_{\text{ПН}})/W_{\text{ПН}}$ в виде $[(-0,1) - (+0,25)]$, границы которого должны служить критериями надежности значений $W_{\text{ПН}}$. Порядковая статистика параметра $(F - W_{\text{ПН}})/W_{\text{ПН}}$ по всем ПН мониторинга ХССП за 2018 год показала, что из всех 512 ПН только в ~40 % случаев были получены сведения о влагозапасе, отвечающие принятым нами критериям надежности. Из этого следует вывод о необходимости анализа и корректировки маршрутов снегосъемки на всех ПН, в которых значения этого параметра выходят за принятые критерии надежности.

Определение средних показателей ХССП. Представленным ниже расчетным алгоритмом решается задача определения средних показателей ХССП на интересующей нас площади наблюдений, в данном примере – в границах региона (субъекта) РФ. В таких расчетах необходимо знание площади S_j , которая освещается каждым j -м ПН, расположенным в границах рассматриваемой территории. Нами использовалась упрощенная схема, в которой участок территории, контроли-

руемой ПН_j, отображается в виде так называемого полигона Вороного [8]. Пример разбиения территории региона на полигоны Вороного показан на рис. 1. Для расчета площадей полигонов Вороного используется ГИС Mapinfo [11].

Расчет среднего значения некоторого показателя $\overline{p_{kn}}$ (кроме рН) на площади **k**-го региона по наблюдениям в **n**-м году производится по формуле:

$$\overline{p_{kn}} = \frac{\sum_{j=1}^m p_{jkn} \cdot S_{jkn}}{\sum_{n=1}^m S_{jkn}} \quad (1)$$

где p_{jkn} – значение показателя **p** (кроме рН) в ПН_j (в границах **k**-го региона) по наблюдениям в **n**-м году; S_{jkn} – площадь полигона Вороного для ПН_{jk} в границах **k**-го региона по наблюдениям в **n**-м году, км² (рис. 2); **m** – количество ПН_{jk} в **k**-м регионе по наблюдениям в **n**-м году.



Рис. 2. Кислотность (рН) снежного покрова на полигонах Вороного на территории Мурманской области по данным наблюдений в 2018 г.

Определение интенсивности выпадений химических веществ. Помимо кислотности рН, важным показателем мониторинга ХССП служит интенсивность I_{jn} (кг/км²·мес.) выпадений любого компонента ХССП в **j**-м ПН (ПН_j) по наблюдениям в **n**-м году. Этот показатель рассчитывается по формуле:

$$I_{jn} = \frac{C_{jn} \cdot W_{jn}}{\Delta t_{jn}} \quad (2)$$

где C_{jn} – концентрация компонента ХССП в пробе снежного покрова, отобранной в ПН_j в n-м году, мг/л; W_{jn} – средний влагозапас по наблюдениям в n-м году в ПН_j, мм; Δt_{jn} – время залегания снежного покрова в ПН_j при отборе проб в n-м году, мес.

Например, интенсивность выпадений серы в ПН_j рассчитывалась введением в формулу (2) коэффициента, учитывающего относительное содержание серы в концентрации сульфат-иона: $C_{jn}(S) = 0,33C_{jn}(SO_4)$. Интенсивность выпадений азота в ПН_j рассчитывалась введением в формулу (2) суммы концентраций нитрат-иона и иона аммония с коэффициентами, учитывающими относительное содержание азота в каждом ионе – $C_{jn}(N) = 0,23C_{jn}(NO_3^-) + 0,78C_{jn}(NH_4^+)$

Расчет средней кислотности снежного покрова (среднего значения водородного показателя рН) на площади k-го региона по наблюдениям в n-м году производится по формуле:

$$\overline{pH}_{kn} = -\lg\left(\frac{\sum_{j=1}^m S_{jkn} \cdot W_{jn} \cdot 10^{-pH_{jkn}}}{\sum_{j=1}^m S_{jkn} \cdot W_{jn}}\right) \quad (3)$$

Выражение под знаком логарифма представляет собой среднее по площади k-го региона значение концентрации C_H водородного иона H^+ (моль/л) по наблюдениям в n-м году, вычисленное по значениям показателя $(pH)_{jkn}$ по формуле (1) с учетом влагозапаса W_{jn} и определения $pH = -\lg C_H$.

В табл. 1 показан фрагмент для «фоновых» и промышленных регионов на ЕТР и АТР отчета о средних по площади регионов показателей ХССП по данным мониторинга за 2018 г.

Таблица 1

Средние по площади регионов значения рН снежного покрова и интенсивности потоков серы и азота в зимний период 2017–2018 гг. по данным мониторинга ХССП

Регион	Площадь региона, км ²	Кол-во ПН	Среднее по площади региона значение показателя ХССП		
			pH/Is/In	pH	Is ₂ , кг/км ² ·мес.
Респ. Карелия	180 520	10/10/10	5,3	9	13
Мурманская обл.	144 900	22/22/18	5,6	16	15
Респ. Саха (Якутия)	3 083 520	34/32/26	5,4	10	3
Красноярский край-юг	589 100	19/19/19	6,0	45	10

Визуализация – картирование. Для визуализации показателей мониторинга ХССП строились карты распределения по территории РФ показателей кислотности (pH) и интенсивности выпадений серы I_S и азота I_N в виде изолиний на всей площади страны [1]. Карты строились по значениям pH , I_S , I_N , рассчитанным для каждого ПН, по регулярной сетке $10 \times 10 \text{ км}^2$ расчетных значений этих показателей с использованием программы Mapinfo Vertical Mapper по методу обратных взвешенных расстояний (ОВР) [6; 11].

На рисунке 3 показана карта-схема распределения значений показателя pH снежного покрова на всей территории страны, построенная по данным наблюдений на сети мониторинга ХССП в 2018 г.

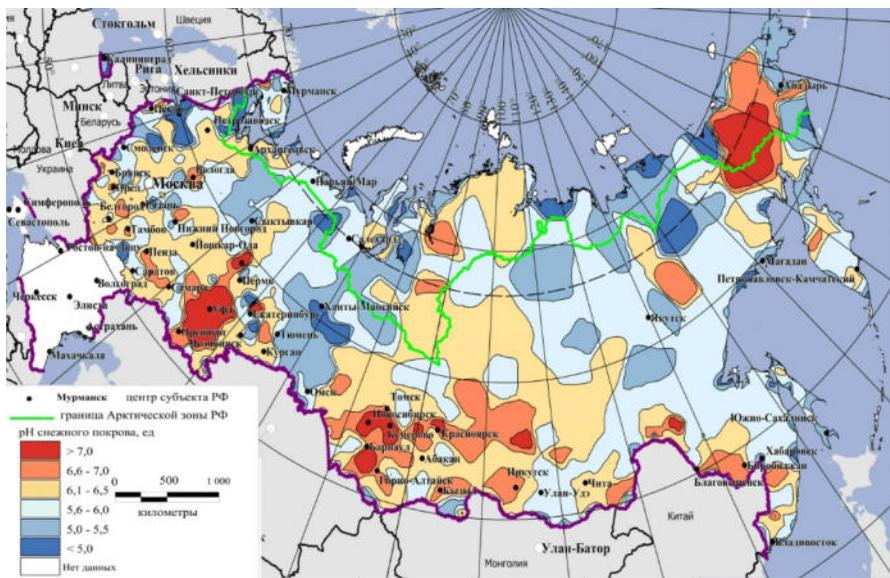


Рис. 3. Карта-схема распределения pH снежного покрова на территории России по данным наблюдений на сети мониторинга ХССП в 2018 г.

Расчет трендов. Динамика во времени (временной тренд) показателя p за произвольные периоды наблюдений как на всей площади территории страны, так и на отдельных участках территории рассчитывается по методологии расчета временных трендов показателей, используемой при анализе климатических изменений [10].

Для простоты временные тренды показателей p аппроксимируются линейной зависимостью, т. е. уравнением линейной регрессии

$$p(t) = at + b \quad (4)$$

где t – время от начала наблюдений (годы); $p(t)$ – значение p на время t .

Изменение во времени можно считать достоверным, когда коэффициент линейной регрессии a отличен от нуля. Значимость a проверяется с помощью статистических методов проверки гипотез. Коэффициент регрессии a обозначает изменение показателей p во времени как на отдельном ПН, так и на отдельной территории (например, региона). На рис. 4 показана карта-схема распределения динамики показателя pH за 10 лет ($\Delta pH(10) = 10a$) за период наблюдений на сети мониторинга ХССП в 1987–2018 гг. Из рис. 4 видно, что примерно на 3/4 территории страны за последние 30 лет не наблюдаются заметные (за пределами 0,3 ед. pH по модулю за 10 лет) изменения кислотности снежного покрова.

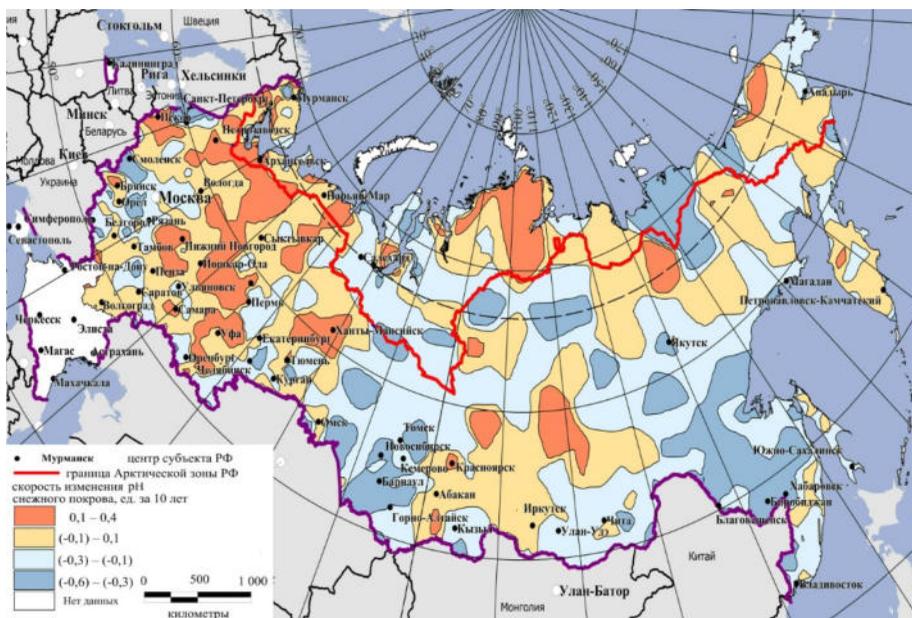


Рис. 4. Скорость изменения pH снежного покрова $\Delta pH(10)$ на территории России по данным мониторинга ХССП за период 1987–2018 гг.

Прогноз

На этапе «Прогноз» функцию проектирования (экстраполяции) показателей мониторинга в обозримое будущее (с горизонтом 10–20 лет) вполне могут выполнять показатели временных трендов $\Delta pH(10)$ (рис. 3).

Для определения доли антропогенных источников в потоке химических веществ на различные участки территории – одного из ведущих разделов методологии этапа «**Прогноз**», был выполнен анализ связи между зимними выпадениями серы и азота на площадь региона с их атмосферными выбросами от источников в пределах двух модельных регионов (условных «территориально-промышленных комплексов», ТПК) – Мурманской области и юга Красноярского края (территория края к югу от 61° с. ш.).

Для этого по данным наблюдений на сети мониторинга ХССП в 2007–2015 гг. были рассчитаны средние значения интенсивности потоков серы I_S и азота I_N (кг/км²·мес., см. формулу (1) и табл. 1) и соответствующие потоки P_S и P_N (кт/мес.) на площади $S_{ТПК}$ обоих ТПК:

$$P_{S,N} = I_{S,N} \cdot S_{ТПК} \quad (5)$$

Эмиссии соединений серы и азота, по которым оценивались интенсивности атмосферных выбросов серы и азота $E_{S,N}$ (кт/мес.) в обоих регионах, были определены по данным, опубликованным в региональных гос. докладах о состоянии и охране окружающей среды за 2006–2016 гг. [4; 5]. Отношения параметров P_S/E_S и P_N/E_N характеризуют вклад региональных выбросов серы и азота в выпадения со снежными осадками на площадь каждого региона (табл. 2).

По данным табл. 2, максимальная доля атмосферных выбросов в общем количестве серы и азота, выпавшем на площадь Мурманской обл. в холодные периоды 2007–2016 гг. оценивается величинами до 30 % и до 100 % соответственно. На площадь юга Красноярского края в холодные периоды 2007–2016 гг. могло выпасть до 100 % серы и азота, выброшенных в атмосферу на этом ТПК.

Таблица 2

Доля выпадений серы и азота со снежными осадками от их выбросов в Мурманской обл. и на юге Красноярского края в 2007–2016 гг.

	Сера, P_S/E_S		Азот, P_N/E_N	
	min – max	средн.	min – max	средн.
Мурманской обл.	0,2–0,6	0,3	2,8–9,0	4,9
Юг Красноярского края	8–23	14	1–11	3

Заключение

1. Мониторинг загрязнения окружающей среды определяется нами как система наблюдений за содержанием химических веществ в объектах природной среды с целью научного и информационного обеспечения мероприятий по сохранению состояния этих объектов на

уровнях, соответствующих принятым экологическим нормам/стандартам.

2. Цель мониторинга ХССП – получение необходимых и достаточных знаний для научного обоснования и информационного обеспечения мероприятий по предотвращению загрязнения подстилающей поверхности земли за счет выпадения атмосферных осадков.

3. Задачи мониторинга ХССП: мониторинг основных показателей ХССП; оценка показателей ХССП на площади территории страны и на произвольных участках территории; определение динамики показателей (временных трендов) ХССП; определение роли природных и антропогенных источников в формировании ХССП на различных участках территории; определение доли антропогенных источников в потоке химических веществ на различные участки территории страны в холодный период; оценка влияния ХССП на гидрохимию пресных поверхностных вод при весенних паводках.

4. Методология мониторинга ХССП на этапе «**Наблюдения**» содержит требования к наблюдениям на основе целей и задач мониторинга ХССП и совокупности знаний в области мониторинга АО: сеть ПН ХССП создается и функционирует на основе существующей и развивающейся сети снегомерной съемки; отбор проб осуществляется в конце периода накопления снежного покрова при проведении плановой снегосъемки; определяемые характеристики ХССП и аналитические методики должны опираться на методологию мониторинга ХСО и гидрохимического мониторинга пресных поверхностных водоемов.

5. Методология мониторинга ХССП на этапе «**Оценка**» должна обеспечивать: ведение электронной БД-ХССП; анализ и процедуры корректировки заносимых в БД-ХССП первичных данных для обеспечения надежности расчетов показателей мониторинга ХССП; разработку и применение алгоритмов (методов) обработки и анализа первичных данных и расчетов показателей ХССП, необходимых для решения задач мониторинга; представление показателей мониторинга ХССП на основе современных ГИС-технологий и методов статистического анализа; разработку и применение критериев и методов оценки ХССП.

6. Методология мониторинга ХССП на этапе «**Прогноз**» обеспечивает: анализа показателей мониторинга для определения роли антропогенных и природных факторов в формировании ХССП и определение доли антропогенных источников в потоке химических веществ на различные участки территории; выбор прогнозных моделей; проектирование (экстраполяция) показателей мониторинга в обозримое будущее (с горизонтом 10–20 лет).

7. По результатам практически за весь период наблюдений (1987–2018 гг.) приведены примеры применения предлагаемой методологии мониторинга ХССП на всех этапах концептуальной схемы мониторинга:

«**Наблюдение**» – сеть и программы наблюдений по состоянию на конец 2018 г.;

«**Оценка**» – описание БД-ХССП, оценка надежности значений влагозапаса $W_{\text{пн}}$; алгоритмы (расчетные формулы) и определение средних показателей ХССП и интенсивности выпадений химических веществ по регионам в 2018 г.; визуализация (карта-схема) распределения pH снежного покрова на территории России по данным наблюдений на сети мониторинга ХССП в 2018 г.; расчет и карта-схема временных трендов pH снежного покрова $\Delta pH(10)$ на территории России по данным мониторинга ХССП за период 1987–2018 гг.

«**Прогноз**» – определение доли выпадений серы и азота со снежными осадками от их выбросов в Мурманской обл. и на юге Красноярского края в 2007–2016 гг.

Автор благодарен В. В. Кузовкину и Д. А. Манзону за помощь в подготовке материалов и иллюстраций.

Список литературы

1. Берлянт А. М. Картография. М. : Аспект Пресс, 2002, 336 с.
2. Василенко В. Н., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова Л. : Гидрометеониздат, 1985. 180 с.
3. Ветров В. А. Обоснование программ экогеохимического мониторинга природных сред в регионе озера Байкал // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. М., 2015. Т. 26, № 1. С. 9–27.
4. Гос. доклады о состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае за 2006–2016 гг. / М-во природ. ресурсов и экологии Краснояр. края. Красноярск.
5. Гос. доклады о состоянии и охране окружающей среды в Мурманской области за 2006–2016 гг. Комитет по природным ресурсам и охране окружающей среды Мурманской обл. Мурманск.
6. Де Мерс М. Географические информационные системы. Основы. М. : Дата+, 1999, 288 с.
7. Дюнин А. К. Испарение снега. Новосибирск : Наука, 1961. 118 с.
8. Геоинформатика : учебник / Е. Г. Капралов [и др.] ; под ред. В. С. Тикунова. М. : Академия, 2005. 480 с.
9. Руководящий документ «Руководство по контролю загрязнения атмосферы» (РД 52.04.186-89). М. : Гос. ком. СССР по гидрометеорологии, 1991. Ч. 2.
10. Семенов С. М. Оценка линейных трендов // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / под ред. С. М. Семенова. М. : Планета, 2012. С. 12–13.
11. MapInfo Professional 11.0 Руководство пользователя – Pitney Bowes Software Inc, 2011. 625 с.

УДК 551.510.42: 550.42

Изотопный состав атмосферных осадков Байкальского региона (на примере г. Иркутска)

С. С. Кострова (kostrova@igc.irk.ru)¹

П. Е. Тарасов (ptarasov@zedat.fu-berlin.de)²

Х. Майер (Hanno.Meyer@awi.de)³

Ф. Фернандой (francisco.fernandoy@unab.cl)⁴

¹ Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск

² Свободный университет Берлина, г. Берлин

³ Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера центра им. Гельмгольца, г. Потсдам

⁴ Университет Андреа Белло, Винья-дель-Мар

Аннотация. Представлены результаты исследования изотопного состава атмосферных осадков, отобранных в г. Иркутске в период с июня 2011 г. по октябрь 2013 г. и с декабря 2014 г. по апрель 2017 г. На основе полученных данных выявлены четкие сезонные колебания значений $\delta^{18}\text{O}$ и δD , вызванные преимущественно изменением температуры воздуха. Рассчитаны температурные коэффициенты для средневзвешенных значений изотопного состава атмосферных осадков. Определены основные траектории воздушных масс, приносящих осадки в регион в течение года.

Ключевые слова: стабильные изотопы кислорода и водорода, изотопный анализ, температура воздуха, циркуляция атмосферы.

Атмосферные осадки являются одним из основных источников воды для наземных и водных экосистем. Детальное понимание циркуляционных процессов и механизмов, вызывающих атмосферные осадки, закономерностей их временного и пространственного распределения – необходимые составляющие для оценки и прогноза климатических изменений и водного режима на планете. В частности, вариации в изотопном составе кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода (δD) атмосферных осадков, обусловленные изменением климатических параметров, таких как температура воздуха, влажность, количество осадков [5; 14], а также траекторией движения воздушных масс [11], обеспечивают надежную информацию об атмосферной циркуляции и изменениях климата. В последние годы анализ изотопного состава атмосферных осадков стал одним из наиболее широко применяемых методов в метеорологии, климатологии, гидрологии [11; 14] и в моделировании [9]. Кроме того, имеющиеся изотопные данные используются для расшифровки информации о климате прошлого, хранящейся в природных

архивах, таких как озерные отложения [10], снежники [7], ледники [13] и сталагмиты [12].

Данные, собранные за последние шесть десятилетий Глобальной сетью изотопов осадков (GNIP), организованной Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) и Всемирной метеорологической организацией (ВМО), ежегодно пополняются результатами многочисленных местных исследований с целью получения детальной картины пространственной и временной изменчивости изотопного состава осадков по всему миру. Тем не менее, изотопные данные по атмосферным осадкам России редки и часто неоднородны [8]. Метеорологические и изотопные данные с 13 станций по всей России (обобщенные в Сибирской сети изотопов осадков; SNIP) продемонстрировали направленность переноса влаги с Атлантического океана (особенно зимой) и вклад вторичной влаги (летом) в континентальной части Евразии. В настоящее время Байкальский регион в этой базе данных представлен неполным однолетним циклом наблюдений (январь–ноябрь, декабрь) по г. Иркутску [8].

Цели настоящей работы: 1) исследование изотопного состава атмосферных осадков Байкальского региона (на примере г. Иркутска), 2) изучение сезонности изотопного сигнала, 3) выявление основных метеорологических параметров, определяющих изотопный сигнал, 4) исследование обратных траекторий движения воздушных масс и выявление основных источников влаги, обеспечивающих осадки в регионе.

Район исследования

Байкальский регион расположен в центре Евразийского континента, вдали от океанических влияний. Климатические условия г. Иркутска ($52^{\circ}18'$ с. ш., $104^{\circ}17'$ в. д.; 469 м над ур. м.; рис. 1) типичны для всего региона и характеризуются высокой степенью континентальности со значительными сезонными колебаниями температуры воздуха от -50°C в январе до $+37^{\circ}\text{C}$ в июле и среднегодовой суммой осадков 480 мм (1881–2018 гг.). Регион расположен в зоне взаимодействия двух крупных систем атмосферной циркуляции воздуха – азиатского антициклона и североатлантического переноса. Осадки в течение года связаны, в основном, с циклонами западного/северо-западного происхождения, хотя в июле и августе, когда центр высокого давления расположен над Якутией, в регион проникают южные циклоны с территории Монголии.

Материалы и методы исследования

В общей сложности за период с июня 2011 г. по октябрь 2013 г., а также с декабря 2014 г. по апрель 2017 г. с использованием полиэтиленового контейнера и воронки в г. Иркутске были собраны 284 пробы атмосферных осадков. В рассматриваемые периоды мониторинг осадков охватывает каждый месяц года не менее 3 раз. После отбора проб до последующего изотопного анализа все единичные образцы хранились в холодильнике в герметичных бутылках. Анализ выполнен в изотопной лаборатории Института полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера центра им. Гельмгольца (г. Потсдам, Германия) на масс-спектрометре Finnigan MAT Delta-S. Погрешность определения значений δD и $\delta^{18}O$ (1σ) составила $\pm 0,8\%$ и $\pm 0,1\%$, соответственно. Результаты измерений представлены в отношении к международному стандарту VSMOW. Оценка синоптических условий в период выпадения осадков осуществлялась на основе данных метеонаблюдений Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA). Обратные траектории движения воздушных масс, обуславливающих атмосферные осадки, рассчитывались с помощью модели HYSPLIT [6].

Результаты и обсуждение

Изотопный состав атмосферных осадков в г. Иркутске изменяется в широких пределах: от $-41,4\%$ до $-4,4\%$ для $\delta^{18}O$ и от $-322,4\%$ до $-39,6\%$ для δD . Результаты исследования отображены на диаграмме $\delta^{18}O$ – δD (рис. 1). Полученные изотопные данные демонстрируют четкие сезонные вариации. Образцы дождя ($n = 137$) характеризуются более высокими средними значениями $\delta^{18}O = -11,7\%$ и $\delta D = -92,6\%$ и низким избыточным дейтерием $d = +1,0\%$, тогда как в образцах снега ($n = 147$) средние значения $\delta^{18}O$ и δD существенно ниже и составляют $-26,7\%$ и $-205,3\%$, соответственно, $d = +9,0\%$. Точки, характеризующие изотопный состав дождей, расположены на диаграмме $\delta^{18}O$ – δD правее глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ; рис. 1), свидетельствуя о влиянии вторичных процессов фракционирования (например, вторичной влаги) на изотопный состав осадков. Испарение с поверхности открытых водоемов способствует уменьшению d в дождевой воде и обогащает ее тяжелыми изотопами. Полученные результаты показывают, что дожди, получая водяной пар из вторичного источника влаги, обогащаются тяжелыми изотопами и характеризуются меньшим d по сравнению со снегом. Образцы снега характери-

зуются точками, расположенными близко к ГЛМВ (рис. 1), что указывает на происхождение осадков из первичного источника влаги. Снежные осадки характеризуются относительно высокими значениями d по сравнению с дождевыми из-за неравновесной конденсации во время роста снежинок. Высокие значения d связаны с интенсивным испарением с поверхности океанов в течение зимы [9].

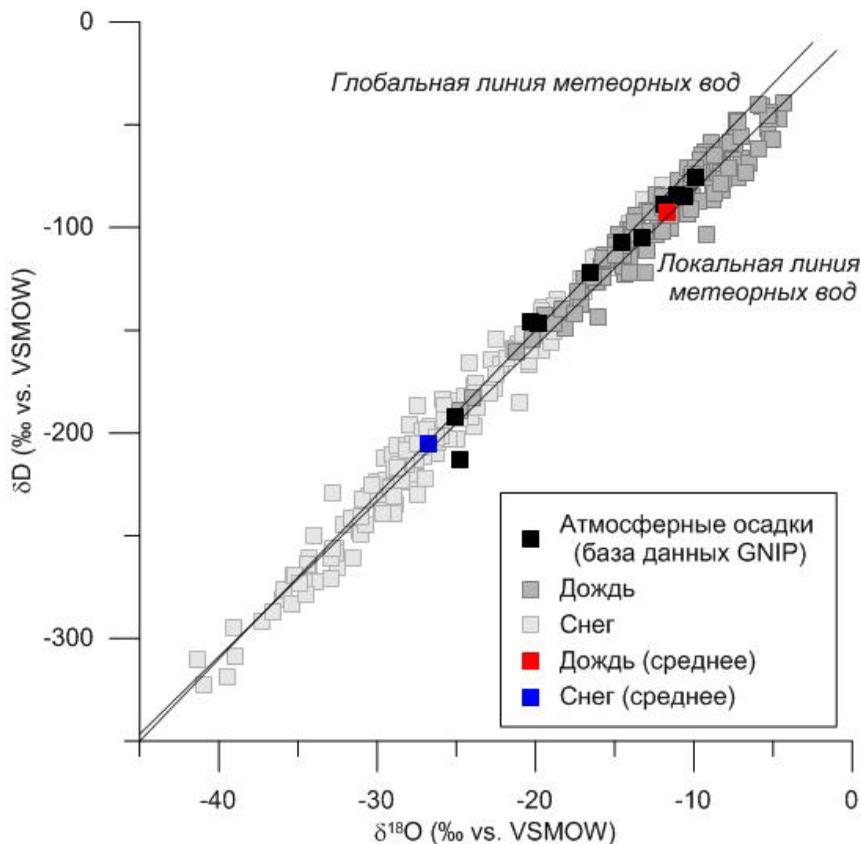


Рис. 1. Изотопный состав атмосферных осадков, выпадающих в Байкальском регионе (г. Иркутск, 2011–2017 гг.)

В таблице 1 представлены рассчитанные средние значения средневзвешенных месячных осадков. Локальная линия метеорных вод, основанная на рассчитанных средневзвешенных месячных значениях, описывается уравнением $\delta D = 7,7 \cdot \delta^{18}O + 0,7$ ($n = 55$; $r^2 = 0,99$).

Таблица 1

Средние значения средневзвешенных месячных осадков
(г. Иркутск, 2011–2017 гг.)

Месяц	n	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	d (‰)
Январь	5	-30,0	-232,1	+8,6
Февраль	5	-27,0	-214,8	+1,9
Март	4	-21,8	-168,6	+6,1
Апрель	4	-15,3	-113,3	+9,1
Май	3	-13,3	-104,0	+2,4
Июнь	5	-12,7	-102,7	-0,7
Июль	5	-11,0	-84,6	+2,7
Август	5	-12,1	-90,0	+6,0
Сентябрь	5	-14,9	-113,9	+5,5
Октябрь	5	-22,4	-166,9	+11,8
Ноябрь	4	-25,4	-192,6	+10,3
Декабрь	5	-28,8	-221,0	+9,1

Изотопный состав атмосферных осадков определяется, в первую очередь, температурой [5; 14]. Линейная зависимость между средневзвешенными месячными значениями и среднемесячными температурами воздуха ($n = 55$) имеет следующий вид: $\delta^{18}\text{O} = 0,5 \cdot t_{\text{возд}} - 20$ ($r^2 = 0,85$) и $\delta\text{D} = 3,9 \cdot t_{\text{возд}} - 154$ ($r^2 = 0,85$). Рассчитанные коэффициенты и «свободные члены» уравнений несколько ниже, чем значения полученные ВМО [5], отражая континентальный эффект. Ранее для г. Иркутска Seal и Shanks [15] рассчитали $\delta^{18}\text{O}/t_{\text{возд}}$ коэффициент 0,36 ‰/°C. Полученный нами набор данных позволяет утверждать, что рассчитанный температурный коэффициент 0,5 ‰/°C является более надежным и репрезентативным, поскольку: (1) представляет собой типичный коэффициент для внутриконтинентальных станций [14] и удовлетворительно согласуется с коэффициентами для других близлежащих континентальных регионов (например, Центральной Якутия) [4]; (2) он рассчитан на основании данных за целый год в отличие от коэффициента 0,36 ‰/°C ($n = 14$), охватывающего только 11 месяцев; (3) температурные коэффициенты, рассчитанные для каждого отдельного года в период с 2011 по 2017 г., изменяются в интервале от 0,44 до 0,54 ‰/°C.

Количество атмосферных осадков (P) и относительная влажность воздуха (rH) не оказывают заметного влияния на величину изотопного сигнала осадков в г. Иркутске, что убедительно подтверждается низкими коэффициентами корреляции (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между изотопными ($\delta^{18}\text{O}$, δD и d) и метеорологическими rH , P , $t_{\text{возд}}$ параметрами г. Иркутска на основе средневзвешенных месячных значений

Параметр	P (мм)		rH (%)		$t_{\text{возд}}$	
	коэффициент	r^2	коэффициент	r^2	коэффициент	r^2
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	0,10	0,26	-0,27	0,16	0,50	0,85
δD (‰)	0,78	0,27	-2,07	0,15	3,91	0,85
d (‰)	-0,02	0,01	0,12	0,04	-0,13	0,08

Изменения в изотопном составе атмосферных осадков обусловлены не только локальными температурами конденсации [5], но также происхождением и траекториями поступления воздушных масс в регион [11]. Обратные 5-дневные (120 часов) траектории движения воздушных масс, обуславливающих выпадение атмосферных осадков в регионе, на каждую конкретную дату отбора образцов представлены на рисунке (рис. 2). Рисунок демонстрирует широкое распределение траекторий движения, охватывающих территорию от Северного Ледовитого океана на северо/северо-западе до Северного Китая и Монголии на юге. Воздушные массы с востока поступают очень редко: всего 4 случая за период мониторинга. Подавляющее большинство воздушных масс имеет западное происхождение, что удовлетворительно соответствует общей циркуляции в Восточной Сибири и результатам региональных исследований [1–4]. Для идентификации источников атмосферной влаги все обратные траектории были объединены в четыре основных кластера (рис. 2). Около 77 % всех осадков, выпадающих в регионе, обусловлены воздушными массами, поступающими с запада (кластеры 1–3), включая Европу, западную часть России и северный Казахстан. Около 23 % осадков поступают с севера Сибири (кластер 4). Среди четырех выявленных основных направлений движения атмосферной влаги два имеют довольно длинные, а два относительно короткие траектории (рис. 2). Осадки с длинными траекториями, транспортируемые с запада (кластер 1) и северо-запада (кластер 2), характеризуются очень близкими средними значениями $\delta^{18}\text{O}$ около -21 ‰ и δD около $-162,5$ ‰ (d около $+5,8$ ‰). Однако осадки, отнесенные к кластерам 1 и 2, имеют различные источники влаги (рис. 2).

Кластер 1 включает воздушные массы, которые могут происходить из Арало-Каспийского региона. Напротив, кластер 2 включает в себя многочисленные воздушные массы, образующиеся над Атлантическим океаном. Траектории воздушных масс, имеющих, скорее всего,

локальный характер, значительно короче и объединены в кластеры 3 и 4 (рис. 2).

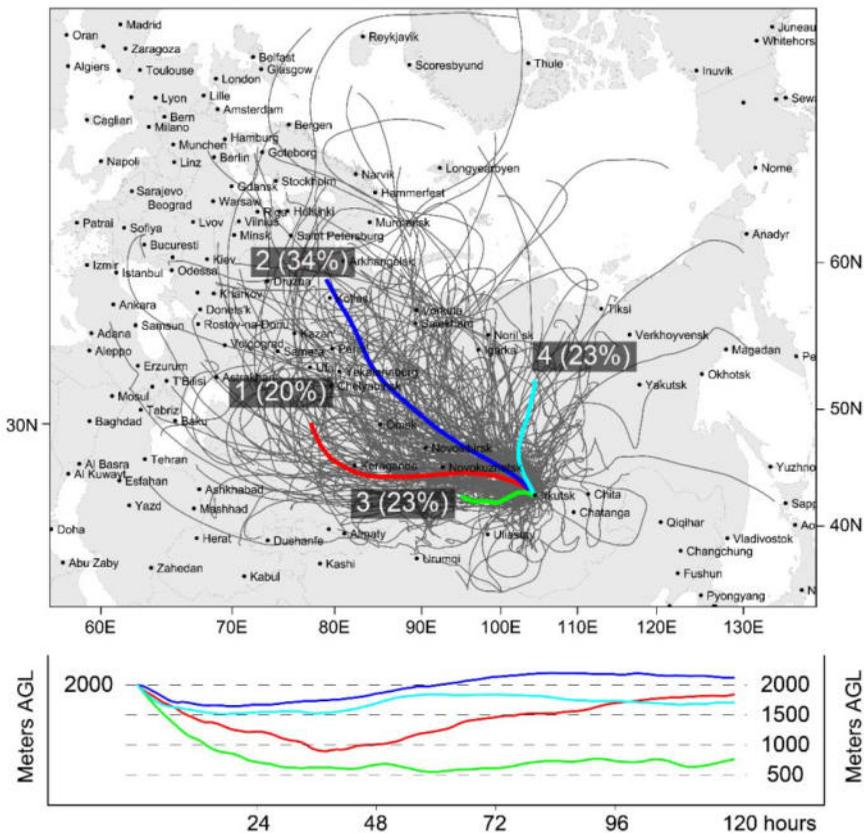


Рис. 2. Обратные траектории движения воздушных масс на изобарической поверхности 850 гПа для всех отобранных образцов атмосферных осадков ($n = 284$) за период с июня 2011 г. по апрель 2017 г. Четыре основных кластера обратных траекторий для осадков, достигающих г. Иркутск, включая их вертикальный профиль

Атмосферные осадки из кластера 3 характеризуются самыми высокими средними значениями $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta\text{D} -15,4 \text{ ‰}$ и $-118,5 \text{ ‰}$, соответственно, ($d = +5,1 \text{ ‰}$) и приходят в Иркутск с юго-запада. Эти, так называемые южные циклоны, формируются на полярном фронте южнее 50° с. ш. над Монголией, когда холодный арктический воздух встречается с теплым и влажным воздухом из субтропиков [1]. Однако субтропические воздушные массы, формирующиеся над Индийским и/или Тихим океаном, достигая центральную часть континента, значи-

тельно трансформируются и теряют влагу [2]. Кластер 4 включает воздушные массы с относительно легким изотопным составом ($\delta^{18}\text{O} = -19,5 \text{ ‰}$; $\delta\text{D} = -152,5 \text{ ‰}$; $d = +3,4 \text{ ‰}$), поступающие с севера и сформировавшиеся над акваториями Карского моря и моря Лаптевых.

Кроме того, анализ траекторий и изотопных данных показал, что атмосферные осадки с самыми низкими средними значениями $\delta^{18}\text{O}$ и δD ($-34,1 \text{ ‰}$ и $-269,1 \text{ ‰}$; $d = +5,3 \text{ ‰}$) поступают в Иркутск зимой с севера, с акватории Северного Ледовитого океана. Тогда как атмосферные осадки, имеющие самый тяжелый изотопный состав ($\delta^{18}\text{O} = -6,9 \text{ ‰}$; $\delta\text{D} = -59,2 \text{ ‰}$; $d = -4,1 \text{ ‰}$), поступают летом с запада и происходят из вторичного источника влаги, расположенного на континенте.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания ИГХ СО РАН IX.127.1.2. «Эволюция экосистем Внутренней Азии в позднем кайнозое – экологический сценарий», а также является частью экологической программы международного междисциплинарного проекта «Индивидуальные жизненные истории в долгосрочных изменениях культуры: охотники-собиратели голоцена в Северной Евразии» (Партнерский грант SSHRC № 895-2018-1004).

Список литературы

1. Латышева И. В., Синокович В. Н., Чумакова Е. В. Современные особенности гидрометеорологического режима южного побережья оз. Байкал // Изв. ИГУ. Сер. Науки о Земле. 2009. Т. 2, № 2. С. 117–133.
2. Марченко О. Ю., Мордвинов В. И., Бережных Т. В. Экстремальная водность р. Селенга и особенности летней циркуляции атмосферы // Метеорология и гидрология. 2012. № 10. С. 81–93.
3. Осипова О. П., Осипов Э. Ю. Атмосферные циркуляционные механизмы и их связь с процессами таяния ледников Байкальского хребта // География и природ. ресурсы. 2016. № 5. С. 15–19.
4. Изотопный состав и источники атмосферных осадков в Центральной Якутии / Т. С. Папина, Н. С. Малыгина, А. Н. Эйрих, А. А. Галанин, М. Н. Железняк // Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 2. С. 60–69.
5. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. Vol. 16. P. 436–468.
6. Draxler R. R., Rolph G. D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>) / NOAA Air Resources Laboratory. Silver Spring, MD, 2015.
7. Fernandoy F., Meyer H., Tonelli M. Stable water isotopes of precipitation and firn cores from the northern Antarctic Peninsula region as a proxy for climate reconstruction // The Cryosphere. 2012. Vol. 6. P. 313–330.
8. IAEA/WMO. Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser> (дата обращения: 10.07.2018).
9. Jouzel J., Merlivat L. Deuterium and oxygen-18 in precipitation: modelling of the isotopic effects during snow formation // Journal of Geophysical Research. 1984. Vol. 89. P. 11749–11757.
10. The last glacial maximum and late glacial environmental and climate dynamics in the Baikal region inferred from an oxygen isotope record of lacustrine diatom silica / S. S. Kostrova, H. Meyer, B. Chapligin, P. E. Tarasov, E. V. Bezrukova // Quaternary International. 2014. Vol. 348. P. 25–36.

11. Kurita N. Origin of Arctic water vapor during the ice-growth season // *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38 (L02709).
12. Panigarh cave stalagmite evidence of climate change in the Indian Central Himalaya since AD 1256: Monsoon breaks and winter southern jet depressions / F. Liang, G. A. Brook, B. S. Kotlia, L. B. Railsback, B. Hardt, H. Cheng, R. L. Edwards, S. Kandasamy // *Quaternary Science Reviews*. 2015. Vol. 124. P. 145–161.
13. Influence of regional precipitation patterns on stable isotopes in ice cores from the central Himalayas / H. Pang, S. Hou, S. Kaspari, P. A. Mayewski // *Cryosphere*. 2014. Vol. 8. P. 289–301.
14. Rozanski K., Araguás-Araguás L., Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation // *Climate Change in Continental Isotope Records*. American Geophysical Union. 1993. P. 1–36.
15. Seal R. R., Shanks W. C. Oxygen and hydrogen isotope systematics of Lake Baikal, Siberia: implications for paleoclimate studies // *Limnology and Oceanography*. 1998. Vol. 43. P. 1251–1261.

УДК 551.501.7

Опорная сеть радиозондирования

Н. Н. Крестьяникова (ntcr.krestyanikova@mail.ru)

Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, г. Долгопрудный

Аннотация. Опорная аэрологическая сеть ГРУАН создается в ответ на претензии климатического сообщества к однородности временных рядов данных радиозондирования для получения референсных аэрологических данных. Включение аэрологической станции Долгопрудный в состав сети ГРУАН требует выполнения определенных обязательств, установленных ВМО. В работе приведены сведения о состоянии сертификации АЭ Долгопрудный в качестве станции ГРУАН, необходимых условиях и перспективах решения данной задачи.

Ключевые слова: опорная аэрологическая сеть, валидация, прослеживаемость, сертификация.

Введение. О создании сети ГРУАН

Аэрологическая сеть Росгидромета включает в себя более 115 станций и охватывает самую большую территорию. С момента основания Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО) обеспечивала работы по разработке методик и средств измерений, нормативных документов, контролю и надзору, обязательной сертификации, государственному регулированию обеспечения единства измерений при проведении аэрологических измерений. В 1995–1997 гг. на базе испытательной лаборатории ЦАО проводились сравнительные испытания датчиков влажности радиозондов [1]. В этих испытаниях приняли участие 15 стран (фирм-производителей радиозондов). По результатам международных сравнений страны-участницы подошли к пониманию необходимости создания как образцового зонда, так и опорной (образцовой) сети зондирования атмосферы. Сотрудники ЦАО были

фактически у истоков создания подобной сети, но из-за начавшейся перестройки и постоянного отсутствия финансирования, на долгое время выпали из этого процесса. В то время, как коллеги из Линденбергской метеорологической обсерватории (в настоящее время Ведущий центр) совместно с ВМО организовали подобную сеть, которая теперь имеет название ГРУАН (название состоит из двух аббревиатур: GCOS Reference Upper-Air Network – ГСНК опорной аэрологической сети).

Опорная аэрологическая сеть ГРУАН создается в ответ на претензии климатического сообщества к однородности временных рядов данных радиозондирования для получения референсных аэрологических данных (в первую очередь – температуры и влажности), пригодных для климатических нужд на долгосрочную перспективу. Создание сети ГРУАН в ВМО можно сравнить с созданием системы метрологии в Росстандарте.

Основные принципы наблюдений в ГРУАН: обеспечение наблюдений на длительный период, валидация спутниковых наблюдений, прослеживаемость наблюдений к единицам СИ или принятым стандартам, исчерпывающие анализ ошибок и оценка неопределенностей (погрешностей) для каждого конкретного измерения (для радиозондирования – на каждом уровне в каждом выпуске), сохранение всех сырых данных, обеспечение возможности ретроспективной обработки, исчерпывающее описание метаданных, прозрачные алгоритмы обработки с открытым исходным кодом, документирование, в том числе публикациями в реферируемых журналах, инструментов и источников ошибок, процедуры наблюдений, алгоритмов обработки, независимая валидация (например, с использованием взаимосравнений или избыточных наблюдений с применением других методов), тщательный менеджмент изменений, включая переходы с одного типа инструментов на другой, документированные сбор (с помощью специализированного Клиента – ПО, разрабатываемого Ведущим центром) и централизованное хранение результатов наблюдений) [2].

С учетом специфики диапазонов измерений температуры, влажности и давления, отсутствия возможности применения эталонов в реальных условиях измерений, наличия влияющих факторов, переводящих эти измерения в разряд косвенных, одноразового применения средств измерений, подразделения Росстандарта не могут выполнять эти работы в полном объеме. Качество получаемых данных зондирования определяется не только основными погрешностями измерений (записанными в свидетельствах на тип СИ, выдаваемых Росстандартом), но и сопоставимыми, а то и превосходящими их по величине,

дополнительными погрешностями от влияния солнечной радиации, температуры, давления, осадков, обдува и т. п.

Российские системы радиозондирования, разработанные в последние 20 лет, не участвовали в международных сравнениях радиозондов ВМО. Качество данных зондирования отечественных систем оставляет желать лучшего. В связи с этим, отсутствие станции ГРУАН в России может привести в будущем к обсуждению на уровне ВМО вопросов о недостаточно высокой точности данных аэрологических наблюдений, произведенных над территорией России, для обеспечения безопасности полетов. В 2015-2016 гг. были проанализированы нормативные материалы по организации и функционированию опорной сети радиозондирования ГСНК ГРУАН и порядку подачи заявки и прохождения процедуры сертификации станции-кандидата, полученные от Секретариата ГСНК, Рабочей группы ГРУАН ГСНК и Головного центра ГРУАН [1; 2]. Подготовлены и направлены в Ведущий центр ГРУАН в обсерватории Линденберг предложения по программе наблюдений на станции опорной сети радиозондирования (сети ГСНК ГРУАН), создаваемой на базе аэрологической станции Долгопрудный.

Состояние сети ГРУАН. Требования

Глобальная система наблюдений за климатом (ГСНК) была учреждена в 1992 г. для обеспечения производства наблюдений и информации, необходимых для рассмотрения вопросов, связанных с климатом, и их доведения до всех потенциальных пользователей. ГСНК является долгосрочной ориентированной на пользователей оперативной системой для обеспечения всесторонних наблюдений, необходимых для мониторинга климатической системы, обнаружения и объяснения изменения климата, оценки последствий изменения и изменчивости климата, а также для поддержания исследовательской деятельности, направленной на улучшение понимания и предсказания климатической системы. Она занимается всей климатической системой в целом, включая физические, химические и биологические ее свойства, а также процессами, происходящими в атмосфере, океанах, на суше и в криосфере.

В настоящее время в мире работают 9 сертифицированных станций ГРУАН (рис. 1).

GCOS Reference Upper-Air Network



Рис. 1. Распределение и статус станций сети ГРУАН

На основании обращения Росгидромета в Секретариат ГСНК ВМО ведущий центр ГРУАН (Метеорологическая обсерватория Линденберг) включил станцию Долгопрудный в число станций-кандидатов в сеть ГРУАН.

Для проведения сертификации, кроме отмеченных выше основных принципов наблюдений в ГРУАН, необходимо обеспечить выполнение минимальных требований к программе станции ГРУАН:

- еженедельное радиозондирование радиозондом повышенной точности – температура и давление до 30 км, влажность – в тропосфере;
- по возможности ежемесячно (если их нельзя заменить наблюдениями на других станциях ГРУАН) измерения профиля распределения водяного пара на высотах до ~30 км (по предложению Ведущего центра ГРУАН – для станции Долгопрудный первоначально хотя бы раз в квартал);
- наблюдения интегрального содержания водяного пара (ИСВП), как минимум, дважды в неделю.

Целевыми показателями эффективной работы станции ГРУАН является также выполнение оптимальных требований к программе станции ГРУАН:

- 4-разовое радиозондирование радиозондом повышенной точности – температура и давление до 30 км, влажность – в тропосфере;

- ежемесячные измерения профиля распределения водяного пара на высотах до ~30 км;
- ежечасные наблюдения интегрального содержания водяного пара (ИСВП);
- еженедельные измерения вертикального профиля озона

На рисунке 2 приведен состав основного оборудования станции ГРУАН. При этом приоритет № 1 – это измерения водяного пара, температуры, давления и ветра, а ко второму приоритету относятся измерения озона, облачности, аэрозоля, радиационных потоков и т. п.

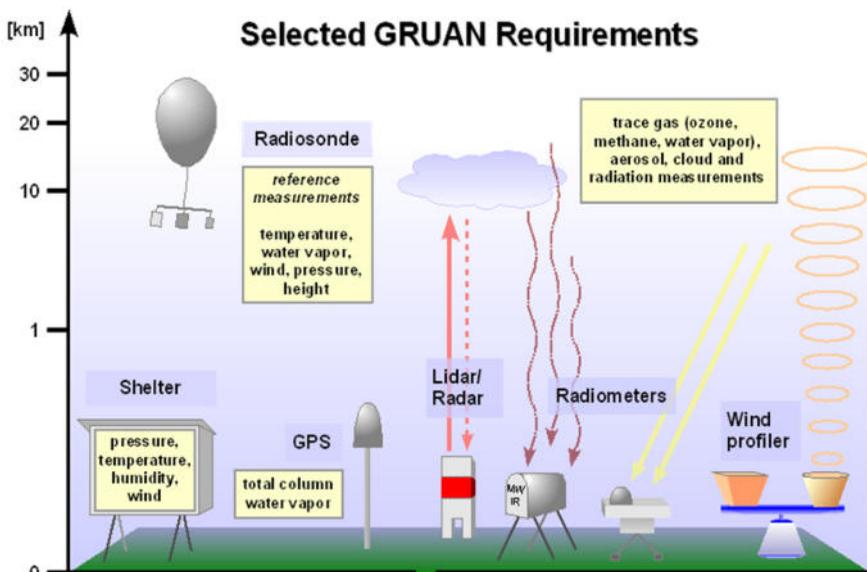


Рис. 2. Состав основного оборудования станции ГРУАН

Достижение целевых показателей. Перспективы

В настоящее время техническое оснащение станции Долгопрудный – кандидата на включение в состав сети ГРУАН может соответствовать минимальным требованиям. Может проводиться еженедельное радиозондирование радиозондами повышенной точности (Вайсала, RS41) – температура и давление до 30 км, влажность – в тропосфере. Также может проводиться ежемесячное зондирование профиля распределения водяного пара на высотах до ~30 км. Однако для этого необходимо выделение специального финансирования для закупки соответствующих радиозондов и приборов. Обеспечены наблюдения

интегрального содержания водяного пара (ИСВП), как минимум, дважды в неделю. В эксплуатации с 2012 г имеется приемник ГНСС геодезического класса Javad Sigma-G3T GNSS (отсчеты 1, 10 1/с), антенна – JAV_RINGANT-G3T, АМС МК26 (1/мин), идентификатор ГНСС DOLG, идентификатор MCB3 12379M001.

Для обеспечения целевых показателей эффективной работы сети ГРУАН на станции Долгопрудный также имеются соответствующие заделы. Могут быть обеспечены 4-разовое радиозондирование радиозондом повышенной точности – температура и давление до 30 км, влажность – в тропосфере, ежемесячные измерения профиля распределения водяного пара на высотах до ~30 км. Проводятся ежечасные наблюдения интегрального содержания водяного пара (ИСВП), а также еженедельные измерения вертикального профиля озона. Кроме того, в ЦАО имеется комплекс «Микрорадком», обеспечивающий фактически непрерывные наблюдения профиля температуры и влажности в тропосфере до высот 10 км.

В соответствии с полученными от Ведущего центра ГРУАН в обсерватории Линденберг рекомендациями в соответствии с документами ГРУАН GRUAN-TN-3 и GRUAN-TD-6 были собраны необходимые метаданные и подготовлены учетные карточки новой станции ГРУАН, как для пункта наблюдений Долгопрудный в целом, так и для подсистемы наблюдения за интегральным содержанием водяного пара по данным сигналов ГНСС.

В 2018 г., в рамках выполнения работ по подготовке к сертификации станции ГРУАН Долгопрудный, ЦАО продолжила реализацию проекта создания и сертификации опорной станции аэрологического зондирования. Организовано еженедельное зондирование атмосферы спаренными выпусками радиозондов: сетевой зонд и зонд высокой точности. Получены результаты тестовых наблюдений, организована передача данных по программе ГРУАН. Подготовлен ежегодный отчет для Ведущего центра ГРУАН [4].

Сертификация станций ГРУАН является длительной процедурой, в ходе которой оценивается выполнение станцией программы наблюдений (непрерывность и устойчивость наблюдений, соблюдение установленных оперативных процедур, менеджмент изменений) на протяжении 2–3-х лет. Для обеспечения стабильной работы станции ГРУАН Долгопрудный в срочном режиме необходимо положительное решение вопросов финансирования.

Организация российской станции ГРУАН позволит обеспечить весомый вклад Российской Федерации в исследования климата сво-

бодной атмосферы. В результате проведения работ будут обеспечены сбор и представление в Госфонд климатических рядов высокоточных данных, получаемых с российских и зарубежных станций ГРУАН, проведение сравнительных выпусков эталонных радиозондов и новых радиозондов российских производителей, претендующих на получение свидетельства на тип средства измерений. Выполнение стандартов и получение сертификата ГРУАН позволит Росгидромету участвовать в проекте «Метрология для метеорологии» – совместном проекте Европейской ассоциации метрологических служб, направленному на метрологическое обеспечение важнейших климатических переменных, действующему в рамках соглашения между ВМО и Международным бюро мер и весов, что также может оказаться важным при оформлении соглашения о сотрудничестве между Росгидрометом и Росстандартом. В результате будет обеспечено участие ЦАО, как базовой организации Метрологической службы Росгидромета, в сертификации и метрологическом надзоре за состоянием производства радиозондов, что позволит существенно повысить качество аэрологических данных.

После сертификации станции Долгопрудный работы по созданию станций ГРУАН в России могут быть продолжены с целью сертификации дополнительных аэрологических станций в качестве сети станций ГРУАН.

Список литературы

1. The WMO Radiosonde Humidity Sensor Intercomparison / A. Balagurov, A. Kats, N. Krestyannikova, F. Schmidlin // Final Report of Phase I and Phase II, report No 85. WMO. 2006. 88 p.
2. *World Meteorological Organization*. The GCOS. Reference Upper-Air Network (GRUAN) MANUAL. GCOS-170. 2013. 17 p.
3. *World Meteorological Organization*. The GCOS. Reference Upper-Air Network (GRUAN) GUIDE. GCOS-171. 2013. 122 p.
4. *World Meteorological Organization*. 2018. GCOS-220. Report of the Tenth GCOS Reference Upper Air Network Implementation and Coordination Meeting (GRUAN ICM-10) Potsdam, Germany 2018. 23–27 April. 62 p.

УДК 551.510.42

Газоанализаторы на основе полупроводниковых сенсоров для определения концентрации атмосферных загрязнителей

А. К. Поздова (alipozd@yandex.ru)

П. И. Сердюк (serdukpavel1995@yandex.ru)

Научно-исследовательский институт точной механики, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Рассматривается метод обнаружения опасных концентраций атмосферных загрязнителей, основанный на применении полупроводникового сенсора.

Ключевые слова: течеискатель, газоанализатор, полупроводниковый сенсор, контроль воздуха, атмосферные загрязнители.

Состав атмосферы и опасные примеси

Естественный состав атмосферы формировался на протяжении всего длительного периода существования планеты Земля. При этом первоначально антропогенные воздействия на атмосферу отсутствовали полностью или были пренебрежимо малы. В результате течения сложных физических, химических, биосферных процессов сформировался приземный слой атмосферы практически постоянного состава, включающий два вида газов: постоянные газы и переменные газы. К первым относятся: азот (около 78 % по объему), кислород (около 21 %), благородные газы (около 1 %). К переменным газам относятся: водяной пар (до 3 %), углекислый газ (0,02–0,04 %), озон ($\approx 10^{-6}$ %).

Контроль качества воздуха является необходимым условием существования современной промышленной цивилизации. Несоответствие воздуха требуемым нормам делает затруднительными работу предприятий и само существование человека. В связи с этим происходит постоянный поиск новых и совершенствование имеющихся методов измерения атмосферных загрязнителей, способных решить большинство задач по определению качества воздуха как в помещениях, так и на открытом пространстве.

Химически активными газовыми примесями в атмосферном воздухе и их источниками могут быть:

- NO_x (выбросы автотранспорта (особенно двуокиси азота (NO_2)));
- Cl_2 , HCl и др. (предприятия химической промышленности, микроэлектроники, цветной металлургии);

- СО (продукт неполного сгорания топлива, такого как природный газ, уголь или древесина);
- СО₂ (образуется от источников сгорания и выделяется при дыхании);
- летучие органические соединения (Лос): подразделяются на отдельные категории – метановые (СН₄) и неметановые (Нмлос). СН₄ – газ, который создает эффект парника и ведет к глобальному потеплению. К категории Нмлос относятся ароматические соединения, такие как бензол, толуол и ксилол которые являются канцерогенами;
- формальдегид (НСНО) (образуется вследствие выделения летучих соединений из строительных материалов. Допустимая концентрация формальдегида в России в воздухе жилых зон до 0,01 мг/м³. Уже при 0,04 мг/м³ начинает снижаться скорость выдоха у детей (начинается бронхоспазм). Поэтому необходимы датчики газа с возможностью измерять и обнаруживать столь малые концентрации);
- NH₃ (выделяется в различных процессах сельскохозяйственной деятельности. NH₃ используется в питании почвенных организмов и применяется в качестве добавок к удобрениям. В высоких концентрациях NH₃ крайне опасен для живых организмов);
- SOx: особенно двуокись серы (SO₂) (образуется вследствие вулканической деятельности и при различных производственных процессах. Поскольку уголь и нефть часто содержат соединения серы, их горение генерирует SO₂. Дальнейшее окисление SO₂ в присутствие катализатора, такого как NO₂, формирует H₂SO₄, и, таким образом, впоследствии приводит к кислотным дождям);
- твердые частицы (ТЧ) (образуются естественным путем от вулканов, пыльных бурь, лесных и луговых пожаров, живой растительности);
- аэрозоль (следствие соединения частиц и газа). Человеческая деятельность, горение твердого топлива в двигателях тяжелых транспортных средств (корабли, локомотивы), электростанциях, а также различные промышленные процессы производят значительное количество аэрозолей;
- отдельную роль играют экологические катастрофы, связанные с выбросом сверхтоксичного топлива (гидразин, диметилгидразин, нитрозодиметиламин, тетраметилгидразин и др.) в ходе запуска ракет-носителей.

Контроль параметров газовой среды

Согласно современным санитарным нормам, в число контролируемых параметров воздуха могут входить температура, влажность, концентрация углекислого газа (CO_2), озона (O_3), летучих органических веществ: углеводородов, альдегидов, спиртов, кетонов и других, а также уровень задымленности и запыленности [9]. Повышенный уровень мелких частиц в воздухе связан с такими опасностями для здоровья как заболевания сердца, нарушение функции легких и рак легких.

Список контролируемых параметров воздуха широк также для сельского хозяйства. Как для растениеводства, так и для животноводства температура, влажность и концентрация углекислого газа в воздухе играют ключевую роль. Выход этих параметров за пределы допустимых значений может оказать существенное влияние как на урожайность посевов, так и на поголовье скота. Дополнительно к этому списку добавляется контроль концентрации аммиака (NH_3) и сероводорода (H_2S), играющих важную роль в процессе обмена веществ растений и животных. В отличие от жилых и рабочих помещений, сельскохозяйственные ангары стараются размещать в зонах с меньшим уровнем экологического загрязнения.

Современные методы контроля опасных компонентов газовой среды предусматривают мониторинг с применением газоанализаторов (ГС), газоанализаторов (ГА) [4], течеискателей (ТИ) и систем обеспечения газовой безопасности на их основе [2; 5].

Основу ГС, ГА и ТИ составляют первичные преобразователи – сенсоры, определяющие физико-химические принципы построения данных приборов. В настоящее время рынок газочувствительных сенсоров представлен, в основном, полупроводниковыми (ПП), электрохимическими, оптическими и термокаталитическими сенсорами. Основные их фирмы – производители: Figaro Engineering Inc. (Япония), Nemoto & Co. Ltd (Япония), Applied Sensor (Великобритания), City Technology (Великобритания), Alphasense (Великобритания), Dynament (Великобритания), Membrapor (Швейцария), ООО «Дельта-С» (Россия), ООО «Электроточприбор» (Россия) и некоторые др. [10; 11].

Полупроводниковые сенсоры для контроля состояния атмосферы

АО «НИИ ТМ» занимается разработкой термокаталитических, полупроводниковых и оптических сенсоров. Термокаталитические и оптические сенсоры планируются к применению в системах пожаро-взрывопредупреждения на объектах ракетно-космической техники, опасных по водороду, кислороду и горючим газам.

В настоящее время широко используются мобильные станции контроля атмосферного воздуха. Одним из методов контроля состояния атмосферы в жилых зонах и вблизи предприятий является метод, основанный на применении ПП сенсоров, отличающихся высокой чувствительностью и быстродействием.

В отличие от термокаталитических и оптических сенсоров, серийное производство ПП сенсоров в России отсутствует, поэтому следует обратить внимание на перспективы их разработки [9].

Принцип действия ПП сенсоров основан на изменении состава анализируемой газовой среды (на хемосорбционном взаимодействии тестируемых газов с поверхностью и объемом полупроводникового слоя, приводящим к изменению концентрации электронов в зоне проводимости). Молекулы детектируемых газов, диффузионно поступающие в реакционную камеру, попадают на поверхность газочувствительного слоя, состоящего из оксида олова ($\text{SnO}_2 - \text{SnO}$), и реагируют с хемосорбированным кислородом [7].

В лаборатории газовой сенсорики АО «НИИ ТМ» ведутся разработки и исследования ПП сенсора, применяемого для обнаружения монооксида углерода (СО). На рисунке 1–3 показаны схемы сенсора и газочувствительного элемента (ГЭ). В таблице 1 приведены результаты определения характеристик сенсора при воздействии газа.

На рисунке 1 показана схема ПП сенсора, содержащего корпус 1.1 с установленным в нем ГЭ 1.2, который вклеен в реакционную камеру 1.3, имеющую объем (1–10) см³, изготовленную из полиамида и содержащую газопроницаемый элемент 1.4.

На рисунке 2 показана схема ГЭ, который состоит из нагревателя 2.1, имеющего форму спирали из платиновой проволоки и измерительного электрода 2.2, расположенного вдоль оси спирали нагревателя. На спираль нагревательного элемента нанесено керамическое покрытие, содержащее внутренний слой 2.3 из диоксида олова и наружный слой 2.4 из гамма-оксида алюминия. Наружный и внутренний слои содержат легирующую добавку (Pt) 2.5.

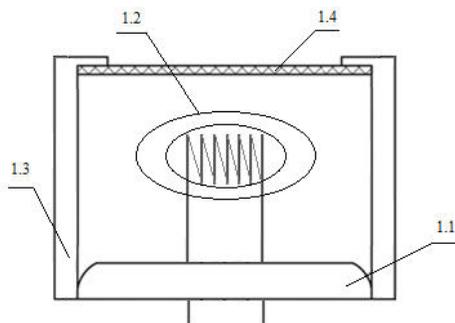


Рис. 1. Схема полупроводникового сенсора:
 1.1 – корпус ТО-5; 1.2 – ГЭ; 1.3 – реакционная камера (полиамид)
 толщина стенки 2 мм; 1.4 – газопроницаемый элемент

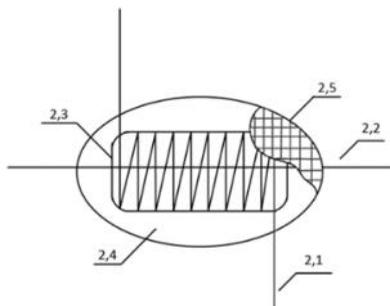


Рис. 2. Схема газочувствительного элемента:
 2.1 – нагревательный элемент; 2.2 – измерительный электрод;
 2.3 – полупроводниковый слой SnO_2 ; 2.4 – пористый слой гамма – Al_2O_3 ;
 2.5 – Легирующая добавка (Pt)

На нагревательный элемент подается импульсное напряжение питания:

- импульс нагрева (0,9 В) длительностью 5 с;
- импульс охлаждения (0,2 В) длительностью 15 с.

Полезный сигнал сенсора измеряется за 10–20 мс до начала импульса нагрева и обрабатывается электронной схемой (датчика, газоанализатора и др.)

Процесс измерения концентрации СО схематически представлен на рис. 3.

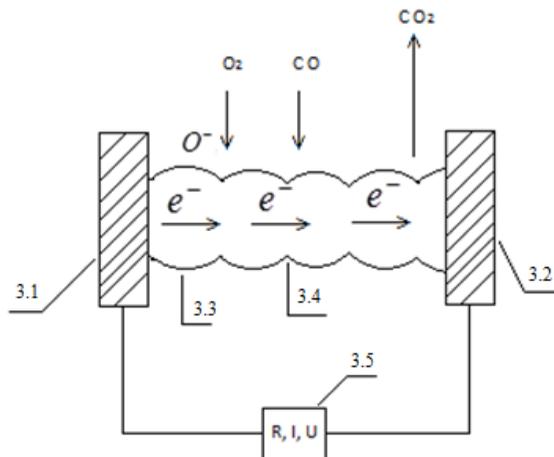
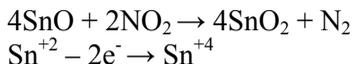
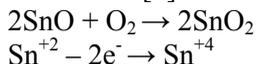
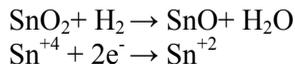
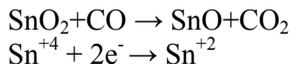


Рис. 3. Схема процесса измерения концентрации монооксида углерода:
 3.1 – электрод нагревателя; 3.2 – измерительный электрод; 3.3 – зерно SnO₂;
 3.4 – межзерненный контакт (зона проводимости);
 3.5 – устройство для измерения и обработки сигнала

При адсорбции газов-окислителей (O₂, O₃, F₂, Cl₂, NO₂ и др.) происходит обеднение электронами зоны проводимости, что приводит к росту энергетического барьера в области контакта частиц (зерен) полупроводникового слоя, уменьшению проводимости и увеличению сопротивления [3].



При адсорбции газов-восстановителей (H₂, CO, C_xH_y и др.) количество электронов на поверхности в области контакта растет, соответственно снижается энергетический барьер в зоне контакта частиц, увеличивается проводимость и снижается сопротивление газочувствительного слоя.



Определяемый газ путем диффузии через газопроницаемый элемент поступает в реакционную камеру и проникает через наружный пористый, химически инертный слой гамма – Al₂O₃ к поверхности нагретого внутреннего слоя SnO₂. При контакте с газом в слое SnO₂ протекает электрохимическая реакция и изменяются электрические параметры слоя, (сопротивление, проводимость, ток, напряжение), измеряемые между одним из контактов нагревателя и измерительным

электродом. Отношение значения параметра слоя SnO_2 на воздухе к его значению в среде анализируемого газа представляет собой сигнал сенсора ($R_{\text{возд. (ОМ)}} / R_{\text{газ (ОМ)}}$ и т. д.). Продукты реакции удаляются через газопроницаемый элемент в атмосферу.

Сенсор СО имеет следующие отличительные особенности:

1. Увеличенная по сравнению с аналогами площадь зоны проводимости при взаимодействии ГЭ с монооксидом углерода за счет увеличения числа витков спирали-нагревателя, при этом чувствительный элемент (ЧЭ) имеет эллипсоидную форму.

2. В качестве нагревателя и измерительного электрода сенсора использована платиновая проволока диаметром 0,03 мм (у аналогов 0,02 мм), что позволило создать механически прочную конструкцию на подвесе и существенно увеличить зону проводимости. Это позволило получить устойчивый и стабильный полезный сигнал при уменьшении потребляемой мощности относительно прототипа примерно в три раза.

3. В качестве катализатора использована мелкодисперсная платина (размер частиц до 100 нм). Катализатор готовится методом пропитки слоя платинохлористоводородной кислотой и последующей прокатки при температуре 400–500 °С. Применение данного катализатора повышает чувствительность сенсора по монооксиду углерода по сравнению с сенсором с нелегированным оксидом олова.

4. Сенсор имеет реакционную камеру, имеющую объем (1–10) см³, изготовленную из химически инертного материала-полиамида, следовательно, снижено влияние температуры окружающей среды на ЧЭ.

В таблице 1 приведены основные характеристики сенсора. Испытания сенсоров проводились на лабораторном стенде с использованием поверенных средств измерений и поверочных газовых смесей, имеющих сертификаты соответствия. Для газовой магистрали использовались материалы, исключающие проникновение в газовую смесь посторонних примесей.

Предлагаемый сенсор имеет малую потребляемую мощность, что является важным преимуществом данного сенсора при использовании:

- в системах газового мониторинга с большим количеством ЧЭ;
- в переносных портативных приборах на аккумуляторах.

Основными достоинствами ПП сенсора являются чувствительность к малым концентрациям токсичных и горючих газов, неограниченный срок хранения, широкий диапазон определяемых газов [3].

Однако имеются и недостатки: низкая селективность (может быть повышена введением легирующих добавок к полупроводниковому слою и подбором температурного режима); снижение чувствительности при воздействии отравляющих примесей (уменьшается при установке внешних фильтров-сорбентов); высокая зависимость от температуры (компенсируется программными методами). Для устранения данных недостатков ведутся работы по созданию низкоэнергопотребляющего ПП сенсора с более высоким уровнем чувствительности и более устойчивого к колебаниям температуры окружающей среды.

Таблица 1

*Сигнал при воздействии 100 ppm CO, мВ	Дрейф «О», мВ	**Отклонение сигнала в диапазоне температур (–10 – +40 °С), %	Отклонение сигнала в диапазоне отн.вл. (30–90 % отн. вл), %	Потребляемая мощность, мВт
600–800	10–30	± 25	± 25	38

ПП сенсоры применяются также для обнаружения метана. Разовая предельно допустимая концентрация метана в воздухе составляет не более 50 мг/м³. Попадая в организм, метан вытесняет кислород, в результате развивается гипоксия (кислородное голодание) всех тканей, и в наибольшей степени страдает центральная нервная система. Отравление метаном может быть острым, когда человек надыхался газом в результате аварии или неправильного обращения с газовыми приборами, а также во время длительного пребывания на заболоченной местности, в шахте. Для обнаружения его утечек, оценки уровня загазованности и выдачи звуковой и световой сигнализации при превышении установленных пороговых значений объемной доли газов используются разного вида ТИ. Особое внимание уделяется ТИ с ПП сенсором, имеющим взрывозащищенный корпус и продолжительное время непрерывной работы без подзарядки.

В 2018 г. была проведена проверка сенсоров АО «НИИ ТМ» для применения их в военной технике НПО «Прибор» (г. Санкт-Петербург) Ряд испытаний был направлен на определение чувствительности к метану, оксиду углерода и влиянию влажности на показания. Примечательно, что чувствительность сенсоров к СО во влажном воздухе составила 54 и 68 % (изменение сопротивления в воздухе по сравнению с сопротивлением в среде целевого газа), что незначительно отличается от показаний в сухом воздухе (61 и 77 % соответственно).

В 2019 г. были проведены испытания образцов сенсора в ЗАО НПП «Электронстандарт», результаты которых показали, что данный сенсор обеспечивает высокую чувствительность к метану

(диапазон измерений 10–10 000 ppm) и может быть использован в приборах производства ЗАО НПП «Электронстандарт». В табл. 2 представлены результаты измерения среднего значения напряжения на сенсоре СП-3 в зависимости от концентрации метана в сравнении с сенсором ДМП-1 (производства Белоруссии). Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности использования СП-3 (средний показатель напряжения превосходит аналог почти в 2 раза) в качестве ЧЭ в приборах, выпускаемых ЗАО НПП «Электронстандарт», в частности в ТИ горючих газов ТПП-11.

Таблица 2

Результаты измерения среднего значения напряжения на сенсоре СП-3 в зависимости от концентрации метана в сравнении с сенсором ДМП-1

Концентрация CH ₄ , ppm	10	40	60	70	130	300	700	1100
Изменение U _{СП-3} , мВ (±1 мВ)	3	7	9	12	16	30	45	80
Изменение U _{ДМП-1} , мВ (±1 мВ)	2	3	4	5	8	14	24	42

Известно, что свойства ПП сенсоров во многом зависят от размера частиц легирующих веществ [9]. Химический состав вещества, содержащего легирующую добавку, определяет исходный размер частиц, а температура и продолжительность термообработки – их конечный размер и химическую активность к определяемому газу [6].

Для повышения селективности, помимо метода с введением легирующих добавок применяется также метод, основанный на подборе рабочей температуры сенсора под определенный газовый компонент. Так, с применением импульсного режима питания обеспечивается селективность в смеси метан-монооксид углерода-воздух.

Одним из основных параметров сенсора является долговременная стабильность, так как стационарные средства газового мониторинга эксплуатируются в режиме непрерывной подачи питания. Для оценки долговременной стабильности был проведен эксперимент, в ходе которого опытные образцы выдерживались под напряжением в течение 90 суток при периодическом воздействии газовых смесей. Эксперимент показал изменение чувствительности сенсоров не более чем на 10 %.

Для улучшения характеристик сенсоров ведется работа по следующим направлениям:

1. Анализ зависимости уровня чувствительности и долговременной стабильности сенсоров от параметров газочувствительной структуры и от способа введения легирующей добавки.
2. Расширение диапазона определяемых концентраций.
3. Улучшение показателей селективности.
4. Определение критерия для предварительной оценки срока службы сенсоров при их эксплуатации и создание стенда для сортировки и отбраковки ЧЭ.

Газоанализатор для контроля малых концентраций опасных примесей

В настоящее время планируется работа по созданию прибора для контроля малых концентраций опасных примесей в атмосферном воздухе. Основной целью является разработка ГА для контроля содержания основных составляющих атмосферы (кислорода, диоксида углерода и паров воды), а также вредных примесей в атмосфере космических аппаратов, входящих в состав долговременных перспективных пилотируемых космических комплексов. Недостатками полупроводниковых газоанализаторов является низкая селективность и зависимость результатов измерений от концентрации кислорода в воздухе. Однако простота, малые масса, габариты и стоимость обусловили их широкое использование. Опытные образцы ПП сенсоров разработки АО «НИИ ТМ» проходят исследовательские испытания как в лаборатории АО «НИИ ТМ», так и на других предприятиях военного и гражданского профиля. С целью определения принципиальной возможности использования ПП сенсоров СП-1 в составе газоанализаторов АО «Экон» (г. Обнинск) для контроля СО в дымовых газах, проведена предварительная проверка работоспособности сенсоров в газовой смеси СО-кислород-азот. Проверка выявила существенное влияние содержания кислорода в смеси на показания сенсоров и подтвердила возможность их использования в составе опытных образцов газоанализаторов АО «Экон» для проведения дальнейших испытаний.

Не с проста первое десятилетие XXI в. называют «десятилетием сенсоров». В последние годы, сенсоры получали внимание людей как одно из важных устройств в электронных системах и огромных возможностей для обработки информации. Проводятся исследования для мониторинга загрязнения воздуха с помощью газовых датчиков. Конечная цель – запуск технологии массового производства многофункциональных газовых датчиков с низкой ценой. Полупроводниковые датчики газа имеют преимущества быстродействия, эффективности и

повышения селективности при использовании легирующих добавок. При создании датчиков на плечи разработчика ложится ряд не самых простых задач, в числе которых – обеспечение необходимого режима работы, учет колебаний температуры, влажности и атмосферного давления, считывание и обработка информации об измеряемом параметре и принятие решений на основе полученного значения. Совершенство полупроводниковых технологий открывает новые возможности для миниатюризации компонентов и реализации интегрированных решений для широкой номенклатуры изделий. Это приводит, с одной стороны, к удешевлению датчиков, а с другой – делает их более удобными и простыми в использовании.

Список литературы

1. Баника Ф. Г. Химические и биологические сенсоры: основы и применения. М.: Техносфера, 2014.
2. Развернутые газоаналитические приборные комплексы для обнаружения компонент ракетных топлив в окружающей среде / А. И. Белозерцев, О. В. Черемисина, С. З. Эль-Салим, В. В. Манойлов // Науч. приборостроение. 2017. Т. 27, № 2. С. 91–102.
3. Полупроводниковые газовые датчики отечественного производства / А. Р. Бестугин, А. А. Большаков, И. В. Сердюк, П. И. Сердюк, В. П. Хвеженко // Ж. Датчики и системы. 2018. № 12.
4. Бубнов Ю. З., Голиков А. В., Казак А. В. Полупроводниковые газовые сенсоры и газоаналитические приборы на их основе / Ж. Электроника. 2008. № 10.
5. ГОСТ 17.2.6.02-85 Охрана природы (ССОП). Атмосфера. Газоанализаторы автоматические для контроля загрязнения атмосферы. Общие технические требования.
6. Дрейзин В. Э., Брежнева Е. О. Сравнительный анализ характеристик промышленных газочувствительных датчиков // Ж. Датчики и системы. 2011. № 3.
7. Обвинцева Л. А. Полупроводниковые металлооксидные сенсоры для определения химически активных газовых примесей в воздушной среде / Ж. Рос. хим. журн. 2008. Т. LII, № 2.
8. Патент № 173 647 RU «Полупроводниковый сенсорный модуль с легированным газочувствительным слоем».
9. РД 52.88.699. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений, 2008.
10. Сердюк И. В., Смирнов М. С. Полупроводниковые газовые сенсоры для контроля концентраций горючих и токсичных газов // Вопр. радиоэлектроники. 2013. Вып. 1. С. 131–142.
11. Каталог «Датчики газа и газовые сенсоры». URL: <http://www.gassensor.ru/> (08.02.2019).
12. Каталог «Газовые сенсоры серии СЕНСИС-2000 и СЕНСИС-2010». URL: <http://www.deltapro.ru> (10.02.2019).

УДК 556.551:042

Особенности оценки прозрачности воды Ладожского озера по снимкам спутника Landsat-8

Н. А. Решин (reshinn@yandex.ru)¹С. А. Кагукина (skagukina@mail.ru)²Л. А. Тимофеева (tilarisa@gmail.com)¹А. Р. Баранова (barashr@mail.ru)¹¹ Российский государственный гидрометеорологический университет,

г. Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ГосНИОРХ») им Л. С. Берга),

г. Санкт-Петербург

Аннотация. В работе представлены результаты восстановления значений прозрачности воды Ладожского озера по многоканальным снимкам спутника Landsat-8 за 2016–2017 гг. Значения прозрачности получены по формулам, включающим отношения яркостей различных каналов. Восстановленные значения сравнены с данными экспедиционных измерений прозрачности с помощью диска Секки. Коэффициент корреляции между указанными значениями изменяется от 0,48 до 0,93 в зависимости от сцены и применённой формулы. Анализ результатов позволяет утверждать, что точность восстановления значений прозрачности зависит от пространственно-временной изменчивости гидробиологических процессов, во многом определяемой лимническими особенностями озера, погрешностей *in situ* измерений, от наличия облачности и несовпадения дат спутниковой съёмки и экспедиции.

Ключевые слова: диск Секки, мультиспектральные снимки, прозрачность, ArcGis.

Введение

Ладожское озеро – крупнейший пресноводный водоём Европы, безальтернативный источник водоснабжения Санкт-Петербурга и ряда населенных пунктов Ленинградской области и Республики Карелия. Озеро является судоходным, имеет важное рекреационное значение и на нём ведётся промышленное и любительское рыболовство. В результате антропогенной нагрузки на озеро и его водосбор качество воды может изменяться и требует пристального внимания. Оценка качества вод озера для их рационального использования и управления невозможна без комплексного мониторинга.

В настоящее время режимное изучение Ладожского озера ведет Северо-Западное управление Роскомгидромета. Лидером исследовательского мониторинга, необходимого для решения разнообразных научно-прикладных задач, является Институт озероведения РАН. В основном мониторинг ведется традиционно, инструментально в ходе

экспедиций, что не позволяет получить представление о мгновенном состоянии всей обширной акватории Ладоги, площадь которой составляет 18 329 км². Кроме того, озеро характеризуется выраженным неоднородным распределением глубин котловины (рис. 1), что, в свою очередь, определяет особенности его термического режима и физических и биологических процессов, протекающих в различных частях акватории не одинаково. В связи с этим, становится актуальной оценка параметров вод озера с помощью данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и компьютерных технологий.

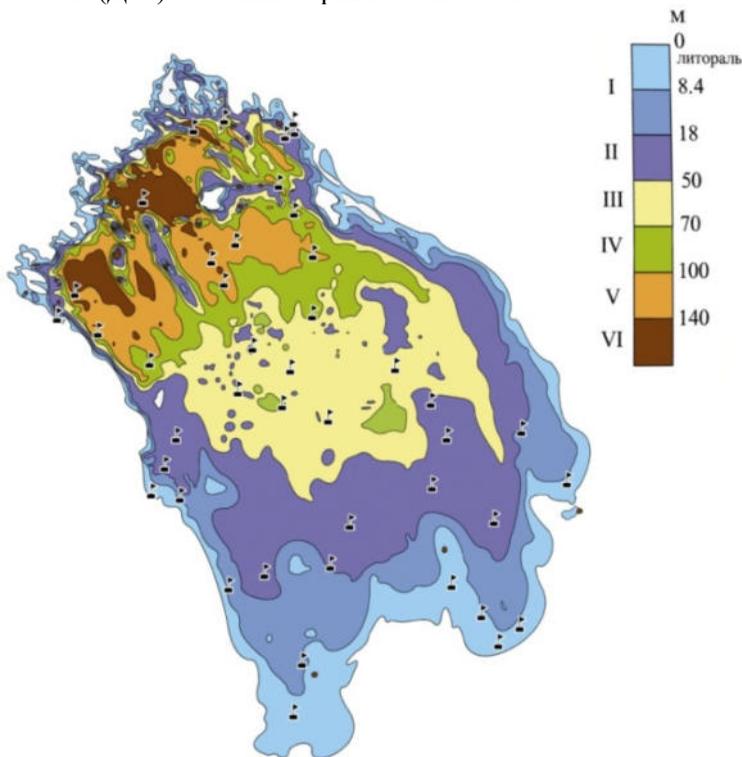


Рис. 1. Лимнические зоны Ладожского озера и станции наблюдений [1]

Дистанционное зондирование Земли может осуществляться наземными, авиационными и космическими средствами, оснащёнными различными видами съёмочной аппаратуры. В настоящее время наиболее востребованы спутниковые данные, что объясняется их доступностью и достаточно высоким пространственно-временным разрешением. Этими качествами обладают снимки спутника Landsat-8. Применение отношений яркостей различных каналов позволяет восстановить

по одному снимку значения нескольких параметров качества воды, включённых в программу научного мониторинга: содержание хлорофилла «а», температура поверхности воды и её прозрачность (мутность).

Прозрачность воды определяется её избирательной способностью поглощать и рассеивать световые лучи и зависит от условий освещения поверхности, изменения спектрального состава и ослабления светового потока, а также концентрации и характера живой и неживой взвеси. Прозрачность (или светопропускание) природных вод обусловлена их цветом и мутностью, т. е. содержанием в них различных окрашенных и взвешенных органических и минеральных веществ [4]. Определение прозрачности воды – обязательный компонент программ наблюдений за состоянием водных объектов.

Прозрачность воды измеряется обычно той глубиной (в м), на которой в воде перестаёт быть видимым белый диск диаметром 30 см (диск Секки). Этим путем И. В. Молчанов в свое время установил, что в Ладожском озере в течение года наблюдаются два максимума прозрачности воды: в конце лета, когда реки несут меньше всего взвешенных частиц, а планктон еще не начал отмирать, и зимой подо льдом, что связано с минимумом речного стока и отсутствием перемешивания воды под действием ветра. Прозрачность у западного побережья 2–2,5 м, у восточного побережья 1–2 м, в приустьевых участках 0,3–0,9 м, а к центру озера увеличивается до 4,5 м. Наименьшая прозрачность отмечена в загрязнённой воде Волховской губы (0,5–1 м), а наибольшая – к западу от Валаамских островов (летом 8–9, зимой свыше 10 м), где, благодаря такой высокой прозрачности, возможно развитие планктона до глубины 8–12 м. В южных мелководных зонах, где вегетация фитопланктона происходит с мая по октябрь и имеет место постоянное поступление речных вод, прозрачность постоянно не высокая [1; 2]. Пространственное распределение прозрачности зависит от времени года, определяющего периоды наибольшего стока воды с водосборного бассейна, температурный и ветровой режим, а также условия развития в озере микроорганизмов (планктона).

Эти закономерности, установленные в ходе многолетних инструментальных исследований Ладоги, были подтверждены по данным Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) за период 1998–2004 гг. [3]. Результаты исследования, представленные в статье, также хорошо согласуются с представлениями о пространственно-временных закономерностях изменения по акватории озера прозрачности и определяющих её факторов.

Методы и материалы

В исследовании использованы мультиспектральные снимки спутника Landsat-8 (OLI), действующего с 2013 г. Выбор обусловлен оптимальным сочетанием пространственного разрешения снимков и временной дискретности съемки, кроме того, они находятся в свободном доступе в формате TIFF совместно с метаданными о географической привязке (геореференцированный растр). Из базы данных USGS были отобраны сцены с минимальной облачностью. Затем в ArcGIS скомпонованы сцены, охватывающие всю акваторию озера, на дату, наиболее близкую к периоду экспедиций Института озераведения РАН. Всего использованы две сцены за сентябрь 2016 г. и две сцены за летний период 2017 г. Прозрачность воды измерялась с помощью диска Секки.

Оценивались значения яркости пикселей в спектральных ^{каналах}, представленных в табл. 1. Спектральные индексы широко и достаточно успешно используются для оценки параметров качества пресноводных водоёмов различных размеров: крупные объекты (Трихонис, крупнейшее озеро в Греции [12], озеро Бабе, самое большое во Вьетнаме [10], Иваньковское водохранилище (Московское море) на Верхней Волге, Россия [5], субальпийское оз. Изео, Италия [8], оз. Симко, Онтарио, Канада [9], и небольшие (озёра в штатах Мичиган [7], Мэн и Нью-Гемпшир, США [6], оз. Равал – водохранилище в Пакистане, обеспечивающее водой города Равалпинди и Исламабад [13], оз. Юлемисте – источник питьевой воды столицы Эстонии, г. Таллинн [11]).

Таблица 1

Спектральные каналы спутника Landsat-8

Спектральный канал	Длина волны, мкм	Разрешение канала (размер 1 пикселя), м
B2 – синий (Blue)	0,450–0,515	30
B3 – зелёный (Green)	0,525–0,600	30
B4 – красный (Red)	0,630–0,680	30

В представленных работах искомые параметры восстанавливались по различным соотношениям спектральных индексов. Авторами для оценки прозрачности были разработаны формулы, коэффициенты в которых соответствуют наилучшей связи между яркостями каналов и их отношением и подобраны методом множественной корреляции.

Лучшее соответствие между значениями, полученными по снимку за 21.07.2017 и измеренными на 43 станциях в ходе экспедиции 27.07–04.08.2017, наблюдается при использовании формулы:

$$\ln(DC) = 10,6*(B3/B4) + 2,6*10^{-3}*B4 + 7,3*10^{-4}*B2 - 0,84 \quad (1)$$

Коэффициент корреляции $R = 0,71$, средняя погрешность 15,7 %, максимальная – 50,4 %, минимальная – 0,1 %. Достаточно надёжные результаты обусловлены тем, что выбранная модель полнее учитывает оптические свойства воды в различных частях акватории и, следовательно, различной прозрачности.

Восстановленные значения, в целом, хорошо соответствуют многолетнему пространственно-временному распределению прозрачности [1; 2]. Это можно оценить с помощью карт пространственного распределения прозрачности, построенных с помощью ArcGIS (рис. 2, А и 1, А). Так, в июле минимальная прозрачность (менее 1 м) наблюдается в мелководных южных и восточных частях озера, в местах впадения рек Волхов, Сясь, Свирь. Кроме того, прозрачность незначительна вблизи устья р. Бурная. В глубоководной части, где, ввиду низкой температуры воды биологические процессы менее интенсивны, прозрачность воды достигает 3 м.

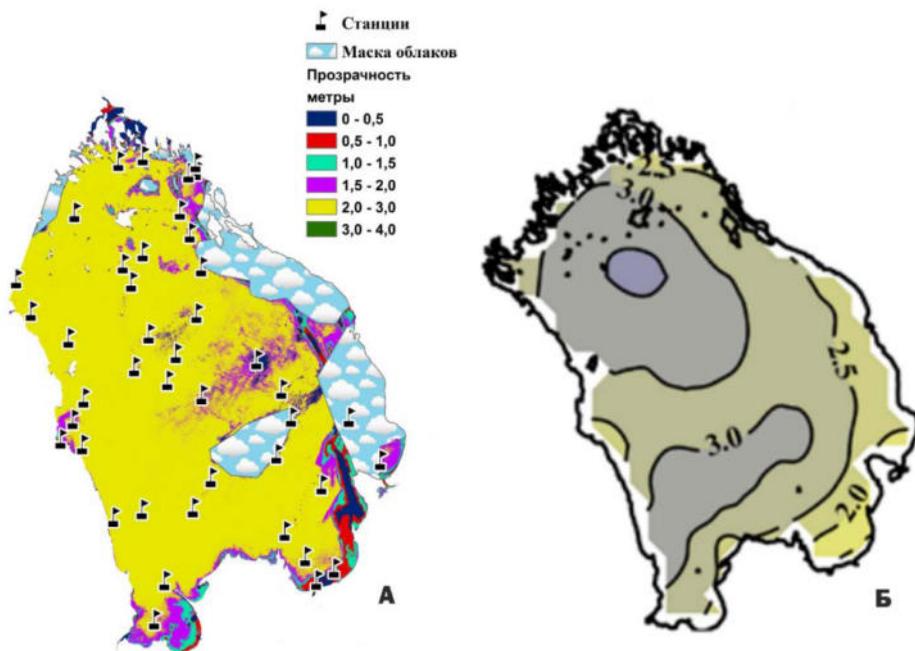


Рис. 2. Прозрачность воды Ладожского озера: (А) – восстановленная по формуле 1, 21.07.2017; (Б) – среднее многолетнее распределение в июле [1]

Наличие участка с незначительной прозрачностью в истоке р. Невы (Петровская губа) может быть объяснено следующим образом. Во-первых, в этом мелководном заливе активно развивается высшая водная растительность, и, следовательно, высоко содержание растворённых органических веществ. Во-вторых, значительное количество органических и минеральных веществ может приноситься в Петровскую губу прибрежным течением из устьевых участков р. Волхов [3] и с циклональным озёрным переносом от устья р. Вуокса.

С целью дополнительного апробирования алгоритма оценки прозрачности, исследование было продолжено с использованием результатов экспедиции, проходившей с 14 по 20 сентября 2016 г, в ходе которой прозрачность была измерена на 17 станциях. Используются две сцены Landsat-8, полученные 20 сентября 2016 г.

Наилучшее соответствие между восстановленными по снимку значениями прозрачности и соответствующими измеренными значениями было выявлено при использовании формулы, не включающей спектральную яркость канала В2:

$$\ln(\text{ДС}) = 1706 \cdot (B4/B3) + 0,25 \cdot B4 - 0,27 \cdot B3 - 1553 \quad (2)$$

Коэффициент корреляции $R = 0,93$, средняя погрешность составила 16,6 %, максимальная – 44,5 %, а минимальная – 3,3 %. Сравнение восстановленных по формуле (2) значений прозрачности с многолетними значениями показало, что несмотря на то, что часть снимка закрыта облаками, в целом полученная карта соответствует многолетнему пространственно-временному распределению прозрачности (рис. 3). Однако прозрачность в южной части озера, как по данным экспедиции, так и по спутниковым данным, ниже, чем среднее многолетние значения. Это может быть вызвано выносом взвешенных частиц реками Волхов и Сясь или другими особенностями рассматриваемого периода.

В сентябре в целом по акватории вода становится более прозрачной в связи с понижением температуры и замедлением биологических процессов.

Таким образом, изменение прозрачности воды Ладоги характеризуется пространственно-временными закономерностями, которые определяются озерными процессами, в том числе биологическими, а также поступлением взвешенных веществ со стоком впадающих в озеро рек.

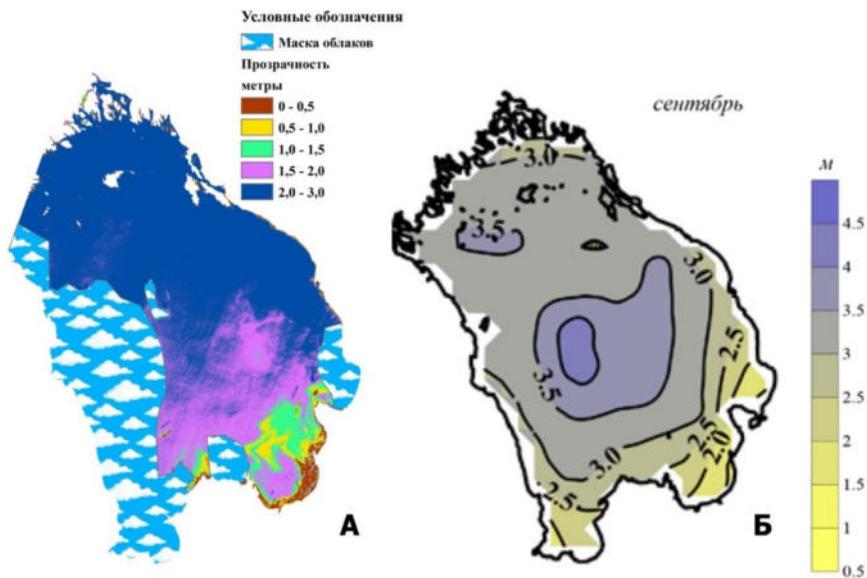


Рис. 3. Прозрачность воды Ладожского озера: (А) – восстановленная по формуле 2, 20.09.2016; (Б) – среднее многолетнее распределение в сентябре [1]

Выводы

Значения прозрачности Ладожского озера, измеренные в ходе двух экспедиций Института озероведения РАН, и восстановленные по снимкам Landsat-8 с использованием указанных формул хорошо соответствуют друг другу. Наименее точно удалось оценить прозрачность вблизи впадения р. Волхов, где она минимальна, а факторы, её обуславливающие, весьма изменчивы. На результаты восстановления могут отрицательно влиять:

- разница во времени между датами измерения и получения снимка, поскольку гидрооптическая ситуация за это время может измениться;
- погрешности *in situ* измерений (допустимая погрешность 0,1 м);
- наличие облачности над акваторией озера;
- недостаточная универсальность применяемых расчётных формул.

В целом, восстановленное по спутниковым данным пространственное распределение прозрачности соответствует многолетнему распределению, зависящему от закономерностей лимнических и гидробиологических процессов в озере [1; 14].

Полученные результаты позволяют планировать дальнейшие исследования параметров воды озера с применения спутниковых данных. Планируется разработать более универсальные алгоритмы восстановления значений прозрачности. Применение спутниковых снимков позволит расширить базу данных мониторинга Ладожского озера, что необходимо для лучшего понимания и моделирования его экосистемы.

Авторы выражают признательность заведующему Лабораторией географии и гидрологии ИНОЗ РАН, д.г.н., профессору М. А. Науменко и с.н.с. этой лаборатории, к.г.н. В. В. Гузиватому за предоставленные данные.

Список литературы

1. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья: атлас / ред. В. А. Румянцев. М.: Нестор-История, 2015. 200 с.
2. *Летанская Г. И.* Современное состояние фитопланктона и тенденция его изменения в период летней стратификации // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / под ред. В. А. Румянцева, В. Г. Дробковой. М.: Наука, 2002. С. 165–175.
3. Исследование «гистерезисного» характера возвращения Ладожского озера из мезотрофного состояния 2009 г. / Д. В. Поздняков, А. А. Коросов, Н. А. Петрова, Л. Х. Петтерссон, Х. Грассл // Исследование Земли из космоса. 2009. № 1. С. 1–15.
4. РД 52.24.496-2018 «Методика измерений температуры, прозрачности и определение запаха воды». Гидрометеиздат, 2018. 10 с.
5. Использование данных сенсора LANDSAT 8 (OLI) для оценки показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде Ивановского водохранилища / О. А. Тихомиров, А. В. Бочаров, А. Б. Комиссаров, С. Д. Хижняк, П. М. Пахомов // Вестн. ТвГУ. Сер. Химия. 2016. № 2. С. 230–244.
6. Assessing the effectiveness of Landsat 8 chlorophyll a retrieval algorithms for regional freshwater monitoring / J. Boucher, K. C. Weathers, H. Norouzi, B. Steele // Ecological Applications. 2018. N 28(4). P. 1044–1054.
7. *Fuller L. M., Jodoin R. S., Minnerick R.* Predicting lake trophic state by relating Secchi-disk transparency measurements to Landsat-satellite imagery for Michigan inland lakes, 2003–05 and 2007–08 / USGS Scientific Investigations Report 2011 – 5007. U.S. Geological Survey, 2011. P. 36.
8. Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery / C. Giardino, M. Pepe, P. A. Brivio, P. Ghezzi, E. Zilioli // Science of the Total Environment. 2001. N 268(1-3). p. 19–29.
9. *Guan X., Li J., Booty W. G.* Monitoring Lake Simcoe Water Clarity Using Landsat-5 TM Images // Water Resources Management. 2011. N 25(8). P. 2015–2033.
10. Selecting the Best Band Ratio to Estimate Chlorophyll-a Concentration in a Tropical Freshwater Lake Using Sentinel 2A Images from a Case Study of Lake Ba Be (Northern Vietnam) / N. T. T. Ha, N. T. P. Thao, K. Koike, M. T. Nhuan // ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2017. N 6 (9). P. 290.
11. *Kangro K., Alikas K., Panksep K.* Madala eutroofse järve klorofüllisisalduse määramiseks sobivad algoritmid Sentinel-3/OLCI andmete alusel Ülemiste järve näitel // Kaugeire EESTIS, 2018. Artiklikogumik. Tartu Ülikool, Tõravere, 2018. P. 51–58. URL: https://www.keskkonnaagentuur.ee/sites/default/files/kaugseire_eestis_2018.pdf.
12. *Markogianni V., Kalivas D., Petropoulos G.P., Dimitriou E.* An Appraisal of the Potential of Landsat 8 in Estimating Chlorophyll-a, Ammonium Concentrations and Other Water Quality Indicators / V. Markogianni, D. Kalivas, G. P. Petropoulos, E. Dimitriou // Remote Sens. 2018. N 10 (8). P. 1018. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/7/1018> / DOI: 10.3390/rs10071018.
13. *Mohsin J. B., Majid N.* Landsat ETM+ Secchi Disc Transparency (SDT) retrievals for Rawal Lake, Pakistan // Advances in Space Research. 2015. Vol. 56, Is. 7. P. 1428–1440.
14. *Naumenko M. A.* Spatial distribution and long-term trends of water transparency in Lake Ladoga // Russian Meteorology and Hydrology. 2007. N 32(9). P. 604–608.

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ

УДК 551.46

Водообмен через Керченский пролив по натурным данным и данным моделирования

А. А. Полозок (polozok.umi@gmail.com)¹

И. Н. Фомина (irina.fomina@ukr.net)²

¹ *Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь*

² *Севастопольское отделение Государственного океанографического института им. Н. Н. Зубова», г. Севастополь*

Аннотация. Рассчитан водообмен через Керченский пролив по натурным данным, в том числе получены средние и максимальные расходы воды и скорости течений азовского и черноморского потоков в проливе за период 1971–2014 гг. Реализовано численное моделирование водообмена, в результате которого установлено, что направление ветра оказывает существенное влияние на величину расходов воды. Выявлены диапазоны направлений ветра, при которых наблюдаются минимальные и максимальные значения расходов воды через Керченский пролив.

Ключевые слова: водообмен, Керченский пролив, моделирование.

Актуальность исследования

Керченский пролив является важнейшей судоходной магистралью и рыбопромысловым районом. В результате водообмена через пролив формируются гидрологический и гидрохимический режимы прилегающих районов Азовского и Черного морей. При этом основная роль в формировании водообмена определяется ветровыми течениями, сгонно-нагонными процессами, а также различием в пресном балансе Черного и Азовского морей. Задачей данного исследования является расчет водообмена через Керченский пролив по натурным данным и данным математического моделирования.

Водообмен через Керченский пролив по натурным данным

Начиная с 1999 г., наблюдения за течениями выполнялись только на 4-х станциях разреза, расположенных в его западной части (станции 1–4) (рис. 1). Для количественной оценки суммарных расходов воды через всю северную узость после 1998 г. использовались регрессионные уравнения, описывающие связь суммарного расхода воды от расхода воды его западной части для разных типов течений [3]. Эти уравнения получены на основе данных измерений на всех семи станциях за период 1971–1998 гг.

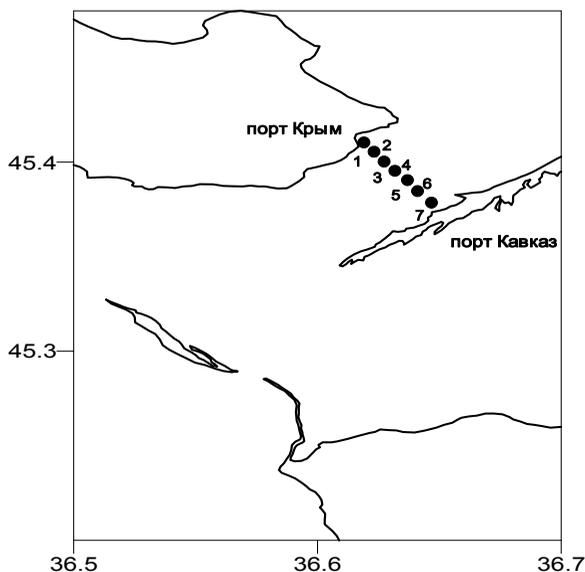


Рис. 1. Схема станций разреза порт Крым – порт Кавказ в Керченском проливе

Анализ данных натуральных наблюдений в северной узости Керченского пролива за период 1971–2014 гг. позволил сделать выводы, что повторяемость устойчивых однонаправленных азовских течений составила 33 % от общего числа случаев. Такой тип течений возникает при ветрах северных направлений и определяется величиной стока основных рек в Азовское море.

При ветрах южных румбов развивался преимущественно черноморский тип течений. Повторяемость устойчивых однонаправленных черноморских течений составила 32 %. Смешанные течения перемен-

ных направлений, возникающие при смене поля ветра или при малоградиентном поле атмосферного давления, наблюдались в 35 % случаев.

Перенос вод из Азовского моря в Черное море с учетом смешанных потоков за исследуемый период наблюдался в 51 % от общего числа наблюдений. Ранее (в 1962–1974 гг.) по данным [1,2] повторяемость его была существенно выше – 62 %.

Черноморский поток за период 1971–2014 гг. наблюдался в 49 % случаев, в то время как с 1962–1974 гг. его повторяемость была 38 %.

Среднемесячные величины расходов воды и скорости течения азовского и черноморского потоков за период с 1971 по 2014 гг. представлены в табл. 1.

Таблица 1

Средние ($Q_{\text{ср}}$) и максимальные ($Q_{\text{макс}}$) расходы воды ($\text{м}^3/\text{с}$) и скорости течений ($V_{\text{ср}}$, $V_{\text{макс}}$) (м/с) азовского и черноморского потоков в Керченском проливе за 1971–2014 гг.

Месяц	Азовские течения					Черноморские течения				
	$Q_{\text{ср}}$	$Q_{\text{макс}}$	$V_{\text{ср}}$ потока	$V_{\text{макс}}$ потока	Дата	$Q_{\text{ср}}$	$Q_{\text{макс}}$	$V_{\text{ср}}$ потока	$V_{\text{макс}}$ потока	Дата
1	4719	8274	0,16	0,28	03.01.72	5082	7147	0,18	0,25	29.01.04
2	5245	9263	0,18	0,30	04.02.04	4981	8169	0,18	0,31	19.02.73
3	4423	7368	0,16	0,24	24.03.04	3917	7948	0,14	0,31	19.03.73
4	5235	8129	0,17	0,27	25.04.07	4676	9076	0,16	0,33	03.04.08
5	4703	9351	0,15	0,30	13.05.82	4815	9426	0,16	0,32	26.05.10
6	4900	10234	0,16	0,32	15.06.05	4093	6883	0,14	0,22	22.06.10
7	4164	8163	0,14	0,27	13.07.84	4305	8460	0,15	0,30	25.07.73
8	5786	13708	0,19	0,48	25.08.76	4428	8005	0,15	0,28	22.08.07
9	4224	9213	0,15	0,32	10.09.12	4978	8705	0,17	0,31	01.09.72
10	5054	8654	0,18	0,31	01.10.71	5485	13322	0,20	0,45	24.10.05
11	4102	14642	0,15	0,47	15.11.06	5935	9168	0,23	0,38	19.11.75
12	4398	7015	0,16	0,25	19.12.73	4026	6204	0,15	0,22	01.12.77
Год	4746	14642	0,16	0,48	15.11.06	4727	13322	0,17	0,45	24.10.05

Сложность расчетов расходов воды по натурным данным обусловлена как эпизодичностью измерений скорости течений, так и их отсутствием по всему сечению пролива. Кроме того, измерения в проливе выполняются, как правило, только при благоприятных погодных условиях. Эти обстоятельства приводят к необходимости использования для оценок водообмена через Керченский пролив результатов гидродинамического моделирования.

Водообмен через Керченский пролив по данным моделирования

Ниже представлены результаты численных экспериментов, в которых анализируются особенности водообмена через Керченский пролив для различных типов атмосферных воздействий. В качестве входных данных используются результаты численного моделирования течений и уровня моря в Азово-Черноморском бассейне.

Расчеты водообмена проводились по вычисленным гидродинамическим полям следующим образом. Вначале с помощью линейной интерполяции определялись компоненты вектора полных потоков и уровень моря на разрезе. Затем интегрированием вдоль прямой разреза вычислялись мгновенный расход воды (Q), средняя скорость течений (V_N) и средний уровень моря (SL). При $Q > 0$ суммарный поток воды направлен в Азовское море (прямой поток), при $Q < 0$ – в Черное море (обратный поток). Для прямого и обратного потоков используются обозначения Q_A и Q_B соответственно. Максимальным прямым потокам соответствует диапазон углов однородного по пространству ветра $60^\circ \leq \theta \leq 105^\circ$, максимальным обратным потокам – диапазон углов $240^\circ \leq \theta \leq 285^\circ$. Минимальным значениям потоков, а также смене их направления соответствуют диапазоны углов $165^\circ \leq \theta \leq 175^\circ$ и $345^\circ \leq \theta \leq 355^\circ$.

В проведенных численных экспериментах анализировалось влияние направления (θ) однородного по пространству ветра на водообмен через Керченский пролив. Задача решалась с нулевыми начальными условиями. Предполагалось, что при $t > 0$ на поверхность бассейна начинает действовать ветер, скорость которого за 12 ч линейно возрастает от 0 до W_0 и далее остается неизменной. Время интегрирования 48 ч соответствует характерному времени действия устойчивых ветров над Азово-Черноморским бассейном.

На рис. 2 для различных скоростей ветра W_0 показаны зависимости расхода воды от направления ветра при $t = 48$ ч. Увеличение W_0 вызывает интенсификацию водообмена через пролив. Так, при изменении W_0 в диапазоне 5–20 м/с максимальные значения Q_A и Q_B увеличиваются в 5,7 и 6,6 раза соответственно. Связь максимальных значений прямого и обратного потоков со скоростью ветра W_0 в указанном диапазоне можно аппроксимировать следующими линейными уравнениями:

$$\max Q_A = 1013W_0 - 2008, \max Q_B = -1207W_0 + 3324. \quad (1)$$

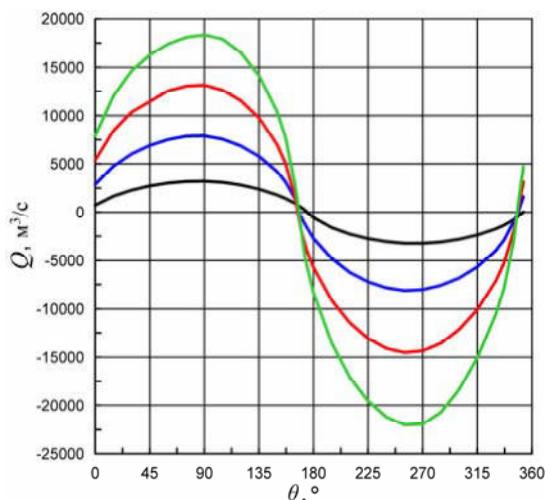


Рис. 2. Зависимости Q от θ при $t = 48$ ч и различных значениях W_0 .
 Черная кривая соответствует $W_0 = 5$ м/с; синяя – $W_0 = 10$ м/с;
 красная – $W_0 = 15$ м/с; зеленая – $W_0 = 20$ м/с

Проведенные по представленным линейным уравнениям предварительные расчеты показали хорошую сопоставимость полученных по натурным данным максимальных значений прямого и обратного потоков и результатов моделирования.

На рисунке 3 при $W_0 = 10$ м/с представлены зависимости Q от времени для характерных значений θ . Кривые В1 и В2 соответствуют максимальным значениям Q (направление ветра близко к меридиональному). Видно, что в интервале времени 0–12 ч происходит монотонное увеличение Q до ± 7500 м³/с с последующей стабилизацией. На этих кривых видны незначительные колебания с инерционным периодом, обусловленные вращением Земли. Кривые С1–С4 соответствуют минимальным значениям Q , когда направление ветра близко к зональному. На этих кривых также прослеживаются инерционные колебания, но их размах существенно больше по сравнению с кривыми В1 и В2.

Таким образом, направление ветра существенно влияет на водообмен в Керченском проливе. Выделяются диапазоны направлений ветра с максимальными и минимальными значениями Q_A и Q_B . При направлении ветра, близком к зональному, водообмен минимален. В этом случае возрастает роль инерционных колебаний. При всех рассмотренных значениях W_0 качественный вид зависимости Q от времени не меняется.

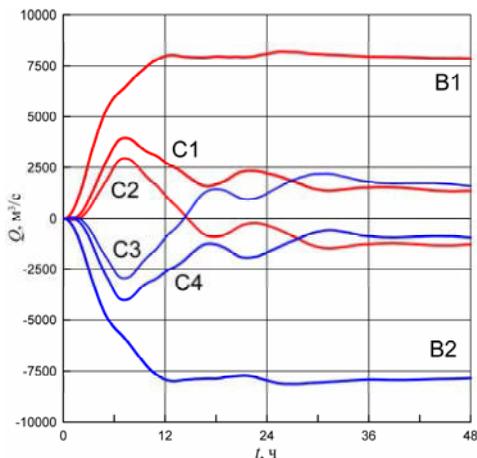


Рис. 3. Зависимости Q от времени при $W_0=10$ м/с.

Кривая B1 соответствует $\theta = 75^\circ$; кривая B2 – $\theta = 240^\circ$; кривая C1 – $\theta = 165^\circ$;
 кривая C2 – $\theta = 175^\circ$; кривая C3 – $\theta = 355^\circ$; кривая C4 – $\theta = 345^\circ$

Выводы по работе

Перенос вод из Азовского моря в Черное море с учетом смешанных потоков за период 1971–2014 гг. наблюдался в 51 % случаев от общего числа наблюдений. Ранее (в 1962–1974 гг.) повторяемость его была существенно выше – 62 %. Черноморский поток в 1971–2014 гг. зафиксирован в 49 % случаев, в то время как с 1962–1974 гг. его повторяемость была 38 %.

Направление ветра θ существенно влияет на величину расходов воды Q . Диапазоны $60^\circ \leq \theta \leq 105^\circ$ и $240^\circ \leq \theta \leq 285^\circ$ соответствуют максимальным значениям $|Q|$, диапазоны $165^\circ \leq \theta \leq 173^\circ$ и $345^\circ \leq \theta \leq 353^\circ$ – минимальным значениям $|Q|$.

Величины $|Q|$ для реальных синоптических ситуаций могут достигать 11 000–16 000 м³/с, что согласуется с результатами расчетов Q , полученными по натурным данным.

В результате обработки модельных данных получены линейные уравнения для оценки зависимости максимальных значений прямого и обратного потоков от скорости ветра. Предварительные расчеты показали хорошую сопоставимость рассчитанных по указанным уравнениям максимальных величин со значениями, найденными на основе натурных данных.

Список литературы

1. Альтман Э. Н. Водообмен через Керченский пролив в условиях зарегулированного стока рек Азовского бассейна // Океанология. 1973. Т. 13, вып. 3. С. 416–423.
2. Альтман Э. Н. К вопросу об изменчивости расходов воды в Керченском проливе (по натурным наблюдениям) // Тр. ГОИН. 1976. Вып. 132. С. 17–28.
3. Особенности водообмена через Керченский пролив по данным натурных наблюдений / Н. Н. Дьяков, И. Н. Фомина, Т. Ю. Тимошенко, А. А. Полозок // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря : сб. науч. тр. 2016. № 1. С. 62–67.

УДК 504.3:681.3(571.53)(-21)

Применимость данных системы Sorapnicus для оценки качества атмосферного воздуха г. Иркутска

А. В. Русин (rusin_andrei@mail.ru)

С. Ж. Вологжина (svologzhina@gmail.com)

А. П. Таюрская (ann.tayurskay21@gmail.com)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Статья посвящена оценке возможности применения данных из системы Sorapnicus для анализа состояния атмосферного воздуха в г. Иркутск. В исследовании анализировались концентрации таких веществ, как диоксид серы, оксид углерода и взвешенные вещества с диаметром меньше 10 и 2,5 мкм. Проводилась верификация данных, полученных из системы Sorapnicus, и данных, полученных автоматическими станциями контроля атмосферного воздуха.

Ключевые слова: концентрации, загрязнение атмосферы, Sorapnicus, автоматические станции контроля загрязнения атмосферы, г. Иркутск.

Введение

Во многих регионах России загрязнение атмосферного воздуха – серьёзная экологическая проблема, вносящая значительный вклад в формирование здоровья населения крупных городов. Иркутск – крупный промышленный город, в котором расположены десятки промышленных предприятий, выбрасывающих загрязняющие вещества в воздух.

Для того чтобы оценить динамику изменения состава атмосферного воздуха, необходимы данные о концентрации загрязняющих веществ за месяц, год или даже десятилетия. При этом многие исследователи сталкиваются с тем, что данные, предоставляемые региональными отделами Управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, могут быть неполными или недостающими. Причины для этого могут быть разные – неполадки в оборудовании, ремонтные работы, человеческий фактор и др.

В настоящее время необходимо применять наиболее полные и точные данные. Одной из систем предоставления данных является служба мониторинга атмосферы Copernicus (Copernicus Atmosphere Monitoring Service). Как утверждают создатели, эта система – европейский ответ на постоянно растущие требования экологического контроля, обеспечивающий важный вклад в экологическую политику на глобальном уровне [1]. При этом система Copernicus не ограничивается мониторингом атмосферы – с её использованием проходят наблюдения за морской средой, поверхностью Земли, изменением климата, обеспечением безопасности и чрезвычайными ситуациями по всему миру [2].

Исходные данные

В качестве исходных данных для исследования использовались данные, полученные из системы Copernicus, находящиеся в открытом доступе.

«Copernicus» – глобальная европейская система дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которая базируется на базе спутников «Sentinel» (англ. «Страж»). Система создаёт устойчивую европейскую спутниковую сеть для сбора и оценки данных об окружающей среде и для гражданской безопасности и гуманитарных потребностей [2].

Служба мониторинга атмосферы Copernicus поддерживает множество приложений в различных областях, включая здравоохранение, мониторинг окружающей среды, возобновляемые источники энергии, метеорологию и климатологию [3].

Сервис ориентирован на **пять основных направлений**:

- 1) качество воздуха и состав атмосферы;
- 2) озоновый слой и ультрафиолетовое излучение;
- 3) выбросы и поверхностные потоки;
- 4) солнечная радиация;
- 5) изменение климата.

Он ежедневно предоставляет информацию о **глобальном составе атмосферы** путем мониторинга и прогнозирования таких составляющих, как парниковые газы (диоксид углерода и метан), реактивные газы (монооксид углерода, окисленные соединения азота, диоксид серы), озон и аэрозоли. Система обеспечивает анализ качества воздуха в режиме, близком к реальному времени, а также предоставляет четырёхдневный прогноз [3].

Для анализа применимости данных, полученных из Системы Sorernicus, для оценки качества атмосферного воздуха г. Иркутска были собраны данные о концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе за период с 1 января по 31 декабря 2018 г. на пяти пунктах наблюдений на автоматических станциях контроля атмосферного воздуха (АСК-А): АСК-А № 1 (ул. Севастопольская, 239а), АСК-А № 7 (ул. Лермонтова, 325), АСК-А № 8 (ул. Партизанская, 76), АСК-А № 9 (ул. Мира, 101) и АСК-А № 10 (ул. Сухэ-Батора, 5).

Наблюдения на автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы проводятся каждые 6 часов, что не совсем применимо для дальнейших сравнений и расчётов. Поэтому для дальнейшего исследования данные АСК-А были усреднены и анализ проводился уже для среднесуточных значений. Данные из Системы Sorernicus были также усреднены до среднесуточных значений.

Результаты

В исследовании анализировались концентрации таких загрязняющих веществ как оксид углерода, диоксид серы, а также взвешенных частиц с диаметром меньше 10 и меньше 2,5 мкм.

Поскольку данные из Иркутского УГМС оказались неполными, значения по многим датам не были включены в исследование. Таким образом, всего получилось от 312 до 335 дней в зависимости от станции и вещества.

Для сравнения были построены графики концентраций, наглядно показывающие значения концентраций. Для примера приведены сравнения значений среднесуточных концентраций диоксида серы по данным АСК-А № 9 и системы Sorernicus (рис. 1), значения среднесуточных концентраций оксида углерода по данным АСК-А № 7 и системы Sorernicus (рис. 2), значения среднесуточных концентраций $PM_{2,5}$ по данным АСК-А № 1 и системы Sorernicus (рис. 3).

Согласно полученным расчётам для концентраций диоксида серы, на постах, находящихся на улицах Севастопольская, Партизанская и Мира, значения коэффициента корреляции довольно высокие – 0,78, 0,89 и 0,81 соответственно. Для постов на улицах Сухэ-Батора и Лермонтова это значение ниже – 0,53 и 0,67. Если говорить о средней суммарной концентрации со всех станций, то значение коэффициента корреляции будет ещё выше – 0,90. Это позволяет говорить о том, что при необходимости или отсутствии данных АСК-А возможно использование данных системы Sorernicus для оценки тенденций изменения концентраций исследуемых веществ.

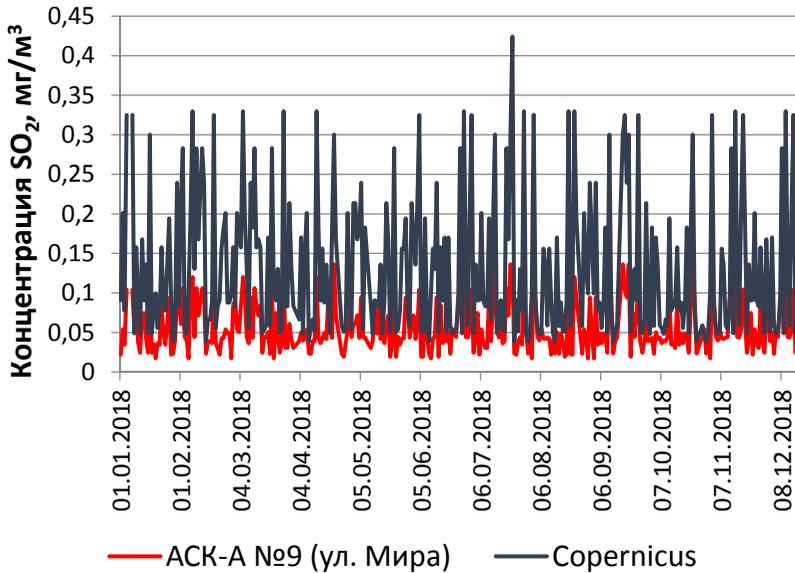


Рис. 1. Значения среднесуточных концентраций диоксида серы по данным АСК-А № 9 и системы Copernicus

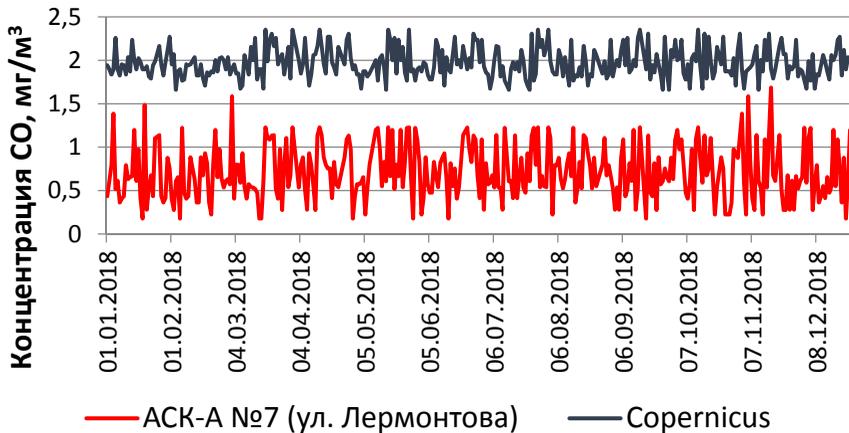


Рис. 2. Значения среднесуточных концентраций оксида углерода по данным АСК-А № 7 и системы Copernicus

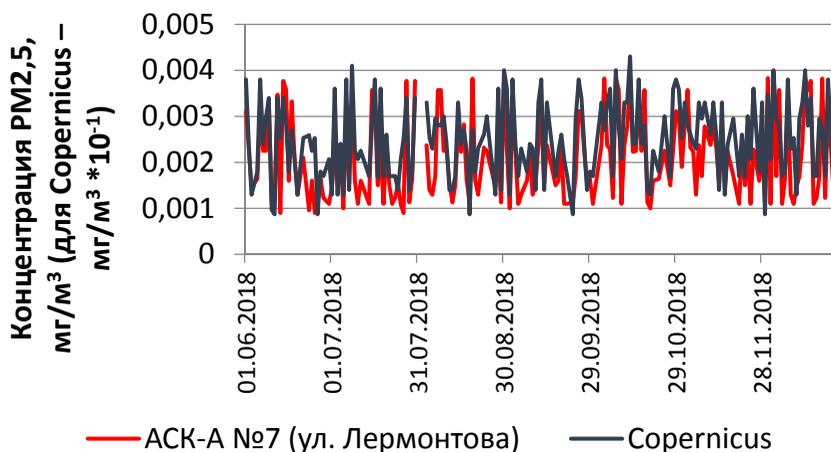


Рис. 3. Значения среднесуточных концентраций PM_{2,5} по данным АСК-А № 1 и системы CopernicusB в результате расчётов коэффициент корреляции для первого пункта составил 0,53, а для второго – 0,79. При сравнении средней суммарной концентрации по двум пунктам и значений системы Copernicus, коэффициент корреляции составил 0,8. Полученный результат позволяет утверждать о применимости данных системы Copernicus

Однако о таких же результатах нельзя сказать при расчёте коэффициента корреляции для концентраций CO. Здесь его значение варьируется от –0,10 до 0,25, лишь на улице Партизанской достигая значения 0,46. Это позволяет утверждать, что между данными, полученными системой Copernicus и с автоматических станций контроля атмосферы нет линейной зависимости. Отличие от нуля можно списать на некоторые случайные совпадения при обработке большого количества значений.

Постоянный мониторинг за твердыми частицами с диаметром менее 10 мкм проводился только на пунктах, расположенных на улицах Севастопольская и Партизанская, поэтому исследование проходило только для этих двух станций.

Для частиц с диаметром меньше 2,5 мкм мониторинг проводился только для пункта на улице Лермонтова с 1 июня по 31 декабря 2018 г. По результатам расчётов коэффициент корреляции равен 0,81, что говорит также о применимости данных системы Copernicus.

Выводы

В данной работе анализировалась возможность применения системы мониторинга атмосферы Copernicus для оценки состояния воздуха в г. Иркутске.

Из полученного исследования можно сделать следующие выводы:

1) для концентрации диоксида серы и взвешенных частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} получены довольно высокие значения коэффициента корреляции 0,78, 0,89 и 0,81, что говорит о возможности применения данной системы Copernicus для оценки качества атмосферного воздуха г. Иркутска по данным веществам;

2) несмотря на высокое значение коэффициента корреляции для SO_2 , $PM_{2,5}$ и PM_{10} , для концентраций CO этот коэффициент имеет значения близкие нулю;

3) использование данных системы Copernicus имеет смысл лишь при качественном прогнозировании высоких концентраций диоксида серы и взвешенных частиц, для анализа тенденций загрязнения и других научных исследований.

Полученные выводы позволяют утверждать, что благодаря глобальной системе мониторинга атмосферы Copernicus можно получать данные по трём загрязняющим веществам на региональном уровне, позволяющие провести качественный анализ. Наиболее точные значения можно получить при использовании региональной модели Copernicus, но на настоящий момент она используется только для стран Евросоюза и не имеет данных для территорий других государств.

Список литературы

1. Atmosphere Monitoring Service [Электронный ресурс]. URL: <https://atmosphere.Copernicus.eu> (дата обращения: 01.05.2019).
2. Copernicus – Europe's eyes on Earth [Электронный ресурс]. URL: <https://www.Copernicus.eu/en> (дата обращения: 01.05.2019).
3. Copernicus – Atmosphere Monitoring Service // Copernicus Brochure. Brussels, Belgium : European Union, 2016. 13 с.

УДК 556.5.02

Динамическая природа гидрологического подобия

О. А. Серова (olgaserova1995@gmail.com)¹Л. А. Тимофеева (tilarisa@gmail.com)¹Н. А. Решин (reshinn@yandex.ru)¹Д. В. Абрамов (dmbrmv96@gmail.com)²¹ *Российский государственный гидрометеорологический университет,**г. Санкт-Петербург*² *Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург*

Аннотация. В настоящее время возрос интерес к пониманию того, как водные объекты и их водосборы реагируют на антропогенные преобразования окружающей среды и изменения климата. Изменение стока является интегральным показателем изменения климата и ландшафтов. Подобные природные ландшафты формируют схожий гидрологический отклик на осадки. Разработан и опробован алгоритм выделения гидрологически однородных групп водосборов на основе их кластеризации по гидрометеорологическим признакам. Рассмотрены 26 водосборов, расположенные в юго-восточной части бассейна Балтийского моря. Использовались данные наблюдений с 1986 по 2016 г. Кластеризация водосборов в течение трёх последовательных десятилетних периодов показала изменчивость состава кластеров, обусловленную изменением гидрологического отклика исследуемых водосборов. Результаты интерпретированы на основе анализа как гидрометеорологических, так и ландшафтных характеристик.

Ключевые слова: Кластеризация, ландшафтно-гидрологическое подобие, характеристики стока.

Введение

Гидрологическое подобие речных водосборов не является постоянным, поскольку не постоянны факторы, которые его определяют: сток, его генезис, ландшафты, залесенность, заболоченность и озерность водосборов. При климатической стационарности гидрологический отклик может показать происходящие на водосборе ландшафтные изменения, которые невозможно выявить с помощью имеющейся в открытом доступе ландшафтной информации, поскольку основной ее объем был получен около 50 лет назад и на данный момент не является актуальной.

Надежно оценить ландшафтно-гидрологические изменения за относительно короткие периоды по осредненным данным не представляется возможным. Поэтому для изучения внутригодовой и межгодовой динамики стока использовались ежедневные данные о расходах воды за 1986–2015 гг. для 26 речных водосборов геологически однородной юго-восточной части бассейна Балтийского моря.

Формирование такого массива данных достаточно трудоемко. Но, благодаря современным технологиям обработки больших массивов данных, стало возможно эффективно проводить ландшафтно-гидрологические исследования. Они позволяют выявить динамический характер гидрологического подобия.

Впервые такие исследования были проведены в США в 2014 г. [5] и охватили территорию всей страны. На основе этого опыта авторы попытались разработать методику, которая бы учитывала обеспеченность гидрометеорологическими данными в России. Основой методики является кластерный анализ методом k -средних. Используя ежедневные данные о стоке, были рассчитаны четыре признака для кластеризации. Она выполнялась для трех последовательных десятилетних периодов. Предполагается, что десятилетний период времени достаточно длинный, чтобы выявить изменчивость климата, но достаточно короткий, чтобы не зависеть от климатических трендов.

Результаты кластеризации показали, что состав трех сформированных кластеров не остается постоянным, что может являться индикатором динамической природы динамического подобия.

1. Методы и материалы

1.1. Данные

Данные о ежедневных расходах воды с 1986 по 2007 г. оцифровывались с бумажных носителей [1]. С 2008 г. данные имеются в свободном доступе на сайте Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов [6]. В рядах данных пропуски составляют не более 5 %.

Годовые суммы осадков и среднегодовые температуры получены из архива единого государственного фонда данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации [7]. Был выполнен анализ данных по шести станциям: Белогорка, Тихвин, Старая Русса, Великие Луки, Пушкинские горы, Псков. Он показал отсутствие значимых трендов годовых сумм осадков за период исследования (рис. 1). Однако в связи с повышением температуры увлажненность территории, оцененная по индексу Де-Мартона, равному отношению годовой суммы осадков к среднегодовой температуре, уменьшается (рис. 2).

Для анализа результатов кластеризации были использованы ландшафтные признаки: озерность ($f_{оз}$), заболоченность ($f_{бол}$), залесенность ($f_{лес}$), средняя высота водосбора ($h_{вдсб}$), средний уклон водосбора ($I_{вдсб}$). Значения указанных характеристик получены из справочной литературы [3].

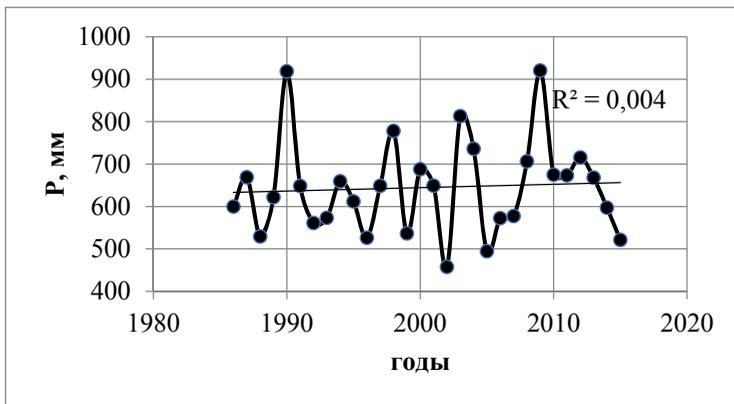


Рис. 1. Многолетний ход годовых сумм осадков, ст. Старая Русса

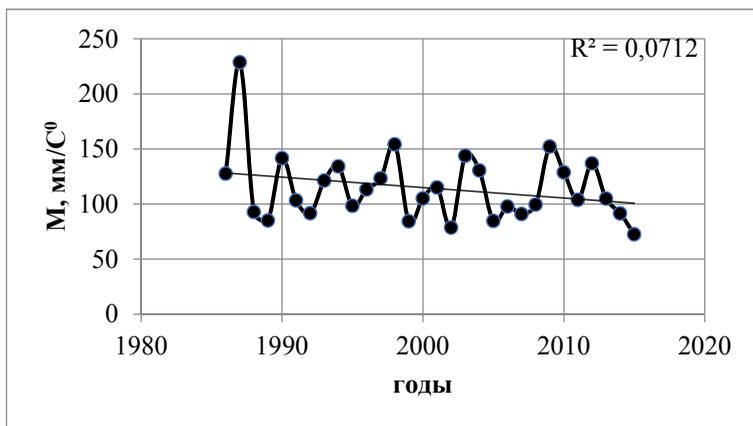


Рис. 2. Многолетний ход индекса увлаженности Де-Мартона, ст. Старая Русса

1.2. Признаки для кластеризации

Для трех десятилетних периодов (1986–1995 гг., 1996–2005 гг., 2006–2015 гг.) на основе данных ежедневных наблюдений за стоком и осадками, выпадающими на водосборы, за календарные годы были рассчитаны четыре признака.

Полный список признаков, использованных в этом исследовании, представлен ниже.

1. Коэффициент стока (К, [-]) – отношение среднего многолетнего слоя стока (мм) к сумме выпавших на площадь водосбора осадков

(мм). Он рассчитывался для каждого водосбора за десятилетний период. Для лучшего учета неравномерности осадков по территории гидрологические посты относились к ближайшей метеорологической станции.

2. Наклон эмпирической кривой обеспеченности стока (S , [-]) – наклон участка кривой между значениями стока 66 % и 33 % обеспеченности, который является показателем его изменчивости [4]. Низкое значение данного коэффициента может свидетельствовать о преобладании дождевого и /или подземного питания в стоке реки.

Значение данного признака определяется по формуле:

$$S = \frac{\ln(Q_{33\%}) - \ln(Q_{66\%})}{(0.66 - 0.33)} \quad (1)$$

где S – наклон эмпирической кривой обеспеченности стока, $Q_{33\%}$ – значение стока 33 % обеспеченности, $Q_{66\%}$ – значение стока 66 % обеспеченности.

3. Слой стока 10 % обеспеченности ($H_{10\%}$, [мм]), характеризует максимальный сток.

4. Слой стока 90 % обеспеченности ($H_{90\%}$, [мм]), характеризует минимальный сток.

Таким образом, для каждого водосбора был получен набор вышеперечисленных признаков за 30 лет. Одним из основных условий использования этих признаков для кластеризации является то, что каждый из них содержит независимую информацию (табл. 1).

Таблица 1

Корреляционная матрица для четырех признаков, используемых в кластеризации, 1986–1995 гг.

	$H_{10\%}$	$H_{90\%}$	S	K
$H_{10\%}$	1	0,66	-0,09	-0,22
$H_{90\%}$	0,66	1	-0,52	0,03
S	-0,09	-0,52	1	-0,47
K	-0,22	0,03	-0,47	1

1.3. Кластеризация

Метод k -средних – это метод кластерного анализа, позволяющий разделить m наблюдений на k кластеров, при этом каждое наблюдение относится к тому кластеру, к центру которого оно ближе всего. В качестве меры близости используется Евклидово расстояние. Этот алгоритм является неиерархическим, итерационным методом кластеризации. Он получил большую популярность благодаря своей простоте, наглядности реализации и достаточно высокому качеству результатов [8].

При предварительном обобщенном анализе признаков было решено выделить три кластера. Для проведения непосредственного кластерного анализа предварительно выполнена стандартизация характеристик. Для каждого водосбора были рассчитаны коэффициенты естественной зарегулированности (Ω), но при кластеризации они не использовались, так как показали высокую корреляцию с другими характеристиками. Анализ и интерпретация результатов выполнены с учетом ландшафтных характеристик водосборов, на основе ландшафтно-гидрологического подхода.

2. Анализ результатов

В итоге, водосборы первого кластера можно отнести к низменным, их средняя высота составляет 84 м (табл. 2). Они характеризуются небольшой залесенностью (46 %) и высокой заболоченностью (10 %). У данных водосборов не очень высокая естественная зарегулированность, она сначала понижается, а затем повышается в третьем периоде. По сравнению с водосборами третьего кластера (табл. 4), водосборы первого кластера характеризуются незначительными уклонами и, как результат, более низкими коэффициентами стока.

Таблица 2

Средние значения признаков и ландшафтных характеристик, кластер 1

Год	H_{10} %, мм	H_{90} %, мм	S	K	$f_{оз}$ %	$f_{бол}$ %	$f_{лес}$ %	$h_{водсб}$ м	$I_{водсб}$ ‰	Ω
1986–1995	6680	373	0,034	0,35	1,53	9,96	46,3	87	6,68	0,54
1996–2005	5970	343	0,039	0,34	0,79	10	46,2	80	5,8	0,48
2006–2015	4970	262	0,038	0,3	1,33	9,63	45	85	8,38	0,51
Среднее	5873	326	0,037	0,33	1,22	9,86	45,8	84	6,95	0,51

Второй кластер получился достаточно нестабильным, его характеристики изменяются от периода к периоду больше, чем на 10 % (табл. 3). В результате, его состав постоянно изменяется. В третьем периоде в этот кластер сформирован малыми водосборами с высокой естественной зарегулированностью ($\Omega = 0,73$), а следовательно, значения коэффициента S, который характеризует изменчивость стока, минимальны (0,015).

Третий кластер сформирован достаточно возвышенными водосборами, средняя высота составляет 145 м (табл. 4). Они характеризуются высокой залесенностью (64 %) и относительно высокой заболоченностью (8 %) и озерностью (2 %). Следовательно, коэффициент

естественной зарегулированности выше, чем в остальных кластерах. Однако он со временем понижается.

Таблица 3
Средние значения признаков и ландшафтных характеристик, кластер 2

Год	H_{10} %, мм	H_{90} %, мм	S	K	$f_{оз}$ %	$f_{бол}$ %	$f_{лес}$ %	$H_{длсб}$ м	$I_{длсб}$ ‰	Ω
1986–1995	9139	235	0,043	0,47	1	3	41,3	104	4,5	0,49
1996–2005	5095	503	0,027	0,32	3,13	4,83	45,6	123	14,2	0,6
2006–2015	7395	1770	0,015	0,56	2,12	7,37	67,2	158	23,1	0,73
Среднее	7210	836	0,028	0,45	2,08	5,07	51,4	128	13,9	0,61

Таблица 4
Средние значения признаков и ландшафтных характеристик, кластер 3

Год	H_{10} %, мм	H_{90} %, мм	S	K	$f_{оз}$ %	$f_{бол}$ %	$f_{лес}$ %	$H_{длсб}$ м	$I_{длсб}$ ‰	Ω
1986–1995	7996	1437	0,017	0,5	2,11	8,55	65,5	149	19,2	0,68
1996–2005	7039	1502	0,017	0,48	1,62	9,56	66,7	147	19,2	0,65
2006–2015	6767	800	0,024	0,41	1,85	7,35	59,8	138	9,6	0,61
Среднее	7267	1246	0,019	0,46	1,86	8,49	64,0	145	16,00	0,65

Таблица 5
Речные водосборы, меняющие кластерную принадлежность

№ в базе данных	Название реки	1986-1995 гг.	1995-2005 гг.	2006-2015 гг.
17	р. Великая – г. Опочка	3	2	3
25	р. Уза – д. Дубская	1	2	1
26	р. Плюсса – с. Плюсса	1	2	1
11	р. Большой Тудер – д. Бабяхтино	2	1	3
19	р. Сороть – д. Осинкино	1	1	3
13	р. Перехода – д. Подсосонье	2	1	1
23	р. Череха – д. Крякуша	2	1	1
10	р. Ловать – г. Великие Луки	1	2	1
15	р. Луга – г. Луга	1	2	1
21	р. Кудеб – д. Свериково	1	2	1
18	р. Алоля – д. Ермолово	3	3	2
22	р. Желча – пос. Ямм	3	3	2

По результатам кластеризации за три периода, 14 речных водосборов оставались в одном и том же кластере, а 12 изменяли свою кластерную принадлежность (табл. 5). Некоторые реки сформировали устойчивые группы, которыми они перемещались из кластера в кластер.

Переход р. Уза и р. Плюсса из кластера 1 в кластер 2 во втором периоде может быть обусловлен тем, что максимальный сток и коэффициент S значительно понизились. Поэтому реки вошли в кластер с меньшими средними значениями этих характеристик (второй период: кластер 1 $H_{10\%} - 5970$ мм, $S - 0.039$, кластер 2 $H_{10\%} - 5095$ мм, $S - 0,027$).

Водосбор р. Большой Тудер наиболее непостоянен. Переход из кластера в кластер происходит в основном из-за изменения максимального стока. В первом периоде река находится в кластере 2, который характеризуется наибольшим средним значением максимального стока (9139 мм). Во втором периоде река переходит в кластер 1, поскольку значение ее максимального стока (6972 мм) примерно равно среднему значению для кластера (6680 мм).

Максимальный и минимальный сток р. Перехода и р. Череха довольно изменчив. Их переход из кластера 2 в кластер 1 во втором периоде, возможно, происходит из-за понижения максимального стока и потому что кластер 1 во втором и третьем периодах характеризуется наименьшим из трех кластеров значением минимального стока.

Водосбор р. Ловать переходит из кластера 1 в кластер 2 и затем обратно, возможно, из-за изменчивости средних характеристик в кластере 2. Во втором периоде значения характеристик этого кластера ($H_{10\%} - 5095$ мм и $H_{90\%} - 503$ мм) оказались наиболее близки к значениям характеристик данного водосбора ($H_{10\%} - 4581$ мм и $H_{90\%} - 585$ мм).

Водосбор р. Великая переходит из кластера 1 в кластер 2 во втором периоде, возможно, из-за уменьшения максимального стока. Водосбор в третьем периоде возвращается в кластер 3, поскольку его минимальный сток становится близок к соответствующему значению в этом кластере (800 мм).

Водосборы р. Алоля и р. Желча в третьем периоде могли перейти в кластер 2, потому что среднее значение минимального стока в кластере 3 существенно изменилось (800 мм) по сравнению со вторым кластером (1770 мм).

Вышеописанные изменения кластерной принадлежности продемонстрированы на рис. 3–5.

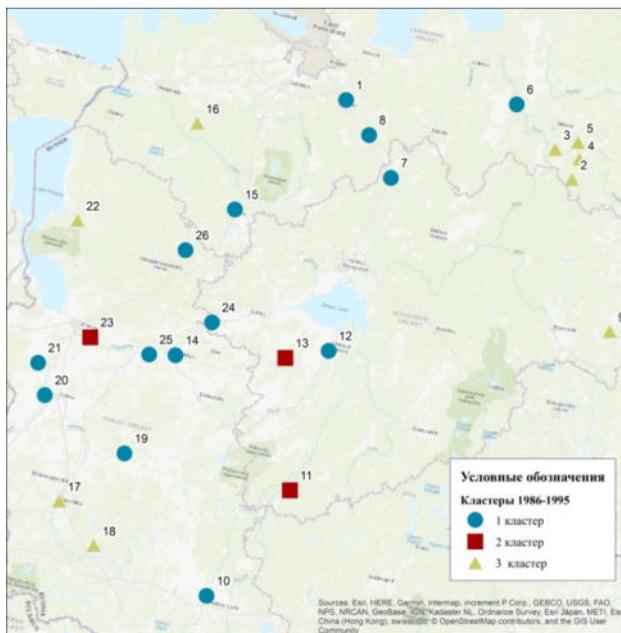


Рис. 3. Географическое расположение кластеров за 1986–1995 гг.

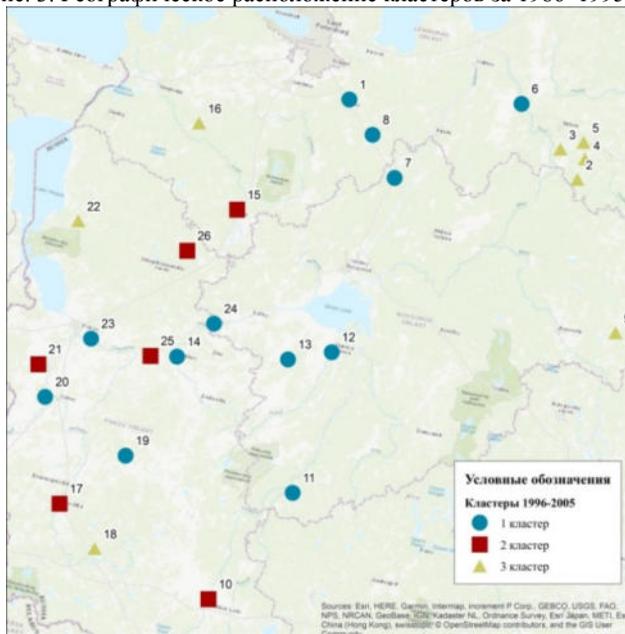


Рис. 4. Географическое расположение кластеров за 1996–2005 гг.

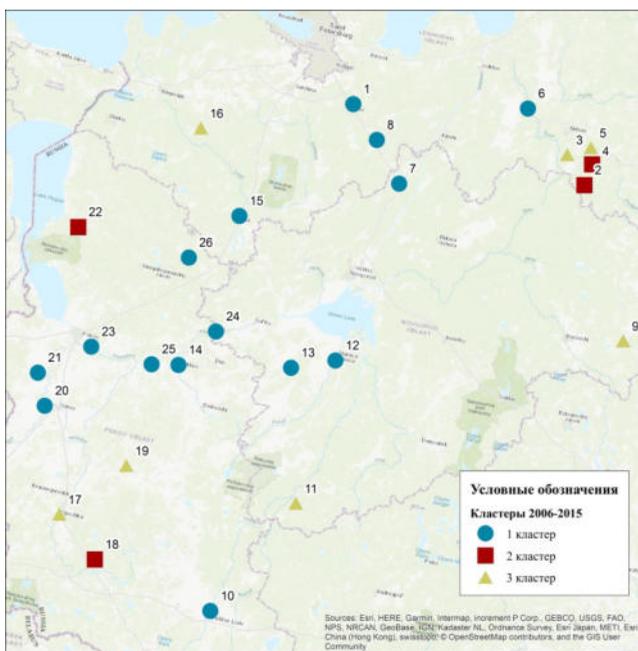


Рис. 5. Географическое расположение кластеров за 2006–2015 гг.

Выводы

Авторы считают достаточно успешной их первую попытку оценки динамики гидрологического подобия методом кластеризации. Кластеризация водосборов может являться ценным инструментом для понимания гидрологических изменений, поскольку она позволяет сопоставить их с физическими и климатическими характеристиками.

Наблюдаемая временная изменчивость поведения водосборов была интерпретирована на основе ландшафтно-гидрологического анализа. В условиях понижения увлажненности территории исследования наблюдается снижение стока за рассматриваемый период [2]. Естественная зарегулированность большинства водосборов понижается ко второму периоду и повышается в третьем. Это может быть обусловлено изменением генезиса стока и ландшафтных условий на фоне снижения увлажненности территории.

В настоящее время не представляется возможным масштабно оценить генетические изменения стока и ландшафтов, поэтому актуальность предложенного подхода очевидна.

Список литературы

1. Гидрологические ежегодники. Бассейн Балтийского моря. Выпуск 0–3 бассейн Финского и Рижского заливов от государственной границы с Финляндией до северного водораздела р. Салаца. Л. : Гидрометеиздат, 1986–2007. Т. 1.
2. Курочкина Л. С., Журавлев С. А. Пространственно-временная изменчивость максимального стока весеннего половодья рек Российской части бассейна Финского залива // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития : тр. II Всерос. конф. 2018. С. 381–384.
3. Ресурсы поверхностных вод СССР. Карелия и Северо-Запад, ч. Л.: Гидрометеиздат, 1972. Т. 2. 448 с.
4. Catchment classification: empirical analysis of hydrologic similarity based on catchment function in the eastern USA / K. Sawicz, T. Wagener, M. Sivapalan, P. A. Troch, G. Carrillo // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2011. P. 2895–2911.
5. Characterizing hydrologic change through catchment classification / K. Sawicz, T. Wagener, M. Sivapalan, P. A. Troch, G. Carrillo // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2014. P. 273–285.
6. АИС ГМВО [Электронный ресурс]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения 05.01.19).
7. ВНИИГМИ-МЦД [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения 05.01.19).
8. AlgoWiki [Электронный ресурс]. URL: <http://algowiki-project.org/ru/k-means> (дата обращения 20.03.19).

Научное издание

Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России

Материалы II Всероссийской научно-практической конференции
приуроченной к 55-летию кафедры гидрологии и природопользования
Иркутского государственного университета

Иркутск, 5–7 июня 2019 г.,

ISBN 978-5-9624-1747-9

Материалы публикуются в авторской редакции

Темплан 2019. Поз. 88

Уч. изд. л. 39,0

Издательство ИГУ
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 124

Партнеры конференции



ИОА СО РАН создан в 1969 году.

Основные научные направления деятельности Института:

- актуальные проблемы оптики и лазерной физики, в том числе атмосферная оптика и спектроскопия, распространение оптического излучения в атмосфере, исследование процессов, определяющих оптическое состояние атмосферы, оптико-электронные системы и технологии исследования окружающей среды;
- физические и химические процессы в атмосфере и на поверхности Земли, механизмы формирования и изменения климата, в том числе оптически значимые составляющие атмосферы и процессы, определяющие радиационный режим и климат Земли.

Институт располагает уникальной базой, на которой в течение многих лет проводится систематический мониторинг параметров атмосферы ([Сибирская лидарная станция](#), [TOP станция](#), [аэрозольная станция](#)).

В аспирантуре осуществляется обучение по программам высшего образования - программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре в соответствии с Лицензией и Свидетельством о государственной аккредитации по следующим специальностям:

Направление подготовки	Шифр и наименование специальности	Нормативный срок освоения
03.06.01 Физика и астрономия	01.04.03 Радиофизика 01.04.05 Оптика	4 года(очно)/ до 5 лет (заочно)
05.06.01 Науки о Земле	25.00.29 Физика атмосферы и гидросферы	3 года(очно)/ до 4 лет (заочно)

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки российской Федерации (соглашение № 14.616.21.0104, уникальный идентификатор RFMEF161618X0104). Разработка станции «Обсерватория Фомола» выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение No 14.613.21.0082, идентификатор RFMEF161317X0082)

The work was supported in part by Ministry of Education and Science of RF (Agreement No. 14.616.21.0104, unique identifier RFMEF161618X0104). Development of the atmospheric station at Fonomaya Observatory is supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under State Contract No 14.613.21.0082 (ID No RFMEF161317X0082).