



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ



ISBN 978-5-9624-2317-3

УДК 556.5+551.5(470+571)(063)
ББК 26.22:26.23(2P)л0
С56

Редакционная коллегия:

Е. Н. Сутырина, канд. геогр. наук (отв. ред.);
И. В. Латышева, канд. геогр. наук; С. Ж. Воложжина, канд. геогр. наук

Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск, 19–22 декабря 2023 г. / отв. ред. Е. Н. Сутырина. – Иркутск : Издательство ИГУ, 2024. – 1 электронный оптический диск (CD-ROM). – Заглавие с этикетки диска.

<https://doi.org/10.26516/978-5-9624-2317-3.2024.1-244>

ISBN 978-5-9624-2317-3

Материалы содержат результаты исследований по направлениям: «Погода и климат. Мониторинг и прогнозирование», «Мониторинг, моделирование и прогнозирование состояния водных объектов», «Опасные гидрометеорологические явления и процессы», «Влияние климатических изменений на трансформацию природных и социально-экономических условий», «Современные информационные системы в гидрометеорологии», «Региональные особенности атмосферных процессов», «Современные методы и средства гидрометеорологических наблюдений», «Актуальные проблемы подготовки кадров в сфере гидрометеорологии».

Предназначены для специалистов в области гидрометеорологии, работников научных и образовательных учреждений, аспирантов и студентов.

Статьи публикуются в авторской редакции. Авторы статей несут полную ответственность за содержание статей, за соблюдение законов об интеллектуальной собственности и за сам факт их публикации. Мнение и выводы авторов статей могут не совпадать с мнением редакции и членов редколлегии.

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

664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1; тел. +7(3952) 52-19-00
Издательство ИГУ; 664082, Иркутск, ул. Лермонтова, 124
тел. +7(3952) 52-18-53; e-mail: izdat@law.isu.ru

Подписано к использованию 15.10.2024. Тираж 13 экз. Объем 8,3 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



**СОВРЕМЕННЫЕ
ТЕНДЕНЦИИ
И ПЕРСПЕКТИВЫ
РАЗВИТИЯ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
В РОССИИ**



ISBN 978-5-9624-2317-3



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ



ISBN 978-5-9624-2317-3

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Иркутский государственный университет»
Географический факультет
ФГБУ «Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»
ФГБУН Институт солнечно-земной физики СО РАН



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ

*Материалы
VI Всероссийской научно-практической конференции
Иркутск, 19–22 декабря 2023 г.*



УДК 556.5+551.5(470+571)(063)
ББК 26.22:26.23(2P)л0
С56

Редакционная коллегия:

Е. Н. Сутырина, канд. геогр. наук (отв. ред.)
И. В. Латышева, канд. геогр. наук,
С. Ж. Вологжина, канд. геогр. наук

С56 **Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции.** Иркутск, 19–22 декабря 2023 г. / отв. ред. Е. Н. Сутырина. – Иркутск : Издательство ИГУ, 2024. – 1 электронный оптический диск (CD-ROM). – Заглавие с этикетки диска.

<https://doi.org/10.26516/978-5-9624-2317-3.2024.1-244>

ISBN 978-5-9624-2317-3

Материалы содержат результаты исследований по направлениям: «Погода и климат. Мониторинг и прогнозирование», «Мониторинг, моделирование и прогнозирование состояния водных объектов», «Опасные гидрометеорологические явления и процессы», «Влияние климатических изменений на трансформацию природных и социально-экономических условий», «Современные информационные системы в гидрометеорологии», «Региональные особенности атмосферных процессов», «Современные методы и средства гидрометеорологических наблюдений», «Актуальные проблемы подготовки кадров в сфере гидрометеорологии».

Предназначены для специалистов в области гидрометеорологии, работников научных и образовательных учреждений, аспирантов и студентов.

Статьи публикуются в авторской редакции. Авторы статей несут полную ответственность за содержание статей, за соблюдение законов об интеллектуальной собственности и за сам факт их публикации. Мнение и выводы авторов статей могут не совпадать с мнением редакции и членов редколлегии.

УДК 556.5+551.5(470+571)(063)
ББК 26.22:26.23(2P)л0

СОДЕРЖАНИЕ

Секция «МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ»

Амосова И. Ю., Ильичева Е. А. Области формирования поверхностного стока бассейна р. Селенги	7
Андреев Ф. М. Автоматизация алгоритмов обработки спутниковых данных в QGIS (на примере идентификации и расчета морфометрических характеристик о. Ярки)	13
Батмазова А. А., Гайдукова Е. В. Влияние атмосферной циркуляции на уровенный режим озерных систем	19
Габриелян С. Х., Ильичёва Е. А., Павлов М. В., Ушкалов А. А., Шкимелис Ю. И. Результаты мониторинговых гидроморфологических исследований в устьевых системах рек Сармы, Анги, Бугульдейки	26
Гагаринова О. В. Исследования региональных гидроклиматических процессов: анализ, оценки, подходы к прогнозированию	34
Калугин А. С., Гинзбург В. А., Крыленко И. Н., Липка О. Н., Максимова О. В., Мальнев А. В., Мотовилов Ю. Г., Попова Н. О., Ревокатова А. П. Сценарные изменения будущего стока в бассейне Ангары	36
Козьмин Г. Г., Викторова Н. В. Использование математических моделей для оценки выноса загрязняющего вещества	40
Литвинцева Е. А., Бархатова О. А. Гидрологические прогнозы вскрытия озера Байкал	46
Лукас Р. М. Параметризация динамической модели при прогнозе стока на реках Танзании	51
Постников А. Н. К вопросу о расчете испарения с водоемов суши	57
Потапова Е. В. Международные инновации в содержании водохранных зон	62
Романовский Р. В. Особенности формирования зоны затопления р. Томь у г. Томска по результатам компьютерного 2D моделирования при сценарии прохождения расчетного расхода воды 1%-ной обеспеченности	67
Соловьева С. С., Ефимова Л. Е., Терешина М. А., Ерина О. Н., Соколов Д. И. Особенности пространственной изменчивости гидрохимического состава вод бассейна реки Сетунь (за период мониторинга 2019–2022 гг.)	72
Румянцева Т. С., Стом А. Д. Утилизация осадков сточных вод с использованием дождевых червей <i>Eisenia andrei</i>	78
Троицкая Е. С. Влияние климатических изменений на прибрежные апвеллинги в зал. Лиственничный (Южный Байкал)	83
Ушкалов А. А., Ильичева Е. А. Связь морфометрических и гидрологических характеристик и некоторых форм ландшафтов в бассейне оз. Хубсугул	91

Хомматлиев Г. Б., Полетаева В. И., Пастухов М. В., Бархатова О. А. Основной ионный состав воды Иркутского водохранилища	99
Шкимелис Ю. И., Ильичёва Е. А., Павлов М. В., Ушкалов А. А., Габриелян С. Х. Гидроморфологический мониторинг русловой сети дельты р. Селенги	104

Секция «ПОГОДА И КЛИМАТ. МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ»

Вологжина С. Ж., Гекова А. В., Латышева И. В., Лощенко К. А. Пространственно-временные особенности температурного режима в Иркутской области в современный климатический период	111
Лощенко К. А., Сухов Н. С. Исследование общей и нижней облачности в Иркутской области	119
Малинин В. Н., Вайновский П. А., Гордеева С. М. Парниковый эффект во внутритропической зоне конвергенции	125
Сумачев А. Э., Банщикова Л. С., Почепко С. Ю. Климатические изменения в бассейне реки Ваги	129

Секция «РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ»

Бадмаев Д. В., Вологжина С. Ж. Вклад лесных пожаров в загрязнение атмосферного воздуха на территории Баргузинского заповедника и Забайкальского национального парка	135
Кумукова А. М., Таюрская А. П. Сравнительный анализ выбросов парниковых газов при захоронении твердых коммунальных отходов на объектах размещения отходов и при сжигании	141
Мирзоев В. А., Гайдукова Е. В. Атмосферные осадки как приходная часть водного баланса среднего Зеравшана	149
Таюрская А. П., Кумукова А. М. Анализ количественных выбросов в городах – участниках федерального проекта «Чистый воздух» (Иркутская область)	154

Секция «ОПАСНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ»

Латышева И. В., Лощенко К. А., Вологжина С. Ж., Кузнецов М. М. Динамика средиземноморского циклона «Даниэль» в период катастрофического наводнения в Ливии	160
Латышева И. В., Лощенко К. А., Вологжина С. Ж., Макухин В. Л. Динамика штормового южного циклона над Сибирью в ноябре 2023 года	164
Лукьянова Е. В. Анализ изменчивости очень сильного и ураганного ветра на территории Иркутской области	172
Нурмухаметова Э. З., Камалова Р. Г., Богдан Е. А. Изменения температурно-влажностного режима и опасных метеорологических явлений теплого периода на территории Республики Башкортостан	177

Смирнов И. А., Дронова Е. А. Засухи и суховеи в Центрально-Черноземном экономическом районе и их влияние на урожайность озимой пшеницы	186
---	-----

**Секция «СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ»**

Наумова А. А. Краткий анализ применения возможностей искусственного интеллекта в гидрологии Российской Федерации	193
---	-----


**Секция «ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ
НА ТРАНСФОРМАЦИЮ ПРИРОДНЫХ
И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ»**

Авдеев С. М., Дронова Е. А., Асауляк И. Ф. Оценка агрометеорологических условий выращивания гречихи посевной (<i>Fagopyrum esculentum Moench.</i>) на территории Алтайского края	201
Казюлин Р. В., Чернышов Н. Г. Экологическая безопасность международных транспортных коридоров	208
Коновалова Т. И. Трансформация природной среды геодинамически активных территорий в условиях естественных и антропогенных климатических изменений	213
Степанов П. М. Исследование многолетнего ледово-термического режима Онежского озера	222
Сутырина Е. Н., Андреев Ф. М. Влияние климатических изменений в пределах водосбора озера Байкал на сток его притоков	226
Тихонова А. М., Гайдукова Е. В., Девятов В. С. Вклад природных ресурсов в производственные функции при изменении климата	233
Шестакова (Шерстова) В. Д. Оценка испарения с суши в летний период в рамках гидрометеорологических изысканий	239



СЕКЦИЯ

**МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ
И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ
ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**



УДК 556.522(1-925.16)

Области формирования поверхностного стока бассейна р. Селенги

И. Ю. Амосова (irinaamosova_83@mail.ru)^{1,2}, Е. А. Ильичева (lenail3663@mail.ru)^{1,2}

¹Иркутский государственный университет, г. Иркутск

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

Аннотация. Исследование направлено на определение значимости каждого водно-эрозионного элемента русловой сети в процессе формирования стока в бассейне р. Селенги. Структурно-гидрографический анализ речных систем выполнен посредством сравнения результатов динамического и статического моделирования. Дана оценка насыщенности речных систем элементарными водотоками. На основе структурно-гидрографического подхода строения речных систем выделены области формирования, транзита и аккумуляции стока. Результаты исследования легли в основу создания картосхемы пространственно-типологического распределения речных систем бассейна р. Селенги по областям стока. Результаты исследования могут использоваться для уточнения имеющейся и получения дополнительной гидрологической информации при расчете экстремальной водоносной способности речных систем.

Ключевые слова: область формирования стока, область транзита стока, область аккумуляции стока, речная система, структурный анализ.

Введение

Река Селенга – наиболее значительная речная система и главный приток оз. Байкал, обеспечивает до половины ежегодного притока воды в озеро. Несмотря на то что монгольская часть бассейна р. Селенги по площади занимает более половины водосборного бассейна оз. Байкал, изучена она не столь подробно.

Исследование строения речных систем (РС) как индикатора водоносности дает возможность определить закономерности пространственного распределения формирования поверхностного стока при условии дефицита гидрологических данных.

Наша работа основывается на структурно-гидрографическом подходе выделения областей стока в дальневосточном регионе [3]. Такой подход к изучению речных систем позволяет дифференцировать бассейн р. Селенги на области формирования поверхностного стока, транзита и аккумуляции.

В результате исследования определена значимость каждого водно-эрозионного элемента русловой сети в процессе формирования стока в бассейне р. Селенги, создана картосхема пространственно-типологического распределения речных систем по областям стока.

Материалы и методы

При исследовании закономерностей строения речных систем суббассейна р. Селенги, использовались данные гидрологических наблюдений по 64 пунктам, из них 12 расположено на территории Монголии [5]. Расположение гидрологических станций и постов представлено на рис. 1.

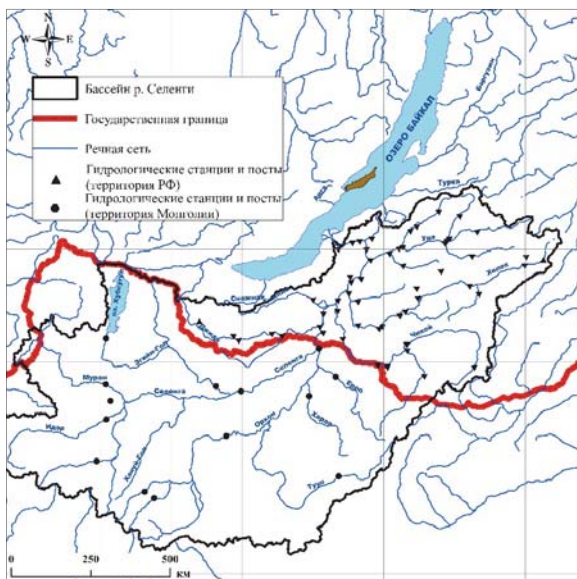


Рис. 1. Схема расположения гидрологических станций и постов в бассейне р. Селенги

В качестве картографических исходных данных использовались материалы цифровой базы высот Земли (<http://srtm.csi.cgiar.org>) и топографические карты масштаба 1:200 000. Покрытие модели высот и топокарт на исследуемую территорию перепроецировано в эквидистантную проекцию (Albers_Equal_Area_Conic).

Порядок речных систем определялся по классификации Хортон – Стрелера [6; 8]. Структурно-гидрографический анализ речных систем выполнен на основе сравнения результатов статического и динамического моделирования [1]. Статическая модель представляет собой схематическое изображение (граф) постоянно действующей речной сети, построенное по топографическим картам и соответствует устойчивому среднегодовому стоку. Динамическая модель создана по цифровой модели рельефа по тальвегам водно-эрозионной сети при условии экстремального увлажнения.

Выделение областей формирования, транзита и аккумуляции стока проведено на основе структурно-гидрографического подхода строения речных систем [3]. Областью формирования стока (ОФС) является приводораздельная часть водосбора, где происходит интенсивное наращивание порядка по длине реки, до момента образования наивысшего порядка речной системы и представлена в основном элементарной водно-эрозионной сетью. Ниже располагается область транзита стока, с выраженной главной рекой с крупными притоками. Область аккумуляции стока расположена в нижних частях водосбора нижнего течения реки с притоками низких порядков, где местный сток формируется только в период максимального увлажнения территории.

Результаты и обсуждение

Площадь области формирования стока в бассейне р. Селенги составляет 264 тыс. км² (46 % от общей площади бассейна оз. Байкал) (табл. 1).

Таблица 1

Распределение площади областей стока в бассейне р. Селенги

РС зоны	ОФС		ОТС		ОАС	
	от общей площади бассейна оз. Байкал	бассейн р. Селенги	от общей площади бассейна	бассейн р. Селенги	от общей площади бассейна	бассейн р. Селенги
Площадь, %	46	57	29	37	5	6

Отношение площадей ОФС по речным системам в бассейне р. Селенги находится в диапазоне от 39 % (РС Мурэн) до 72 % (РС Идэр), в малых суббассейнах ОФС может составлять до 80–90 % площади водосбора (РС Кабанья, Куйтунка).

Область транзита стока составляет 29 % от общей площади водосборного бассейна оз. Байкал (около 170 тыс. км²), внутри бассейна – от 28 % (РС Орхон, Мурэн, Идэр) до 40 % (РС Эгийн-Гол, Уда), ОТС малых речных систем не превышает 20 % (РС Кабанья – 8 %).

На область аккумуляция стока в бассейне р. Селенги приходится 5 % или 27 тыс. км² от общей водосборной площади оз. Байкал. Внутри бассейна площадь ОАС варьирует от 20–30 % (РС Оронгой, Темник, Мурэн) до 1 % (РС Итанца, Идэр).

Одним из важнейшим условием возникновения поверхностного стока является характер уклона (крутизна склонов, протяженность, расчлененность). Уменьшение стокорегулирующей роли подстилающей поверхности происходит при увеличении крутизны склонов, но при этом возрастает доля трансформации осадков в сток [2].

Для бассейна р. Селенги определены: диапазон высот и уклона поверхности водосбора и тальвегов в областях стокоформирования (табл. 2). Высота поверхности водосбора в среднем по всему бассейну в ОФС составляет 1215 м с наибольшей высотой 3539 м в бассейне р. Орхон; 1015 м в ОТС и 809 м в ОАС. Средняя высота тальвегов по всему бассейну до 1134 м в ОФС, 953 м в ОТС и 761 в ОАС.

Таблица 2

Морфометрические параметры бассейна, отражающие условия поступления воды и возможности для формирования тальвегов

РС	Поверхность водосбора						Тальвеги					
	ОФС		ОТС		ОАС		ОФС		ОТС		ОАС	
	мах	ср.	мах	ср.	мах	ср.	мах	ср.	мах	ср.	мах	ср.
Абсолютные высоты, м	3539	1215	3202	1015	2611	809	3175	1134	2888	953	2432	761
Уклон, °	34	5	29	4	26	3	25	2	24	2	26	1

Уклон поверхности водосбора в ОФС не превышает в среднем 5° (мах 34° – суббассейн р. Идэр), в ОТС – 4° (мах 29° – суббассейн р. Идэр), снижаясь до 3° в ОАС (мах 26° – суббассейн р. Эгийн-Гол). Уклон тальвегов в среднем в ОФС составляет 24° (мах 25° – р. Орхон), в ОТС – $1-2^\circ$ (мах 24° – р. Эгийн-Гол) и в ОАС – $1-2^\circ$ (мах 26° – р. Эгийн-Гол).

По классификации склонов по крутизне [4] тальвеги относятся к слабопологим в ОАС, слабопологим и пологим в ОФС и ОТС. В бассейне рек Орхон и Эгийн-Гол в ОФС и ОТС, и в бассейне р. Эгийн-Гол в ОАС встречаются крутые и очень крутые тальвеги. В среднем по бассейну склоны варьируют от слабопологих до слабопокатых в ОАС, в ОФС и ОТС – от слабопологих до слабопокатых, местами очень крутые (бассейн рек Идэр, Орхон и Эгийн-Гол).

Оценку насыщенности элементарными потоками речной системы можно выразить через мощность (магнитуду) [7]. Так магнитуда в ОФС составляет 67 тыс. эпизодических водотока. Наибольшая насыщенность в период максимального увлажнения наблюдается у РС Орхон. Большое количество элементов первых порядков соответствует условиям развития водно-эрозионной сети горной территории и характеризует условия формирования стока как благоприятные. В ОТС мощность в среднем уменьшается в 1,5 раза, и в 10 раз – в области АС (7 тыс. элементов).

Речная система Селенги имеет наивысший порядок (9) в бассейне оз. Байкал и представлена несколькими крупными речными системами.

Речная система Идэр. ОФС представлена множеством временных и постоянных со слепыми устьями водотоков. Расположенное в истоке оз. Тэлмэн-Нур, характеризуется как локальное понижение рельефа и служит своеобразной емкостью аккумуляции стока в меженный период и является бессточным, а в период максимального увлажнения озеро является проточным и за счет системы эпизодических и временных тальвегов сформируется крупный приток, непосредственно впадающий в р. Идэр. Речная сеть ОТС представлена преимущественно постоянными водотоками, характеризующиеся наибольшими уклонами и высотами поверхности водосбора и тальвегов всего бассейна. ОАС в меженный период представлена только главной рекой, в период переувлажнения формируется местный сток.

Речная система Мурэн. ОФС и ОТС речная сеть представлена в основном постоянными водотоками. Для ОАС характерны наибольшие высоты и поверхности водосбора и тальвегов, что является благоприятным условием для формирования местного стока. Большой местный объем стока в период повышенной водности формируется за счет правого притока – р. Бугсейн-Гол, в истоках которого находится крупный источник аккумуляции стока проточное оз. Сангийн-Далай-Нур.

Река Орхон – самая длинная река в пределах Монголии, именно р. Орхон дает 9 порядок всей РС Селенги. Левобережная часть бассейна ОФС и ОТС характеризуется чередованием невысоких хребтов и межгорных котловин, и только истоки находятся на хр. Хантай (3539 м), что благоприятствует аккумуляции влаги и формированию значительного стока в период максимального

увлажнения. По динамической модели характерно большое количество эпизодических и временных водотоков (до 4–5 порядка), имеющие слепые устья. Рельеф правобережной части ОФС и ОТС бассейна горный с крутыми склонами, с благоприятными условиями формирования стока. Для левобережной части бассейна ОАС характерно наличие только тальвегов с эпизодическим стоком, для правобережной – присутствие постоянного водотока (р. Бурын-Гол), за счет значительной амплитуды высот поверхности бассейна и тальвегов, здесь формируются значительные объемы местного стока в период максимального увлажнения.

Основное русло р. *Эгийн-Гол*, в отличие от всех РС бассейна, не входит в ОФС, а расположено в ОТС, здесь же имеется мощный источник аккумуляции – оз. Хубсугул. За счет регулирующей функции оз. Хубсугул и большими уклонами тальвегов в период максимального увлажнения формируется мощный сток в истоке р. Эгийн-Гол и имеет высокий (6) порядок. В ОАС отмечены наибольшие уклоны тальвегов и поверхности водосбора, что является благоприятным условием для формирования местного стока.

ОФС и ОТС РС *Джиды* характеризуется достаточно большим количеством тальвегов временной и эпизодической сети с благоприятными условиями стокоформирования. ОАС представлена главной рекой с системой эпизодических и временных водотоков со слепыми устьями, сток которых осуществляется подрусловым потоком, вследствие чего ОАС является областью потерь стока. В период максимального увлажнения здесь формируются значительные объемы местного стока.

Верхняя часть ОФС и ОТС речной системы *Чикой* охватывает территорию, входящую в систему Хантэй-Чикойского нагорья с наиболее густой речной сетью. Для ОАС по статической модели характерно наличие главного русла реки и притоков со слепыми устьями, в период повышенной водности формируется сеть притоков до 4-го порядка.

Рельеф ОФС и ОТС в бассейнах рек *Хилок* и *Уда* преимущественно среднегорный, с максимальными высотами водосбора до 2000 м, тальвегов – до 1700 м. Почвенно-геологические условия ОАС способствуют потерям стока, большинство постоянных водотоков имеют слепые устья.

Речная система Темник ОФС расположена в узкой продольной котловине с незначительной по мощности элементарной сетью. В ОАС основное русло р. Темника разделяется на множество рукавов, а расположенное здесь оз. Гусиное служит мощным регулятором стока, из которого в период повышенного стока формируется водоток 5-го порядка.

По полученным результатам исследования была создана картосхема пространственно-типологического распределения речных систем бассейна р. Селенги по областям стока (рис. 2).

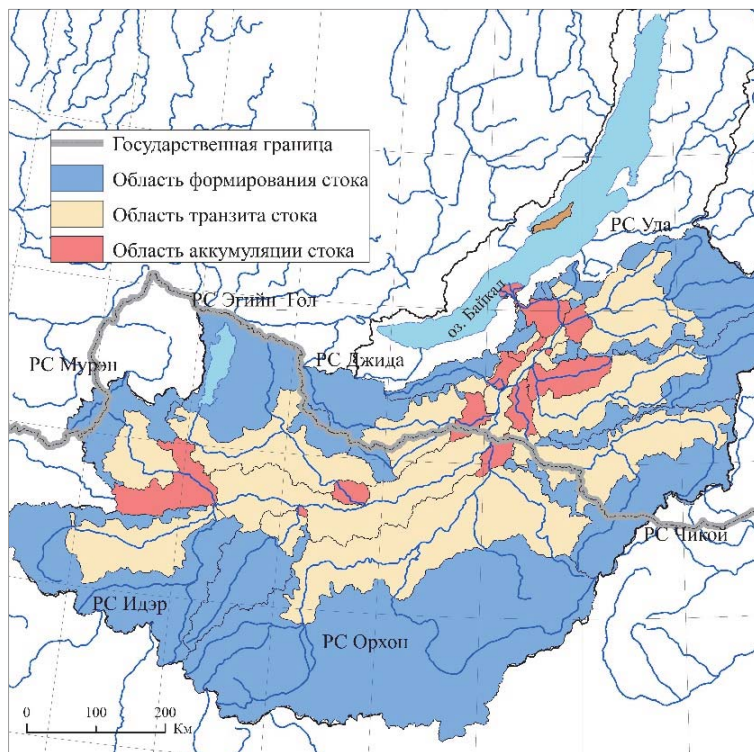


Рис. 2. Пространственно-типологическое распределение речных систем бассейна р. Селенги по областям стока

Выводы

Индикационные исследования широко используются при решении гидрологических задач мало изученных районов. Структурно-гидрографический метод выступает весьма значимым ресурсом оценки условий формирования поверхностного стока. На основе данного метода выделены области формирования, транзита и аккумуляции стока. По полученным результатам исследования была создана картосхема пространственно-типологического распределения речных систем бассейна р. Селенги по областям стока. Наибольший вклад в формирование стока в бассейне р. Селенги приносят речные системы, имеющие наибольшую насыщенность элементарными водотоками. Изрезанность поверхности и наличие тальвегов с эпизодическим стоком в областях транзита и аккумуляции способствуют формированию здесь поверхностного стока.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГ СО РАН им. В. Б. Сочавы (№ государственной регистрации АААА-А21-121012190059-5.

Список литературы

1. Амосова И. Ю., Ильичева Е. А. Пространственное распределение структурно-гидрографических характеристик речных систем бассейна озера Байкал // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле, 2020. Т. 34. С. 21–36. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.34.21>
 2. Антипов А. Н., Федоров В. Н. Ландшафтно-гидрологическая организация территории. Новосибирск : СО РАН, 2000. 254 с.
 3. Гарцман Б. И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценки риска. Владивосток : Дальнаука, 2008. 223 с.
 4. Заславский М. Н. Эрозиоведение. М. : Высшая школа, 1983. С. 183.
 5. Ресурсы поверхностных вод СССР. Л. : Гидрометеиздат, 1973. Т. 16. Вып. 3. 400 с.
 6. Хортон Р. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. Гидрофизический подход к количественной морфологии. М. : Гос. изд-во иностр. лит., 1948. 58 с.
 7. Schreve R. L. Infinite topologically random channel networks // Y. Geol. 1967. Vol. 75, N 2. P. 178–186.
 8. Strahler A. N. Hypsometric (area – altitude) analysis of erosional topography // Geol. Soc. Amer. Bull. 1952. Vol. 63. P. 1117–1142.
-

УДК 528.854.4(282.256.341)

Автоматизация алгоритмов обработки спутниковых данных в QGIS (на примере идентификации и расчета морфометрических характеристик о. Ярки)

Ф. М. Андреев (fmandreev@yandex.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Рассмотрен один способ автоматизации процессов геообработки спутниковых данных. Разработан алгоритм идентификации площадных объектов и расчета морфометрических характеристик объектов на примере о. Ярки. Рассчитаны площади о. Ярки с применением разработанного алгоритма за период с 2009 по 2023 г., с привязкой к уровням гидропоста оз. Байкал – пос. Нижнеангарск.

Ключевые слова: спутниковые данные, статистический анализ, алгоритмы, автоматизация, QGIS.

Введение

Выполнен анализ инструментов QGIS для работы с геопространственными данными. Разработаны и протестированы алгоритмы обработки спутниковых изображений различных объектов. Результаты работы показали эффективность применения автоматизации и алгоритмов машинного обучения при обработке геопространственных данных.

Цель работы заключалась в разработке автоматизированных инструментов и алгоритмов для обработки и анализа спутниковых снимков. Для достижения этой цели были использованы возможности ГИС-пакета QGIS.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- 1) изучение теоретического материала, нормативной документации, научной литературы по теме исследования;

2) разработать алгоритм для обработки спутниковых снимков, который будет включать загрузку, обработку спутниковых данных и расчет, и экспорт статистики по значениям спектральных индексов, морфодинамики о. Ярки и дельты В. Ангары;

3) разработать скрипт для построения тематических карт на основе автоматически классифицированных снимков.

Предмет исследования – процессы обработки спутниковых снимков, построение алгоритмов дешифрования спутниковых снимков.

Объект исследования – алгоритмы дешифрования спутниковых снимков.

Актуальность работы обусловлена тем, что автоматизация процессов обработки спутниковых снимков позволяет существенно сократить время и затраты на анализ данных, а также повысить точность и качество результатов. Алгоритмы дешифрования, разработанные в рамках исследования, могут быть использованы для решения различных задач, связанных с мониторингом окружающей среды, исследованием природных ресурсов, анализом городской инфраструктуры и т. д.

В ходе работы было изучено множество методов и алгоритмов, используемых в обработке и анализе спутниковых изображений, включая фильтрацию, геометрическое и тематическое корректирование, классификацию и дешифрирование объектов.

Исходные данные и методы

В качестве исходных данных использованы данные мультиспектральной спутниковой съемки Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI/TIRS и Landsat 9 OLI/TIRS дельты В. Ангары (рис. 1) за период с 2009 по 2023 г., с привязкой к уровням гидропоста оз. Байкал – пос. Нижнеангарск [1].



Рис. 1. Исходные данные: спутниковые снимки дельты В. Ангары за 2009 г. (Landsat 5 TM – слева) и 2023 г. (Landsat 9 OLI/TIRS – справа)

Разработка алгоритма обработки данных выполнялась в среде QGIS с помощью встроенного редактора моделей. На предварительном этапе работы выполняется построение векторной маски вокруг объекта исследования (рис. 2).

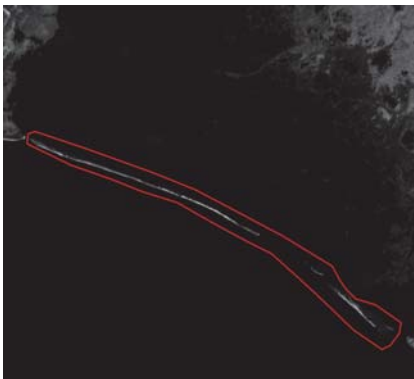


Рис. 2. Векторная маска вокруг о. Ярки на растровом слое

Далее алгоритм производит расчет индекса WRI внутри построенной векторной маски, а также реклассификацию обрезанного растрового слоя на основе принципа «суша-вода». (рис. 3).

На завершающем этапе выполняется построение контура объекта исследования, исправление геометрии векторного слоя, построение полигонального слоя объекта и расчета площади объекта исследования (рис. 4).

Результаты

Результаты работы показывают, что автоматизация процессов обработки спутниковых изображений с использованием QGIS и алгоритмов машинного обучения позволяет существенно повысить эффективность и точность дешифровальных работ, а также сократить время выполнения работ. Результаты работы свидетельствуют о перспективности использования автоматизации и алгоритмов машинного обучения для обработки и анализа спутниковых данных в геоинформационных системах, таких как QGIS.

Выполнен анализ возможностей QGIS для решения поставленных задач. В рамках работы были использованы инструменты для обработки изображений, такие как геокоррекция, фильтрация, классификация и анализ объектов, и статистики.

На основе анализа спутниковых изображений дельты В. Ангары и о. Ярки были разработаны и успешно протестированы алгоритмы дешифровки. Эти алгоритмы позволяют автоматизировать процесс дешифровки и повысить точность результатов. Они могут быть использованы для анализа других объектов и территорий, а также для улучшения качества спутниковых изображений. Разработаны алгоритмы первичной подготовки спутниковых снимков и цифровой модели рельефа (ЦМР), алгоритмы расчета спектральных индексов NDVI и WRI.

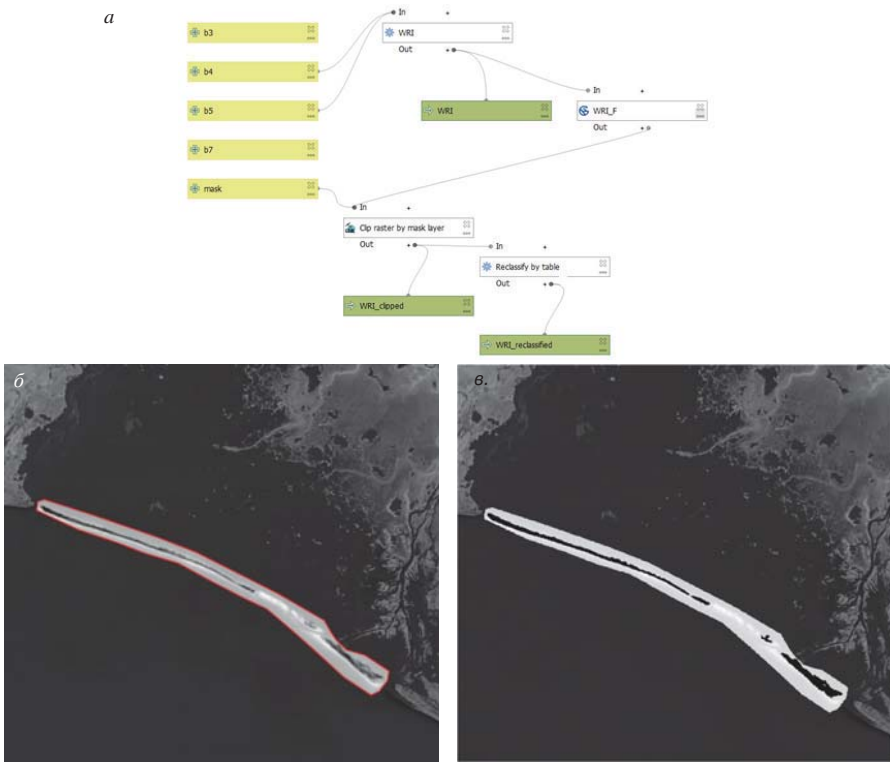


Рис. 3. Первичный этап алгоритма в редакторе моделей QGIS (а), результат обрезки растра WRI (б) и реклассифицированный растр WRI (в)



Рис. 4. Границы о. Ярки (векторный слой) и фрагмент алгоритма обработки данных для определения границ и создания полигонального слоя о. Ярки

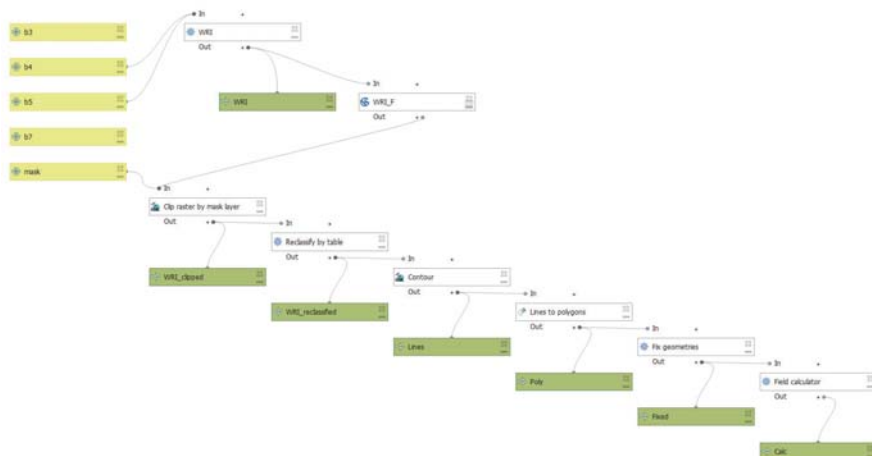


Рис. 5. Итоговый вид алгоритма обработки данных для определения границ и создания полигонального слоя о. Ярки в QGIS

На основе WRI разработан алгоритм по дешифрованию спутниковых снимков – расчету морфометрических параметров о. Ярки и дельты В. Ангары, определению площади, морфодинамических показателей и формирование статистического материала (табл., рис. 6). Алгоритмы разработаны для данных Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI/TIRS и Landsat 9 OLI/TIRS.

Таблица

Площади о. Ярки за период 2009–2023 гг.

Дата	Источник	Ф. о. Ярки, км ²	Н _{оз.Байкал} , м БС
10.06.2009	Landsat 5 TM	2,703	455,43
12.07.2009	Landsat 5 TM	2,577	455,34
11.06.2010	Landsat 5 TM	2,601	455,36
17.07.2011	Landsat 5 TM	2,612	455,37
13.06.2012	Landsat 5 TM	2,563	455,33
15.07.2012	Landsat 5 TM	2,398	455,21
09.06.2013	Landsat 5 TM	2,405	455,21
13.06.2014	Landsat 5 TM	2,385	455,20
20.07.2014	Landsat 5 TM	2,314	455,15
11.06.2015	Landsat 5 TM	2,273	454,98
13.07.2016	Landsat 8 OLI	2,488	455,52
10.06.2017	Landsat 8 OLI	2,258	454,89
18.06.2018	Landsat 8 OLI	2,112	454,92
24.07.2019	Landsat 8 OLI	2,523	455,33
17.06.2020	Landsat 8 OLI	2,536	455,20
12.06.2021	Landsat 8 OLI	2,611	455,04
13.07.2021	Landsat 8 OLI	2,135	455,08
23.06.2022	Landsat 9 OLI	2,413	455,49
27.07.2023	Landsat 9 OLI	2,405	455,50

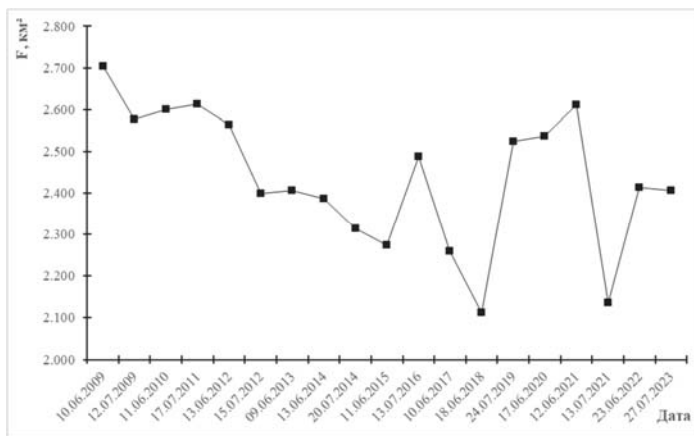


Рис. 6. Динамика площади о. Ярки за период 2009–2023 гг.

Выводы

При наличии большого количества спутниковых данных, выполнение расчета морфометрических параметров и статистического анализа объекта исследования может быть значительно упрощено и ускорено путем привлечения геоинформационных систем (ГИС) и средств построения геомodelей, таких как QGIS. Это позволит интегрировать все необходимые данные, автоматизировать процесс обработки и анализа, а также визуализировать результаты.

В результате выполненной работы получены данные площадей о. Ярки с 2009 по 2023 г. Приобретены навыки построения геомodelей в среде QGIS. Нарботанный, входе выполнения данной работы материал, будет использован при написании работы на тему применения инструментов и средств языка программирования Python в задачах анализа многоканальных спутниковых изображений, интеграции кода в QGIS и во внешние источники обработки, интеграция скриптов Python в среде QGIS, для выгрузки статистики, формирование отчетов и визуализация данных, построение тематических сравнительных (обзорных) карт исследуемых объектов. Проработка вопроса возможности внедрения машинного обучения геомodelи в среде QGIS или экспорта данных в другую среду разработки. Расчет морфометрических параметров о. Ярки и В. Ангары с помощью разработанного алгоритма за весь доступный период.

Список литературы

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 25.10.2022).

УДК 556.5(470.22)

Влияние атмосферной циркуляции на уровенный режим озерных систем

А. А. Батмазова (batmazovaa@mail.ru), Е. В. Гайдукова (oderiut@mail.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Рассмотрено изменение уровенного режима оз. Лексозеро на базе данных гидрологического озерного поста с. Реболы с точки зрения влияния на него атмосферной циркуляции как глобального климатического фактора. Описаны особенности проявления элементарных синоптических процессов Г. Я. Вангенгейма. Оценена степень связи между синоптическими процессами, осадковыпадением и температурой воздуха в разные сезоны года. Установлена и описана связь между синоптической деятельностью и уровенным режимом озерных систем на примере оз. Лексозеро. И, как следствие, обоснована необходимость учета повторяемости синоптических процессов при анализе ретроспективной гидрологической информации, а в дальнейшем – при прогнозе и моделировании гидрологических характеристик. Установлена инерционность системы элементарный синоптический процесс – осадковыпадение – подъем уровня оз. Лексозеро.

Ключевые слова: атмосферная циркуляция, осадковыпадение, климатические факторы, уровенный режим, оз. Лексозеро.

Введение

Озерные системы Карелии являются объемным и наиболее хорошо изученным лимнологическим пластом России. Обширно развитая гидрографическая сеть, умеренно холодный с признаками морского климат и достаточно комфортная транспортная доступность региона позволяет качественно изучать эту территорию. Однако, несмотря на перечисленные факторы, положительно влияющие на исследовательскую деятельность, в этом регионе изучено всего около 1 % озер [7].

Озера являются водоемами замедленного водообмена, и процессы, протекающие в их бассейнах, можно рассматривать в качестве индикаторов происходящих климатических изменений.

Одним из основных процессов в озере является формирование уровенного режима. При исследовании уровенного режима озер различными учеными выявлялись всевозможные закономерности: тенденции, амплитуда, периоды стояния высоких и низких уровней. Оценить эти закономерности можно при анализе уравнения водного баланса, в которое входит элемент W_{oc} – приходная характеристика, соответствующая количеству выпавших на поверхность озера атмосферных осадков [5].

Основой процесса образования осадков можно считать формирование циклонов, которые, в свою очередь, зарождаются как область пониженного давления на границе двух масс воздуха разной температуры. Эти и многие другие движения в атмосфере формируют и определяют глобальную атмосферную циркуляцию, которая, конечно, как и все в природе претерпевает пространственно-вре-

менные изменения, приводящие к смене барического поля и направления воздушных потоков. Периоды таких изменений в структуре атмосферных процессов конкретных регионов называются элементарными синоптическими процессами (ЭСП), каждый из которых отнесен к одной из трех выделенных форм атмосферной циркуляции (W, E, C) и которые обуславливают выпадение осадков и температурный режим над рассматриваемым регионом [4], что в свою очередь оказывает влияние на уровень режим озер.

Материалы и методы

Атмосферная циркуляция является одним из основных климатообразующих факторов. Вид и величина выпавших осадков зависят от количественного соотношения облачных элементов, находящихся в твердой или жидкой фазах. Фазовое состояние осадков, в свою очередь, зависит от температуры воздуха у земной поверхности и средней температуры воздуха между поверхностью Земли и верхней границей пограничного слоя атмосферы. А одним из наиболее важных факторов выпадения осадков является циркуляция атмосферы.

Из написанного выше следует, что присутствует согласование между колебаниями осадков и индексов атмосферной циркуляции. Так, например, при западном типе циркуляции (W) классификации Г. Я. Вангенгейма наблюдается действие южных циклонов, которые дают избыток осадков над нормой.

В типизации Г. Я. Вангенгейма форма атмосферной циркуляции устанавливается на основе анализа метеорологических процессов в атлантико-евразийском секторе полушария. Каждый месяц характеризуется числом дней с основными формами циркуляции: W, E, C. Число дней с каждой формой циркуляции является количественной оценкой атмосферных процессов. Эта оценка используется весьма широко и в ряде случаев хорошо характеризует воздействие атмосферных процессов на гидрологический объект [3].

Для выполнения исследования потребовались следующие данные: повторяемость элементарных синоптических процессов за каждый день за период с 2008 по 2013 г.; суточные значения приземной температуры воздуха и осадков метеорологической станции с. Реболы и ежедневные уровни воды оз. Лексозеро – с. Реболы.

В статье представлены следующие результаты:

- анализ общей повторяемости ЭСП по годам;
- анализ сезонной повторяемости ЭСП за отдельные годы;
- оценка влияния повторяемости того или иного типа ЭСП на температурный режим бассейна оз. Лексозеро;
- анализ многолетней повторяемости ЭСП по сезонам;
- оценка влияния преобладающих типов ЭСП в разные сезоны года на гидрометеорологические характеристики.

Результаты

Учет особенностей элементарных синоптических процессов позволил выполнить анализ их связей с такими метеорологическими параметрами как приземная температура воздуха и месячная сумма осадков, а также оценки влияния совокупности всех этих факторов на уровень режим оз. Лексозеро [6; 9].

Для каждого года определена повторяемость типов ЭСП и представлен их вклад в процентах в общую циркуляцию атмосферы. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Общая повторяемость ЭСП по годам

Год	2008			2009			2010			2011			2012			2013		
Тип	Е	W	С	Е	W	С	Е	W	С	Е	W	С	Е	W	С	Е	W	С
<i>n</i>	127	175	64	151	126	88	166	105	94	154	139	72	151	143	72	144	126	95
%	35	48	17	41	35	24	45	29	26	42	38	20	41	39	20	39	35	26

n – повторяемость элементарного синоптического процесса в днях

■ – преобладание западного типа циркуляции (W)

■ – преобладание восточного типа циркуляции (E)

По таблице видно, что наибольший вклад в атмосферную циркуляцию вносит восточный тип циркуляции (E) во всех годах за исключением 2008 г. – там преобладает западный тип (W). Это объясняет факт увеличения в 2009–2013 гг. числа холодных дней по сравнению с 2008 г. (рис. 1).

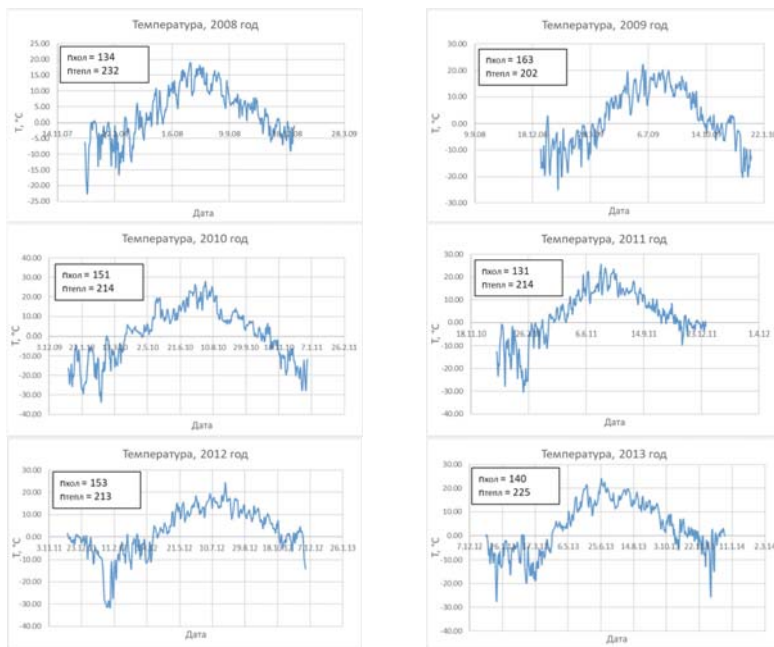


Рис. 1. Годовой ход температур воздуха и количество дней холодного и теплого периодов

Анализ сезонной изменчивости элементарных синоптических процессов за каждый год показал следующее [8]. В 2008 г. зимой, летом и осенью преобладающим ЭСП был западный тип циркуляции (W), весной превалировал восточный тип (E) с наиболее значимым за весь год меридиональным типом (C). В 2009 г. с зимы до лета преобладал тип (E) с максимумом типа (C) весной. В 2010 г. отличительным был весенний период с максимальной повторяемостью западного типа циркуляции (W), в остальную же часть года господствовал восточный тип (E). В 2011 и 2013 гг. наблюдалась одинаковая ситуация: зимой и осенью наблюдался западный тип циркуляции (W), а весной и летом – восточный (E), но по суммарному числу случаев преобладал восточный тип (E). В 2012 г. зимний и летний периоды характеризовались восточным типом (E), а весна и осень – западным (W) с преобладанием меридионального (C).

Для более четкого понимания распределения случаев повторяемости ЭСП за сезоны каждого года представлена табл. 2.

Таблица 2

Сезонная повторяемость ЭСП по годам

2008											
зима			весна			лето			осень		
E	W	C	E	W	C	E	W	C	E	W	C
35	45	11	36	35	21	26	47	19	30	48	13
2009											
зима			весна			лето			осень		
E	W	C	E	W	C	E	W	C	E	W	C
38	30	23	42	25	25	46	24	22	25	47	19
2010											
зима			весна			лето			осень		
E	W	C	E	W	C	E	W	C	E	W	C
50	17	23	30	37	25	48	20	24	38	31	22
2011											
зима			весна			лето			осень		
E	W	C	E	W	C	E	W	C	E	W	C
27	45	18	42	25	25	57	26	9	28	43	20
2012											
зима			весна			лето			осень		
E	W	C	E	W	C	E	W	C	E	W	C
27	16	17	27	32	33	43	37	12	54	58	10
2013											
зима			весна			лето			осень		
E	W	C	E	W	C	E	W	C	E	W	C
31	37	22	37	26	29	48	25	19	28	38	25
■ – преобладание западного типа циркуляции (W) ■ – преобладание восточного типа циркуляции (E)											

Также были проанализированы повторяемости ЭСП по каждому сезону в отдельности за весь наблюдаемый период. В качестве визуализации анализа представлены графики на рис. 2.

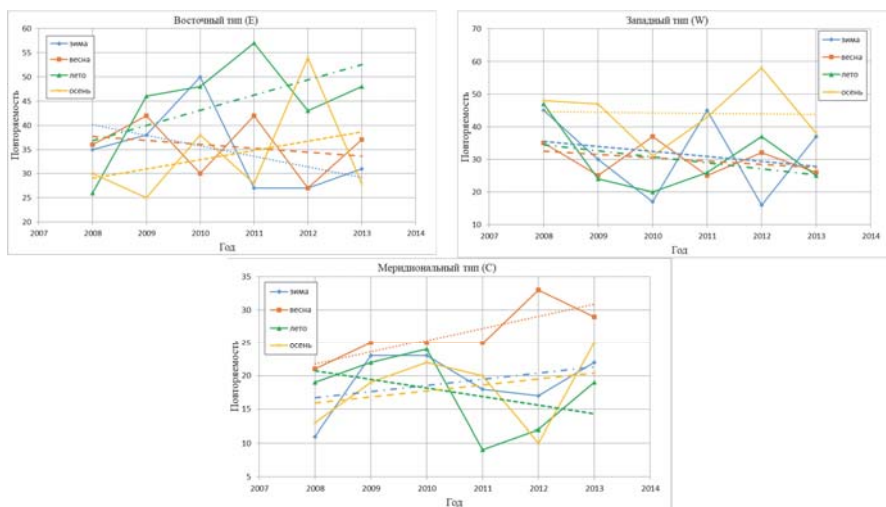


Рис. 2. Многолетняя повторяемость ЭСП по сезонам

Исходя из представленных выше графиков, можно сделать вывод, что в летние месяцы наблюдается увеличение повторяемости восточного типа циркуляции (E), плавное уменьшение количества дней с западным типом (W) и более резкое уменьшение меридионального типа (C), совокупность этих процессов повлияла на небольшую тенденцию к увеличению средней температуры воздуха с $+13\text{ }^{\circ}\text{C}$ в начале рассматриваемых летних периодов до $+15,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ – в конце периодов. Осадки в такой ситуации откликнулись непосредственно на преобладающий тип ЭСП непосредственно в период своего образования, т. е., при длительном стоянии восточного типа (E) можно наблюдать незначительное количество осадков, как, например, в период с 22.06.2010 по 30.06.10 и с 05.07.2010 по 28.07.2010; а при коротком, но устойчивом периоде с западным типом (W) – большое количество осадков (12.07.2012 – 18.07.2012), на которые с некоторым запаздыванием оз. Лекосзеро откликается подъемом уровня воды [1].

Также для примера рассмотрим зимний период, в котором наблюдается ярко выраженное снижение элементарных синоптических процессов западного (W) и восточного (E) типов и достаточно рост процессов меридионального типа (C). При такой ситуации наблюдается следующее: снижение средней температуры воздуха в начале рассматриваемых зимних периодов с $-4,87$ до $-6,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ – в конце, с сильным минимумом в 2010 г., который составил $-16,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Также наблюдается тенденция на понижение количества осадков: амплитуда колебаний их сумм преимущественно отрицательная и лежит в пределах от 71 до 183 мм;

наименьшие значения встречаются в 2009 и 2010 гг., когда господствует меридиональный тип циркуляции (С), а наиболее – в 2008 и 2013 гг., когда основным типом циркуляции является западный (W), который в течение каждого года является причиной выпадения осадков. Подъем уровней воды в озере в зимние периоды можно также отследить в годы с западной (W) циркуляцией.

Графики хода гидрометеорологических величин по сезонам можно увидеть на рис. 3. По левой оси ординат – уровни воды и приземная температура воздуха, по правой оси ординат – осадки, которые на графике отображены сверху.

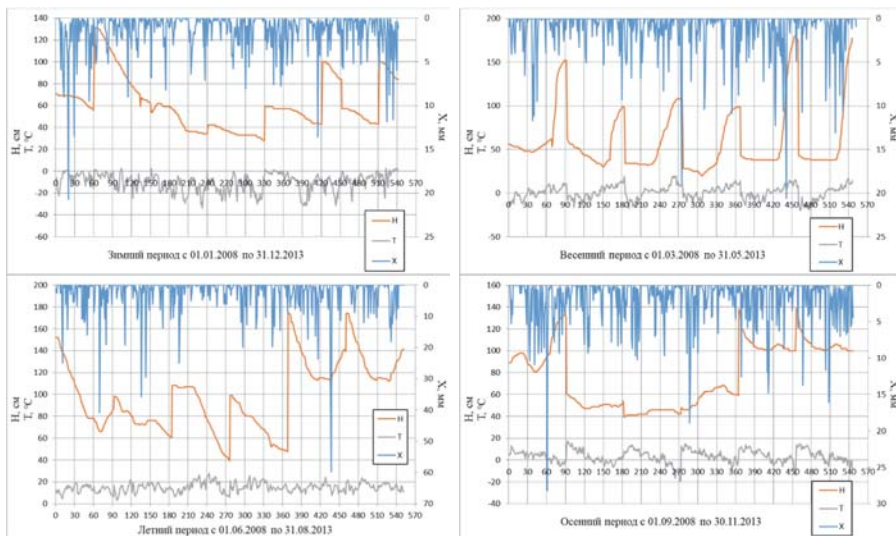


Рис. 3. Сезонные графики хода гидрометеорологических параметров

Выводы

Можно заметить, что в рассматриваемом временном интервале (2008–2013 гг.) преобладающим типом атмосферной циркуляции является восточный (С). Число его дней является наибольшим как в целом за годы, так и в сезонном разрезе, а наиболее часто этот тип ЭСП наблюдается летом. Западный же тип (W), напротив, имеет тенденцию к уменьшению своей повторяемости. Однако, несмотря на это, все равно прослеживается его доминирующее воздействие на уровеньный режим оз. Лексозеро, поскольку является первопричиной осадковыпадения, что можно отследить по совмещенным графикам.

Также стоит отметить, что отклик на тот или иной тип циркуляции не обязательно будет происходить мгновенно. Особенности циркуляции одного сезона могут сказаться через несколько месяцев [2]. Поэтому изучать влияние синоптических процессов на гидрометеорологические характеристики следует с боль-

шим запасом ретроспективной информации с целью отслеживания циклических и похожих комбинаций ЭСП с температурой воздуха, осадками и другими метеорологическими параметрами.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ № FSZU-2023-0002.

Список литературы

1. Методика оценки водного режима рек Арктики с учетом возможного таяния многолетней мерзлоты / А. А. Батмазова, Е. В. Гайдукова, М. В. Ковалева, Н. А. Решин // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации. Мурманск, 2023. С. 32–34.
2. Батмазова А. А., Гайдукова Е. В., Хаустов В. А. Прогноз стока рек Арктики в период весеннего половодья с учетом возможных изменений климата // Наука, общество, технологии: проблемы и перспективы взаимодействия в современном мире. Петрозаводск, 2022. С. 96–120.
3. Вангенгейм Г. Я. Опыт применения синоптических методов к изучению и характеристике климата. М. : Изд-во ЦУГМС, 1935. 112 с.
4. Дмитриева А. А., Дубравин В. Ф., Белязо В. А. Атмосферные процессы Северного полушария (1891–2018 гг.), их классификация и использование. СПб. : СУПЕР Изд-во, 2018. 306 с.
5. Догановский А. М. Уровненный режим озер – интегральный показатель климатических и экологических изменений // Общество. Среда. Развитие (Тетра Нумана). 2007. № 1. С. 103–110.
6. Козлович В. И., Сапожникова Е. В. Типы атмосферной циркуляции над Атлантикой и формирование заточек североморских вод в Балтийское море // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2013. Вып. 1. С. 76–81.
7. Менишуткин В. В., Филатов Н. Н., Потахин М. С. Экспертная система «Озера Карелии». 1. Порядковые и номинальные характеристики озер // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 2. С. 160–171.
8. Прохорова У. В., Священников П. Н., Иванов Б. В. Исследование временной изменчивости характеристик атмосферной циркуляции в районе арх. Шпицберген // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 4 (114). С. 47–57.
9. Чердениченко А. В. Проявление индексов циркуляции для атлантико-европейского сектора во временных рядах температуры и осадков на территории Казахстана // Гидрометеорология и экология. 2010. № 1. С. 22–35.

УДК 556.542(282.256.341.9)

Результаты мониторинговых гидроморфологических исследований в устьевых системах рек Сармы, Анги, Бугульдейки

С. Х. Габриелян (imperator.gs24@mail.ru)¹, Е. А. Ильичёва (lenail3663@mail.ru)^{1,2}, М. В. Павлов (maksimpavlov_v@mail.ru)², А. А. Ушкалов (lolitamen@mail.ru)^{1,2}, Ю. И. Шкимелис (jcract@mail.ru)¹

¹Иркутский государственный университет, г. Иркутск

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

Аннотация. Проведены исследования распределения стока в различных морфогенетических типах устьевых систем западного побережья Байкала. Определены типы и границы элементов устьевых областей рек Сармы, Бугульдейки, Анги на основе принятых классификаций и схем районирования с учетом особенностей геолого-тектонического строения побережий Байкала. Выявлена динамика берегового края при сравнительном морфометрическом анализе космоснимков и топографических карт разных лет. Вычислены коэффициенты развития береговой линии, показывающие направленность устьевых процессов. Гидрометрические наблюдения выполнялись на ранее установленных створах, обеспеченных планово-высотной привязкой. Исследование стока воды, взвешенных, влекомых и руслоформирующих наносов и береговых отложений проведены классическими методами, а также применялись авторские седиментационные ловушки и пробоотборники. Для наблюдений и выявления взаимосвязи режима подземных и речных в период открытого русла использованы данные с датчиков автоматизированного контроля уровня и температуры воды, установленных на морфостворах в р. Сарме.

Ключевые слова: устьевая область, морфогенетический тип устья, псевдodelьта, эстуарно-дельтовая система, расход воды, наносы, мониторинг.

Введение

В настоящем исследовании представлены данные о стоке воды и наносов в устьевых областях рек Сармы, Анги и Бугульдейки за период открытого русла 2023 г., полученные для продления гидрометрических рядов наблюдений и выявления причин невязки баланса стока, а также для изучения специфики развития различных морфогенетических типов устьев притоков Байкала. В предшествующих работах [2; 3; 6] была показана интегральная схема пространственной взаимосвязи типов устьевых областей с порядком реки, морфоструктурными особенностями побережья, геометрией и типом берега и взморья. В результате морфогенетической типизации, среди классических типов были выявлены псевдodelьты, развивающиеся на пролювиально-аллювиальных конусах выноса, и приуроченные к рекам Приморского и Байкальского хребтов. Опыт гидрологических работ, проводимых сотрудниками ИГ СО РАН и студентами ИГУ, показал значительную невязку в балансе расходов воды между приустьевым участком русла реки и в рукавах разветвленной речной сети псевдodelьты р. Сарма и в руслах эстуарно-дельтовых устьевых систем рек Анги и Бугульдейки. В пределах устьевых областей обнаруживается потеря стока (до 50 % и более), которую мы связываем с подрусловой составляющей, фильтрацией через толщу рыхлых

отложений и выходом поверхностных вод на поймы в периоды прохождения высоких вод (половодье и паводки). В данном исследовании показаны результаты гидроморфометрических наблюдений за стоком, динамикой береговой линии устьевых областей в связи с уречным режимом принимающего водоема за последние годы. А также представлены графики и дан анализ хода кривых уровня в протоках р. Сармы, полученных с датчиков полуавтоматического контроля уровня воды.

Материалы и методы исследований

Исследования начаты с анализа уречного режима оз. Байкал. Данные по уровню Байкала получены с озерных станций п. Хужир и бух. Песчаная [1] для оценки влияния подпора водами Байкала береговой линии и русловой системы устьев. Отметки водной поверхности озера представлены в Балтийской системе высот за период 2008–2021 гг. для удобства работы с топографическими картами, космоснимками, ортофотопланами и данными РТК-съемки (рис. 1). Для получения абсолютных отметок реперов проведена РТК-съемка (Real-Time Kinematic Survey). Данный подход позволяет проводить мониторинговые морфометрические работы и провести сравнительный анализ динамики уровней воды и русловых горизонтальных и вертикальных деформаций. На морфостровах выполнялись гидрометрические работы классическими методами: измерялись ширина и глубины русла, скорости потока на вертикалях, описывался характер донных отложений, и отбирались пробы воды на гидрохимический анализ и расчет стока взвешенных наносов. Уровень поверхностных вод привязывался нивелирной съемкой к отметкам репера. Для устьевой области р. Сармы проведены измерения уровня грунтовых вод в скважине и канале. В 2022 г. начаты мониторинговые наблюдения на установленных в руслах пяти логгеров давления и температуры воды. Для приведения значений давления с логгеров в ход уровней воды были использованы срочные данные наблюдений за атмосферным давлением на метеостанции Хужир [5]. Комплекс мониторинговых исследований 2022 г. включал в себя и оценку стока наносов. В целом для исследуемых рек сток наносов невелик и составляет в вершине устьевых систем от 0,001 до 1,98 кг/с. Выделялась органическая составляющая наносов, величины которых на пределе обнаружения приборов и составляла 0,0009 г/дм³.

Результаты

За период с 2017 г. отмечается значительный подъем уровня, в среднемноголетнем ходе колебаний уровня подъем составил 0,6 м, с максимальной амплитудой 1,12 м (2021 г.). Подъем уровня воды принимающего водоема оказывает значительное влияние на развитие устьевое взморья и устьевое участка реки, что выражается в затоплении озерного края, подпоре выхода речных вод.

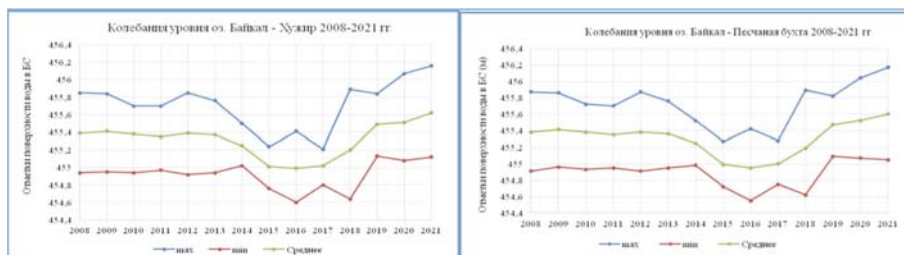


Рис. 1. Колебания уровня оз. Байкал по о. с. Хужир и бух. Песчаная

На морфостворах выполнялись гидрометрические работы классическими методами: измерялись ширина и глубины русла, скорости потока на вертикалях, описывался характер донных отложений, и отбирались пробы воды на мутность, проведен опыт изучения стока влекомых наносов. Уровень поверхностных вод привязывался нивелирной съемкой к отметкам репера. Для устьевой области р. Сармы проведены измерения дебита грунтовых вод в канале, сохранившихся со времени функционирования рыбопроизводного завода. Работы на морфостворах проведены в различные фазы водного режима: на спаде половодья (конец мая – начало июня) и в период осенней межени (вторая половина сентября) 2023 г. Результаты осеннего мониторинга представлены в табл. 1, 2. Динамика русловой морфометрии на рис. 1. Расположение гидропостов в УО р. Сарма на рис. 2, поперечные профили морфостворов на рис. 3.

Сток наносов изучается детально впервые; в 2023 г. начаты наблюдения за взвешенными, влекомыми и руслоформирующими наносами в комплексе. К настоящему времени подготовлены результаты по расходам взвешенных наносов, гранулометрическому составу руслообразующих наносов, данные по стоку влекомых наносов пока в стадии лабораторных исследований.

Таблица 1

Гидроморфометрические параметры в створах мониторинга

Точка наблюдений	V, м/с	ω, м ²	Q, м ³ /с	h _{ср} , м	B, м
Анга – 02.06	0,85	6,9	6,2	0,41	19,5
Бугульдейка – 31.05	0,85	15,7	13,5	0,83	22,7
Сарма ВД – 01.06	0,98	14,9	15,7	0,83	18
Сарма ГП4 – 01.06	0,75	1,73	1,27	0,38	4,14
Сарма ГП 3 – 01.06	0,5	1,96	0,87	0,32	5,3
Сарма ГП2 – 01.06	1,1	5,65	11,8	0,3	19
Анга -27.09	0,29	3,46	1,00	0,26	13,3
Бугульдейка верхний створ – 25.09	0,48	18,16	8,72	0,80	22,7
Бугульдейка нижний створ – 25.09	0,65	7,84	5,10	0,37	21,2
Сарма ВД -26.09	0,65	12,92	8,40	0,76	17
Сарма ГП4 – 26.09	0,16	1,03	0,17	0,24	4,3
Сарма ГП3 – 26.09	0,71	1,29	0,92	0,29	4,45
Сарма ГП2 – 26.09	0,3	5,60	1,68	0,30	18,65



Рис. 2. Расположение гидропостов в русловой сети устьевой области р. Сармы.
Положение береговой линии в 2023 г. на снимке 2013 г.

Воды исследованных рек характеризуются весьма незначительным стоком наносов. Первичные данные о стоке взвешенных наносов показывают, что в течение периода открытого русла происходит кратное уменьшение наносов и, так называемое, осветление речных вод с момента половодья к осенней межени. Однако исключение составляет резкое повышение поступления минерального материала в вершину дельты р. Сарма в осенний период, пока этому феномену нет научно-обоснованных объяснений.

Расходы в вершине устьевой системы р. Сармы существенно изменялись в различные фазы гидрологического режима от $15,7 \text{ м}^3/\text{с}$ на спаде половодья до $8,4$ в период осенней межени. Общая тенденция распределения стока показывает высокую долю левого рукава, от $11,8$ в осеннюю межень 2023 г. до на спаде половодья до $1,68$ в осеннюю межень (табл. 3, рис. 4). При высоких уровнях воды происходит сток по пойме, УВВ может достигать $1\text{--}1,5$ м. Обращает на себя внимание постоянная невязка в балансе стока от вершины к рукавам, составляющая $7,8\text{--}83,7\%$ за весь период наблюдений (2013–2023 гг.).

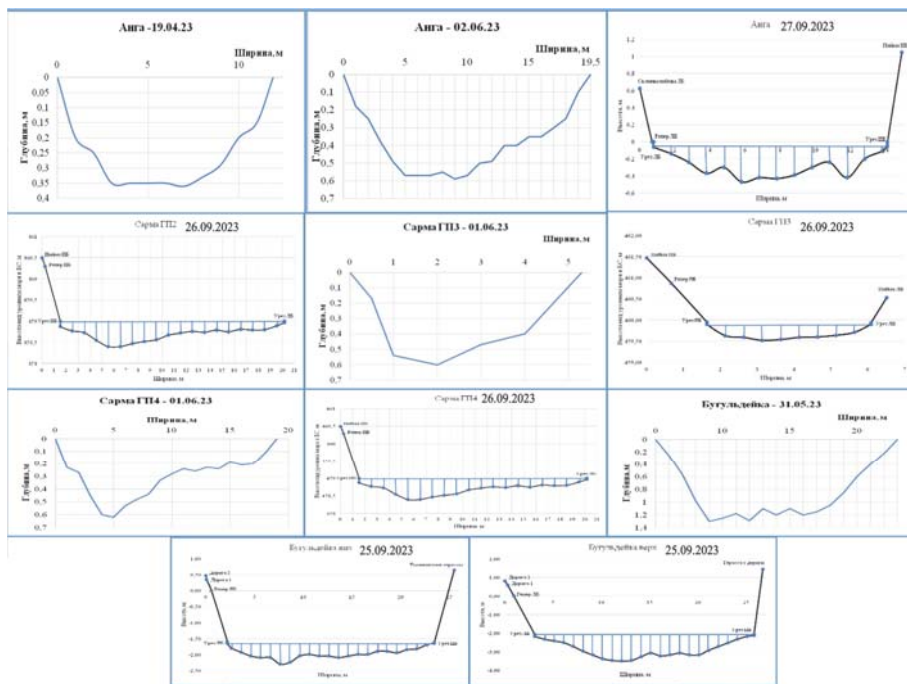


Рис.3. Поперечные профили морфостворов

Таблица 2

Сток взвешенных наносов (сентябрь 2023 г.)

Точка наблюдений	R, кг/с	
	Июнь	Сентябрь
Анга – а/мост	0,054799	0,001514
Бугульдейка – 8 км от устья	0,049369	0,005104
Бугульдейка – 5 км от устья	—	0,006845
Сарма – ВД	0,049369	1,985352
Сарма – ГП4	0,003045	0,000091
Сарма – ГП2	0,019403	0,007588
Сарма – ГП3	0,000245	0,001018

Распределение стока по руслам псевдodelьты р. Сармы происходило поразному: на спаде половодья более 75 % стока проходило через левый рукав, два остальных рукава осуществляли сток от 5 до 8 %. Предположительно, потери речного стока компенсируются фильтрацией в теле конуса и последующим подрусловым стоком в Байкал (рис. 4, табл. 3). Искусственный канал дренирует межрукавное пространство в центральной части конуса и доля стока по каналу может достигать 14 %, с дебитом до 0,64 м³/с.

Невязка составила чуть более 11 %, вероятно, такое низкое значение невязки связано с более суровыми зимними условиями, длительным существованием наледи и холодной весной, что снизило скорости фильтрации

талых и полых вод в почво-грунты тела конуса псевдodelьты. В период осенней межени невязка стока составила 67 %, доли стока по основным рукавам устьевой системы распределились от почти 2 % в правой до почти 20 % в левой протоке псевдodelьты. Во многом распределение стока зависит и от гипсометрического положения русел, и от водно-физических свойств руслоформирующих наносов и почво-грунтов пойменных комплексов.

Таблица 3

Распределение стока в период открытого русла, 2023 г.

Протока	Лето	%	Осень	%
Сарма ВД	15,7	100,0	8,40	100,00
Сарма ГП4	1,27	8,1	0,17	1,97
Сарма ГП3	0,87	5,5	0,92	10,91
Сарма ГП2	11,8	75,2	1,68	19,99
Невязка, м ³ /с	1,76		5,64	
Невязка, %	11,2	11,2	67,1	67,1



Рис. 4. Сток по русловой системе псевдodelьты р. Сарма

Так, для р. Сармы по материалам ДДЗ, произошли следующие изменения (рис. 2, табл. 4). В динамике береговой линии четко видна зависимость положения от уровня принимающего водоема. В 2023 г. оказалось затоплено около 0,5 км² озерного края устьевой области, и береговая линия сместилась на расстояние до 300 м. Изрезанность и выдвинутость сократились за счет выравнивания затопления выступающих в акваторию фитогенно-наносных кос. Также затопленной оказалась морская галечная коса и участок устьевое взморья. Соответственно уменьшилась площадь устьевой области и длина береговой линии.

Таблица 4

Динамика морфометрии дельты р. Сармы

Год	B , км	$L_{\text{мк}}$, км	$L_{\text{ог}}$, км	$F_{\text{б}}$, км ²	$F_{\text{д}}$, км ²	K	N
2013	5,36	8,4	6,937	11,3	6,614	1,21	0,59
2023	5,38	8,2	6,996	11,4	6,099	1,18	0,54

Примечания: B – ширина, выдвинутой части дельты; $L_{\text{мк}}$ – длина озерного края дельты; $L_{\text{ог}}$ – длина огибающей береговой линии дельты; $F_{\text{б}}$ – площадь сопряженного полукруга, построенного по ширине дельты; $F_{\text{д}}$, км² – площадь дельты, выдвинутой за генеральную линию берега; K – коэффициент изрезанности; N – коэффициент выдвинутости дельты (по В. Н. Михайлову [4]).

Датчики (логгеры) установлены на спаде половодья, завершившегося к началу второй декады июня (рис. 5, 6). Данные автоматизированной системы контроля за давлением и температурой воды, после введения барометрической и высотной калибровки отражены на гидрографе уровня воды за летние месяцы. Отмечается более 10 пиков паводков, продолжительностью в среднем до 5 дней. Наиболее значимый паводок проходил с 03 по 09 июля, амплитуда колебаний уровня составила 40 см. Межпаводочный период осложнялся незначительными пиками. После паводка 12.08.2023 уровень воды вошел в режим осенней межени. Все отмеченные колебания уровня синхронны для проток псевдodelьты. Наибольшие амплитуды колебаний уровня характерны для левой и правой проток, тогда как уровень воды в центральной протоке менее чувствителен и имеет более выровненный тренд.

Ход температуры коррелирует с уровнем режимом. Самые низкие температуры воды зарегистрированы на спаде половодья и составляли 4,2–4,8 °С.

Низкие температуры воды наблюдались вплоть до середины июня, что обусловлено наледным режимом в поймах. Воды проток прогревались до максимальных 15,3 °С во второй половине июля, при низких меженных летних уровнях. Понижения температур воды в течение летнего периода связано с поступлением в речную сеть менее прогретых вод с горной части бассейна. В осеннюю межень температура воды составила 5,2–8,1 °С.

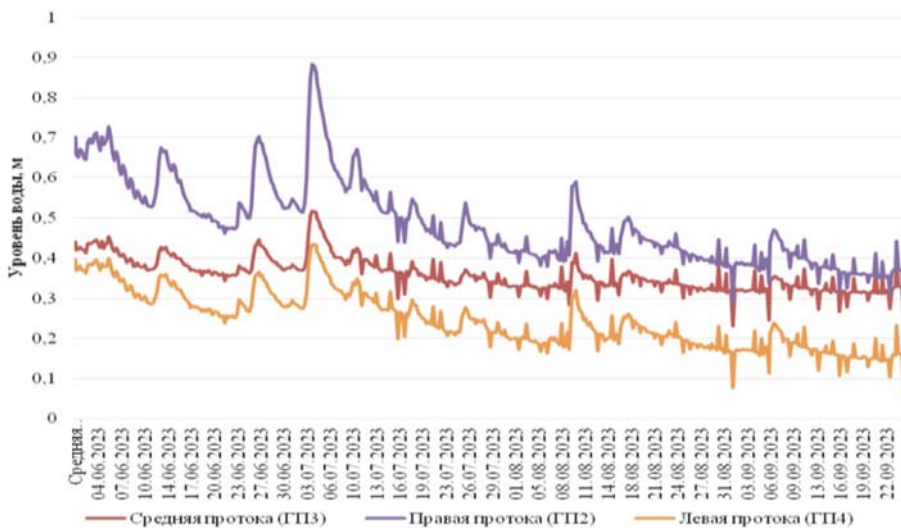


Рис. 5. График хода уровня в протоках устьевой системы р. Сармы

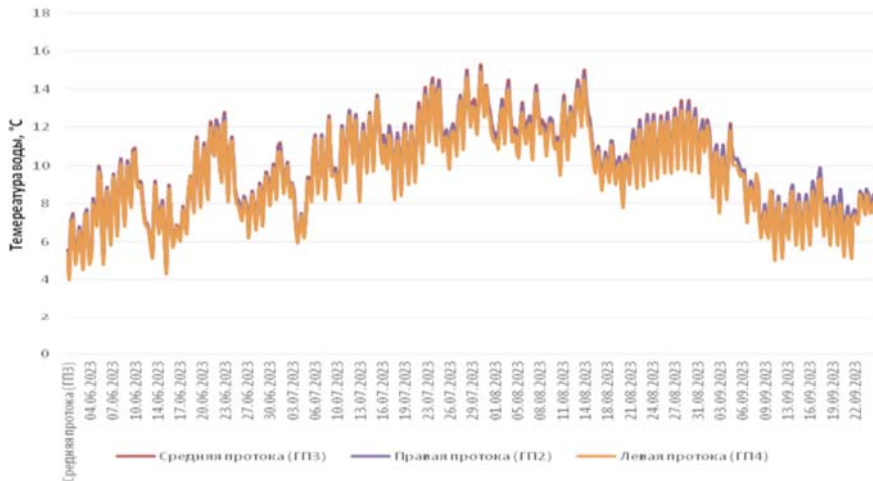


Рис. 6. График хода температуры воды в протоках р. Сармы

Заключение

Результаты проведенного исследования дополняют ряды наблюдений за стоком в устьевых системах западного побережья Байкала, динамикой береговой линии, гидрографической сети и морфологией устьевых областей. Многолетние исследования распределения стока в русловой сети и по длине устьевых участков реки выявили, что теряется значительная доля речного стока, с большой долей вероятности, на фильтрацию и подрусловый сток. В 2023 г. начато изучение стока наносов. Мутность речных вод и сток наносов обследованных рек мала, в сравнении с реками Селенгой, Верхней Ангарой и Баргузином, в связи с чем этим устьевым системам требуется гораздо более продолжительный временной промежуток для формирования многорукавных дельт выдвигания и дельт выполнения со сложной гидрографической системой.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГ СО РАН им. В. Б. Сочавы (№ государственной регистрации АААА-А21-121012190059-5).

Список литературы

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 10.11.2023).
2. Исследование байкальских побережий в устьях рек : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. «Безопасность природопользования в условиях устойчивого развития» / Е. А. Ильичева, М. В. Павлов, Д. В. Кобылкин [и др.]. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2018. С. 71–78.
3. Ильичёва Е. А., Павлов М. В. Природные факторы формирования устьев притоков Байкала / География и природные ресурсы. 2022. № 5. С. 83–92.
4. Михайлов В. Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М. : ГЕОС, 1997. 176 с.
5. Погода в мире. URL: <https://tp5.ru/> (дата обращения: 05.10.2023).
6. Illicheva E. A., Pavlov M. V., Andreev F. M. Morphodynamics of the river mouth systems of the southern Baikal depression / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. Vol. 381. Art. 012034.

УДК 551.5+556.5

Исследования региональных гидроклиматических процессов: анализ, оценки, подходы к прогнозированию

О. В. Гагаринова (whydro@irigs.irk.ru)

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

Аннотация. Обсуждается основное направление исследований лаборатории гидрологии и климатологии Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН – гидроклиматические процессы, их взаимосвязь с природными и антропогенными комплексами Сибири. Приводятся основные задачи, решаемые в рамках данного направления, а также результаты гидрологических и климатических исследований.

Ключевые слова: гидроклиматические процессы, гидрологические и климатические исследования, лаборатория гидрологии и климатологии Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН.

Гидроклиматические процессы, их взаимосвязь с природными и антропогенными комплексами Сибири – основное направление исследований лаборатории гидрологии и климатологии Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН. Основные задачи, решаемые в рамках данного направления:

- развитие теоретических основ и разработка методических принципов гидрологических и климатических исследований;
- изучение условий формирования и изменения современного состояния климата и поверхностных вод регионов Сибири;
- моделирование и прогнозирование гидроклиматических характеристик и процессов;
- разработка технологии и методов использования географической информации для решения задач управления и охраны окружающей среды.

Теоретические, методические и экспериментальные работы ведутся в рамках:

- ландшафтно-гидрологического, структурно-гидрографического и бассейнового подходов к изучению водных ресурсов;
- ландшафтно-климатических, микроклиматических и дендроклиматических методов исследований;
- многофакторного моделирования, картографирования и прогнозирования закономерностей и тенденций трансформаций климатических и гидрологических характеристик в условиях естественных природных изменений и хозяйственной деятельности.

Среди результатов гидрологических и климатических исследований можно отметить основные.

1. Разработка методологических основ ландшафтно-гидрологического анализа территории, исследования закономерностей формирования стока и оценка ландшафтно-гидрологической организации водосборов Сибири с использованием принципов данного подхода.

Научное обоснование и проектирование водоохранной зоны (ВЗ) оз. Байкал на основе ландшафтно-гидрологических принципов, включая дальнейшие

корректировки границы ВЗ в соответствии с изменяющимися социально-экономическими и нормативными условиями.

2. Анализ региональных особенностей формирования, временной изменчивости и аномальных проявлений речного стока, оценка гидролого-морфологических и русловых процессов, в том числе:

– районирование территории Иркутской области по генезису наводнений, оценка опасности наводнений в бассейнах левых притоков р. Ангары, анализ условий формирования и последствий наводнения на р. Ие (приток р. Ангары) в 2019 г.;

– разработка схемы расчета и оценка вертикальных деформаций русел рек на основе данных гидрометрических измерений сети Росгидромета;

– структурно-гидрографическое зонирование речных систем бассейна оз. Байкал на основе данных гидрологических наблюдений сети Росгидромета;

– гидролого-геоморфологические обоснования развития устьевых процессов притоков оз. Байкал; моделирование переформирования русловой сети дельты р. Селенги в различные периоды водности.

3. Исследования многолетней динамики региональных атмосферных циркуляций, условий влагопереноса, режима формирования осадков и температурных характеристик воздуха и почв, включая:

– анализ связи между мезо/макроциркуляционными процессами в нижней тропосфере и таянием ледников в горах юга Восточной Сибири;

– выявление закономерностей термического режима почв Сибири и Забайкалья;

– анализ современного состояния и изменения характеристик снежного покрова;

– оценка связи годичного прироста хвойных деревьев с климатическими характеристиками Восточной Сибири;

– разработка ежедневного каталога типов погоды для региона Восточной Сибири по методу Дженкинсона – Коллисона.

4. Разработки компьютерных технологий:

– «стохастическое моделирование» для моделирования и прогнозирования межгодовой изменчивости гидрологических и метеорологических характеристик;

– пакет программ для гидрологических расчетов и подготовки многолетних данных о режиме и ресурсах поверхностных вод суши в составе Государственного водного кадастра.

Результаты многолетних исследований, включающие анализ современного состояния и изменений региональных гидроклиматических характеристик; механизмов взаимодействия гидрологических и климатических процессов с компонентами природной и социально-экономической среды; оценка и прогнозирование аномальных гидроклиматических явлений, направлены на оптимизацию природопользования и устойчивое территориальное развитие региона.

УДК 556.16.06(282.256.34)

Сценарные изменения будущего стока в бассейне Ангары

А. С. Калугин¹ (kalugin-andrei@mail.ru), В. А. Гинзбург², И. Н. Крыленко^{1,3},
О. Н. Липка², О. В. Максимова², А. В. Мальнев⁴, Ю. Г. Мотовилов¹,
Н. О. Попова¹, А. П. Ревокатова²

¹ *Институт водных проблем Российской академии наук, г. Москва*

² *Институт глобального климата и экологии им. академика Ю. А. Израэля, г. Москва*

³ *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва*

⁴ *En+ Group, г. Москва*

Аннотация. С использованием данных глобальных климатических моделей СМIP6 получены результаты изменения гидроклиматических характеристик для бассейнов Иркутского, Братского и Усть-Илимского водохранилищ. Расчеты соответствуют трем горизонтам планирования 2026–2035, 2046–2055, 2090–2099 гг. согласно двум сценариям SSP4.5 и SSP8.5. Для расчетов климатообусловленных изменений стока в бассейне р. Ангары в XXI в. использовалась модель его формирования ECOMAG. В XXI в. вероятно изменение притока воды в Иркутское водохранилище от –20 до 1 % в зависимости от периода XXI в. и сценария потепления, снижение притока воды в Братское водохранилище согласно обоим сценариям потепления: от 5 до 17 %, а аномалии притока воды в Усть-Илимское водохранилище попадают в диапазон ± 3 % за исключением варианта конца XXI в. при SSP8.5.

Ключевые слова: Ангары, гидрологическая модель, изменения климата.

Материалы и методы исследования

Отбор наиболее точных моделей СМIP6 для исследуемого региона произведен на основе сравнения для периода 1985–2014 гг. данных каждой из моделей с данными реанализа ERA5. Сравнение последовательно проводилось по годовой сумме осадков, среднегодовой влажности и температуре воздуха. Наилучшие результаты соответствовали глобальным моделям CNRM-ESM2–1, EC-Earth3-CC и CanESM5-CanOE, которые составили ансамбль. Расчеты на XXI в. проведены для трех горизонтов планирования 2026–2035, 2046–2055, 2090–2099 гг. при сценариях SSP4.5 и SSP8.5 относительно базового периода 1985–2014 гг. Затем по этим климатическим данным были определены гидрологические последствия изменения климата на водосборах Иркутского, Братского и Усть-Илимского водохранилищ, соответствующие определенному периоду XXI в. и SSP-сценарию. Для гидрологических расчетов использована модель формирования стока ECOMAG с пространственно-распределенными параметрами типов почв и растительности [2]. Проведена калибровка ее параметров относительно данных стационарного гидрологического мониторинга за среднесуточным стоком.

Объектами исследования являются водосборы Иркутского, Братского и Усть-Илимского водохранилищ. Учитывая водосборную площадь Иркутского водохранилища 582 000 км², рассмотрено его разделение на три части основными притоками: Селенга, Баргузин и Верхняя Ангары. Водосборная площадь

Братского водохранилища составляет 165 000 км², Усть-Илимского водохранилища – 47 000 км².

База метеорологической информации, необходимой для задания граничных условий в моделях каждого из объектов, включает среднесуточную температуру и дефицит влажности воздуха, суточную сумму осадков, измеренные на 88 метеостанциях. В связи с отсутствием надежных стационарных метеоданных на монгольской части бассейна р.Селенги использован метеорологический реанализ W5E5 на основе реанализа ERA5 с пространственным разрешением 0,5° [1].

Результаты и выводы

Калибровка параметров моделей водосборов Иркутского, Братского и Усть-Илимского водохранилищ проводилась для периода с 1985 по 2014 г. Сток р. Селенги воспроизводится с NSE = 0,85 и BIAS = 2 %, р. Верхней Ангары – с NSE = 0,79 и BIAS = -8 %, р. Баргузин – с NSE = 0,78 и BIAS = 1 %, боковой приток воды в Братское водохранилище – с NSE = 0,67 и BIAS = 5 %, в Усть-Илимское водохранилище – с NSE = 0,72 и BIAS = -1 %.

Согласно данным глобальных климатических моделей в среднем по ансамблю возможен рост температуры воздуха в течение XXI в. в бассейне Иркутского водохранилища на 1,3–4,4 °С при SSP4.5 и на 1,6–8,7 °С при SSP8.5, в бассейне Братского водохранилища на 1,5–3,7 °С при SSP4.5 и на 1,7–7,8 °С при SSP8.5, в бассейне Усть-Илимского водохранилища на 1,6–4,0 °С при SSP4.5 и на 1,5–8,2 °С при SSP8.5.

Согласно данным глобальных климатических моделей в среднем по ансамблю возможна аномалия годовой суммы осадков в течение 21 века в бассейне Иркутского водохранилища 6–16 % при SSP4.5 и 5–34 % при SSP8.5, в бассейне Братского водохранилища 7–16 % при SSP4.5 и 3–27 % при SSP8.5, в бассейне Усть-Илимского водохранилища 5–15 % при SSP4.5 и 6–37 % при SSP8.5.

Согласно данным глобальных климатических моделей в среднем по ансамблю в течение XXI в. возможна аномалия годового стока Селенги от -27 до 2 % при SSP4.5 и от -37 до -11 % при SSP8.5; стока Верхней Ангары от -1 до 6 % при SSP4.5 и 2–21 % при SSP8.5; стока Баргузина от -11 до -2 % при SSP4.5 и от -10 до -4 % при SSP8.5; притока воды в Иркутское водохранилище от -17 до 1 % при SSP4.5 и от -20 до -7 % при SSP8.5; притока воды в Братское водохранилище от -9 до -5 % при SSP4.5 и от -17 до -16 % при SSP8.5; притока воды в Усть-Илимское водохранилище от -3 до 3 % при SSP4.5 и от -3 до 29 % при SSP8.5 (рис. 1–3).

В XXI в. ожидается уменьшение зимнего и летне-осеннего стока Селенги, в то же время увеличение весеннего стока. Наиболее интенсивное увеличение весеннего стока характерно для бассейна Верхней Ангары при положительных аномалиях зимнего стока и отрицательных аномалиях летне-осеннего. В летне-осенний период сток Баргузина, а также на водосборах Братского и Усть-Илимского водохранилищ в течение XXI в. снижается с различной степенью интенсивности в зависимости от комбинации периода и сценария потепления. При

этом по весеннему стоку на этих объектах тенденция положительная. Учитывая низкий зимний сток, его аномалии на водосборах Братского и Усть-Илимского водохранилищ, а также Баргузина в течение XXI в. то положительные, то отрицательные. Стоит отметить, резкий рост зимнего стока к концу XXI в. при реализации экстремального сценария SSP8.5 за исключением Селенги.

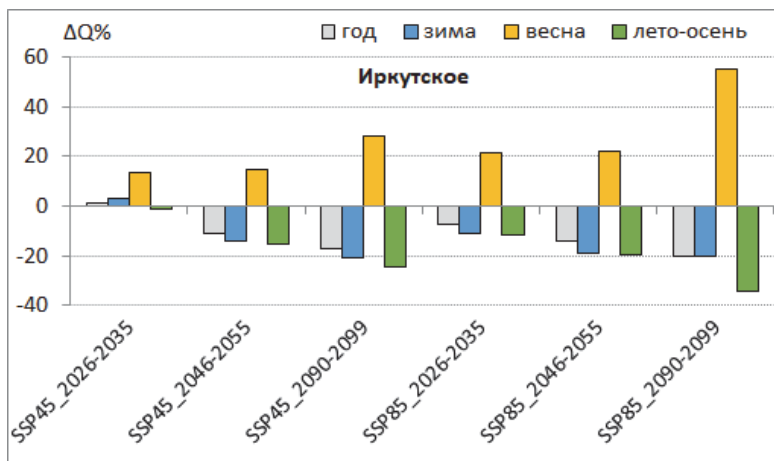


Рис. 1. Аномалии годового и сезонного притока воды в Иркутское водохранилище для различных периодов XXI в. относительно базового периода 1985–2014 гг. по данным глобальных климатических моделей при сценариях SSP4.5 и SSP8.5

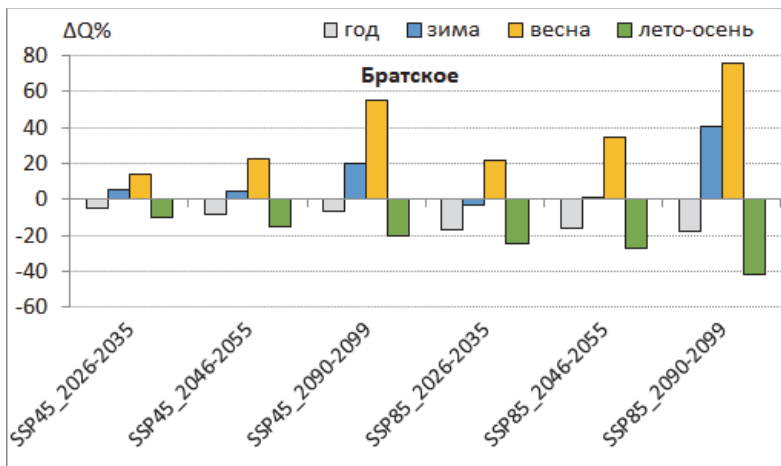


Рис. 2. Аномалии годового и сезонного притока воды в Братское водохранилище для различных периодов XXI в. относительно базового периода 1985–2014 гг. по данным глобальных климатических моделей при сценариях SSP4.5 и SSP8.5

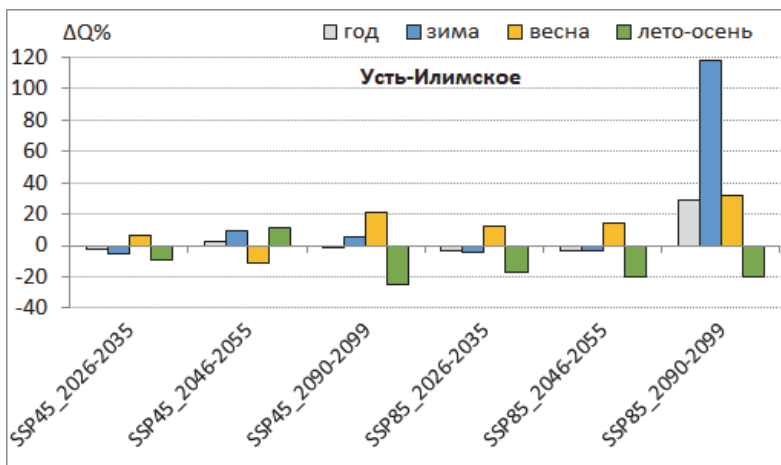


Рис. 3. Аномалии годового и сезонного притока воды в Усть-Илимское водохранилище для различных периодов XXI в. относительно базового периода 1985–2014 гг. по данным глобальных климатических моделей при сценариях SSP4.5 и SSP8.5

Работа выполнена в рамках НИР «Адаптация режимов работы ГЭС ООО Евросибэнерго – гидрогенерация к климатическим изменениям» и темы FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН.

Список литературы

1. Lange S. Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMP3BASD (v1.0) // Geosci. Model Dev. 2019. Vol. 12. P. 3055–3070.
2. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations / Y. Motovilov, L. Gottschalk, K. Engeland, A. Rodhe // Agric. For. Meteorol. 1999. Vol. 98–99. P. 257–277.

УДК 556.535.8:001.891.572

Использование математических моделей для оценки выноса загрязняющего вещества

Г. Г. Козьмин (kozmin02@gmail.com), Н. В. Викторова (nata_vic@mail.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Изучается возможность использования математических моделей при оценке выноса загрязняющего вещества вместе с осадками и речным стоком с территории континента в моря и океаны. Рассматриваются различные модели, позволяющие смоделировать и спрогнозировать вынос биогенного вещества, чрезмерное количество которого способно привести к эвтрофикации водоема, т. е. перенасыщению его вод органическим веществом. Исследование проводится на примере Балтийского моря и Финского залива, пострадавших от уже начавшейся эвтрофикации. Разбирается порядок использования модели, требуемые исходные данные, особенности их формирования, а также трудности возникшие в ходе эксплуатации моделей. Приводятся наглядные графики результатов работы моделей и проводится их сравнение с натурными данными. Дается оценка качества полученных моделей и результатов их применения.

Ключевые слова: математические модели, эвтрофикация, органическое вещество, Балтийское море, наносы.

Эксплуатация водных ресурсов неизбежно оказывает влияние на состояние любого водного объекта. Сохранить уникальные экосистемы водоемов можно только с помощью рационального подхода к использованию их природных ресурсов. Балтийское море, как и любой другой водный объект, тоже подвержено пагубному антропогенному влиянию.

За прошедшие столетия Балтика уже понесла существенный урон от бездумной эксплуатации ее водных ресурсов. Множество морских и прибрежных экосистем оказалось на грани уничтожения [1]. Последствия бездумной эксплуатации в прошлом мы можем наблюдать и сегодня. Одним из таких последствий является эвтрофикация Балтийского моря, т. е. чрезмерное насыщение ее вод органическим веществом. Главная причина эвтрофикации – неконтролируемое поступление различных биогенных наносов вместе с речным стоком [2–4].

Сегодня страны, имеющие выход к Балтийскому морю, создают множество программ и проектов, целью которых является предотвращение дальнейших пагубных изменений в морской среде и минимизация последствий уже случившихся бедствий. Главным таким проектом стала Хельсинкская конвенция, подписанты которой взяли на себя ответственность за состояние экосистем Балтики.

Российская Федерация как страна-член Хельсинкской конвенции обязана регулярно предоставлять отчеты о стоке биогенных наносов с ее территории в Балтийское море. Для этого организуются регулярные гидрологические и гидрохимические наблюдения, но далеко не всегда результаты этого мониторинга охватывают все водосборы рек, впадающих в Балтийское море. В таком случае единственным способом получить необходимую информацию становится математическое моделирование [5].

Целью этой работы стала оценка эффективности расчетов биогенного загрязнения с применением нескольких математических моделей, рекомендованных руководящими органами HELCOM. Такими моделями стали программы HYPE и FyrisNP.

Моделирование стока биогенных наносов должно начинаться с моделирования самого речного стока, ведь объем загрязняющих веществ непосредственно связан с расходом воды. Математические модели, описывающие формирование речного стока, позволяют определить значения расходов воды и их изменение в пространстве и времени на реках, на которых организация регулярного гидрометрического наблюдения, по тем или иным причинам, невозможна. Именно эти задачи решает модель HYPE, разработанная Шведским институтом гидрологии и океанологии.

HYPE – гидрологическая модель с распределенными параметрами, описывающая сток воды и развитие его характеристик. Код модели позволяет моделировать поведение стока и рассчитывать концентрацию разнообразных веществ в воде. Пространственное деление модели позволяет учитывать в ходе работы характерные подбассейны, растительный покров, тип почвы, подземный сток, влияние озер и болот, высоту водосбора над уровнем моря и даже антропогенное воздействие со стороны населения исследуемых территорий. Также модель может учитывать влияние рядов осадков и температуры, распределяя их воздействие с помощью настраиваемого временного шага [6].

Задачу расчета стока биогенных наносов решает программа FyrisNP.

Модель Fyris разработана Хансом Кварнесом в департаменте водных наук при Шведском институте сельскохозяйственных наук для расчета распределения азота и фосфора в бассейне реки Фирис в Швеции. Позже модель получила развитие и нашла свое применение не только для реки Фирис, но и для многих других рек и озер [7].

Гибкая настройка пространственного и временного распределения позволяет достаточно точно смоделировать условия формирования стока биогенных веществ на любом водосборе [8].

Одной из наиболее изученных рек в Северо-Западном регионе является река Селезневка, протекающая по территории двух государств – России и Финляндии. Именно по причине хорошей освещенности этой реки результатами гидрологического и гидрохимического мониторинга она была выбрана для тестирования модели.

Практические расчеты проводились с применением программы FyrisNP и программного обеспечения ArcGis.

Алгоритм работы заключался в следующем:

– В программе ArcMap была проведена разбивка водосбора реки на подбассейны. Для каждого из них была определена доля площади лесов, болот, озер, жилой и промышленной застройки.

– В файл параметризации модели были внесены исходные данные, а именно характеристики подбассейнов, определенные с помощью ArcMap, концентрации органических веществ в воде, основные крупные и малые источники загрязнения, температура воды, типичные концентрации органических веществ, стекающих с различных типов земель.

- Калибровка модели, т. е. подбор критериев, связывающих описанные в исходных данных условия с фактическими измеренными результатами.
- Расчет среднегодовой биогенной нагрузки и моделирование поступления органических веществ в водоток.

Результаты тестирования представлены на рис. 1.

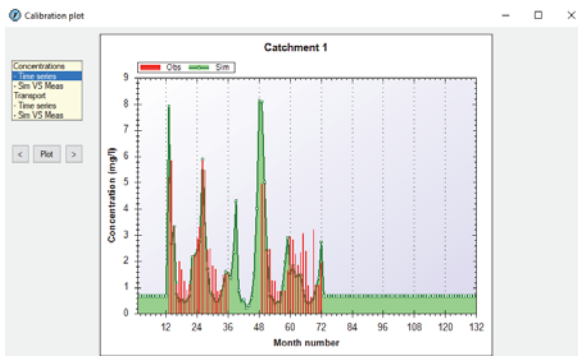


Рис. 1. График-сравнение смоделированных концентраций азота и измеренных

Как видно из представленного рисунка, смоделированные показатели отличаются от измеренных значений, но имеют общие тенденции к изменению. Это позволяет сделать вывод о неполноте данных об источниках загрязнения, попадающего в Селезневку.

Общие тенденции позволяют допустить применение этой модели на малоисследованных реках, где главенствующими источниками биогенов являются природные факторы, а не антропогенные.

В связи с этим были проведены расчеты на малых реках Ленинградской области. В частности, на реках Гороховка и Черная.

Результаты моделирования представлены на рис. 2–8, 10.

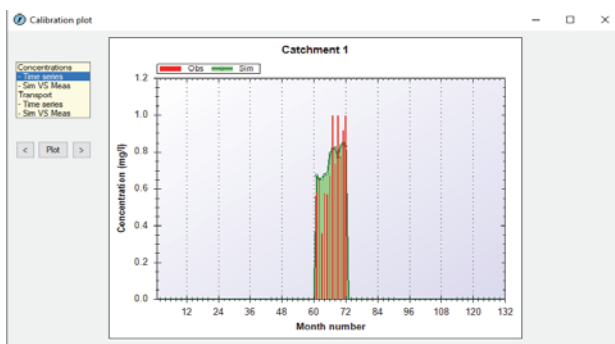


Рис. 2. График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактически измеренных в окне программы на р. Гороховка



Рис. 3. График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактически измеренных на р. Гороховка

Как видно из рис. 2 и 3, результаты применения модели, в целом, продемонстрировали близость к натурным данным, хотя иногда и достаточно отличаются от них. В общем и целом тенденция к изменению модель смогла установить и правильно спрогнозировала возрастание и падение значений концентрации.

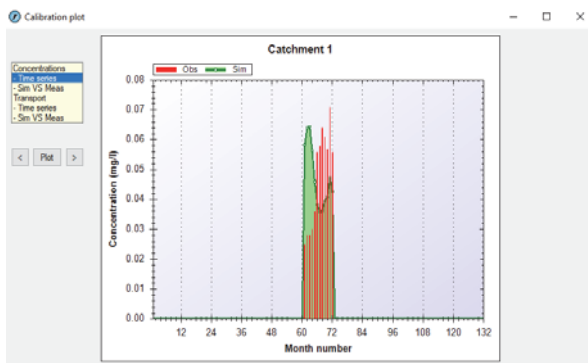


Рис. 4. График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактически измеренных в окне программы на р. Гороховка



Рис. 5. График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактически измеренных на р. Гороховка

Результаты моделирования концентраций фосфора на р. Гороховка, представленные на рис. 4 и 5, значительно отличаются от данных мониторинга. Заметно резкое отклонение и там, где мониторинг зафиксировал снижение концентрации фосфора, модель смоделировала ее повышение. Это может быть обусловлено недостаточной точностью исходных данных и недоучетом каких-либо крупных источников фосфора.

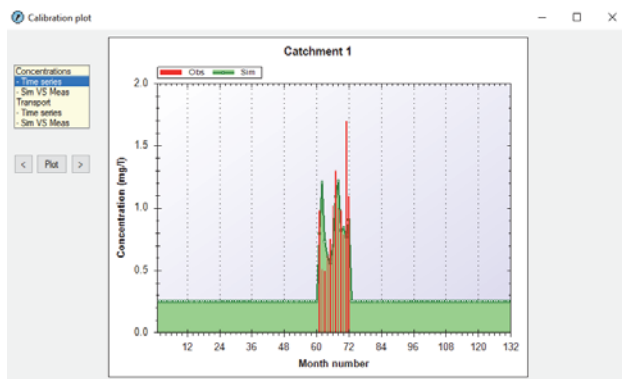


Рис. 6. График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактически измеренных на р. Черная



Рис. 7. График-сравнение смоделированных концентраций азота и фактически измеренных на р. Черная

Рис. 6 и 7 вновь демонстрируют достаточную точность результатов моделирования концентраций азота в речной воде. Общие тенденции изменения установлены правильно, смоделированные значения близки к фактическим.

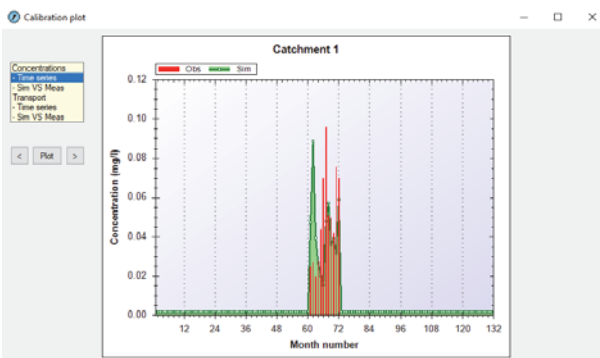


Рис. 8. График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактически измеренных в окне программы

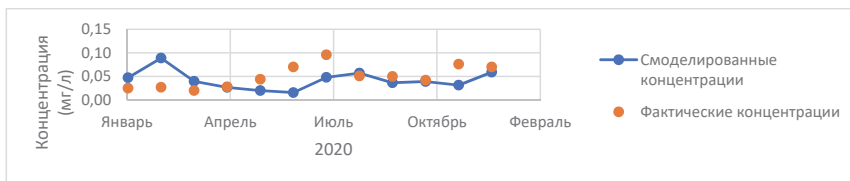


Рис. 9. График-сравнение смоделированных концентраций фосфора и фактически измеренных в окне программы

Результаты моделирования концентраций фосфора, как и в предыдущем случае продемонстрировали недостаточно точные результаты, хотя общность тенденций улавливается и тут.

Полученные результаты применения модели FyrisNP на малых реках Ленинградской области продемонстрировали лучшие результаты, близкие к измеренным параметрам. Отличия объясняются дополнительной антропогенной нагрузкой, не учтенной при проработке моделей.

Однако полученные результаты демонстрируют общность тенденций к изменению с результатами непосредственных наблюдений, что допускает применение этих моделей при формировании ежегодных отчетов ХЕЛКОМ при условии наличия более точной информации о сторонних источниках биогенного загрязнения.

Список литературы

1. РИА Новости. Экологические проблемы Балтийского моря. URL: <https://ria.ru/eco/20100210/208437078.html> (дата обращения: 23.10.2023).
2. Фосфорная нагрузка на Финский залив с прибрежной территории России / С. А. Кондратьев, М. В. Шамакова, Н. В. Викторова, В. И. Уличев // Вестник РАН. 2014. Т. 84, № 10. С. 913–919.
3. Биогенная нагрузка с российской территории на Финский залив / С. А. Кондратьев, А. А. Ершова, М. Экхольм, Н. В. Викторова // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 2. С. 77–87.
4. О воде. Экологические проблемы Балтийского моря. URL: <http://www.o8ode.ru/article/planetwaeze/balticsea.htm> (дата обращения: 23.10.2023).
5. Проект ХЕЛКОМ. URL: <http://www.helcom.ru/about> (дата обращения: 23.10.2023).
6. HYPE model description. URL: http://www.smhi.net/hype/wiki/doku.php?id=start:hype_model_description (date of access: 15.10.2023).
7. The FYRIS model Version 2.0. A user's manual. URL: https://pub.epsilon.slu.se/12404/7/hansson_k_et al_150615.pdf (date of access: 12.10.2023).
8. Hansson K., Wallin M. & Lindgren G. The Fyris model Version 2.0. Technical description // Swedish University of Agricultural Sciences, Dept. of Environmental Assessment. 2006. Vol. 17.

УДК 556.5(282.256.341)

Гидрологические прогнозы вскрытия озера Байкал

Е. А. Литвинцева (yelena.litvintseva@internet.ru), О. А. Бархатова (barhat2006@mail.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Своевременное предсказание сроков начала и окончания ледовых явлений необходимо для эффективного использования водных ресурсов в различных отраслях народного хозяйства. Для оз. Байкал необходимо знать сроки вскрытия ледового покрова, так как для многих поселков, находящихся на берегу в зимний период осуществляется основной завоз всех промышленных и продуктовых товаров. Даты вскрытия необходимы и для судоходства, где данные сроки играют очень важную роль для определения оптимального периода навигации. Основной целью исследования было ознакомиться с существующей методикой прогноза дат вскрытия оз. Байкал, разработанной в Иркутском УГМС и модернизировать её, дополнив современными данными с использованием современных технологий обработки информации. В исследовании в разработку методики были включены года с 1938 по 2010 г. На независимых данных, не вошедших в разработку методики (2011–2022 гг.) поведена оценка эффективности и оправданности разработанной методики, которая показала высокий процент обеспеченности метода и оправданности.

Ключевые слова: гидрологические прогнозы, вскрытие озер, Байкал, методика прогнозирования, эффективность метода

Введение

Под гидрологическими прогнозами понимается научно обоснованное предсказание гидрологических явлений, которые возникают и сменяют друг друга на реках, озерах и водохранилищах в процессе сезонных и других изменений погоды [1].

Своевременное предсказание сроков начала и окончания ледовых явлений необходимо для эффективного использования водных ресурсов в различных отраслях народного хозяйства.

Для оз. Байкал необходимо знать сроки вскрытия ледового покрова, так как для многих поселков, находящихся на берегу в зимний период осуществляется основной завоз всех промышленных и продуктовых товаров. Даты вскрытия необходимы и для судоходства, где данные сроки играют очень важную роль для определения оптимального периода навигации.

На озере прежде чем происходит вскрытие и начинается ветровой дрейф льда, ледяной покров длительное время подвергается таянию на месте под воздействием увеличивающегося весеннего притока тепла от воздуха и солнечной радиации.

По мере таяния снега на ледяном покрове все большее количество солнечной радиации проникает через лед в воду. Это тепло вместе с теплом подземных вод с большей или меньшей интенсивностью поступает к ледяному покрову. Различия в толщине льда и высоты снега на нем в разных частях озера, разная скорость течения воды вызывают неравномерное таяние ледяного покрова как с верхней, так и с нижней поверхности.

Вскрытие Байкала растягивается на довольно продолжительный период времени. Первым этапом перехода от зимнего состояния льда к весеннему считается прекращение его намерзания, что происходит при низких температурах. Прежде всего, это касается прозрачного бесснежного льда, под поверхностью которого происходит повышение температуры воды в результате парникового эффекта и низкого альбеда льда (10–20 %). Прекращение нарастания льда в некоторых районах может происходить так же из-за переноса течениями более теплых глубинных вод. Так, в проливе Ольхонские ворота толщина льда перестает увеличиваться в 20-х числах февраля при температуре воздуха ниже минус 20 °С. В южном и среднем Байкале нарастание льда прекращается лишь в конце марта, а в районе Посольска и Турки, где преобладает заснеженный лед с высокой отражательной способностью, этот процесс затягивается до начала апреля [2].

Таяние льда обычно начинается с сокуев, затем разрушается верхняя часть торосов и льды, оказавшиеся на берегу вследствие зимнего понижения уровня и перемещения уреза воды в сторону озера. Под влиянием тепла прозрачный и бесснежный лед расчленяется на шестики, не связанные между собой. Процесс разрушения мутного белесоватого льда, покрытого снегом, начинается позднее и протекает медленнее.

Расчленение ледяного покрова на отдельные кристаллы начинается в Малом море и на юго-западном побережье между Листвянкой и бухтой Песчаной (12–16 апреля), а на противоположном берегу на две недели позже. К северу этот процесс затягивается до 16–19 мая. Разыгливание льда прерывается похолоданиями, тогда лед смерзается и становится снова прочным.

Окончательное вскрытие и разрушение ледяного покрова начинается на юго-западном побережье в районе мысов Большой и Малый. Кадильный. Здесь образуются еще в конце марта – начале апреля многочисленные закраины, которые, соединяясь, формируют большую полынью. В конце апреля взламывается ледяной покров вдоль западного побережья, отсюда вскрытие распространяется к югу, северу и противоположному берегу. В настоящее время замерзание Байкала наступает все позже, а вскрытие раньше [2].

Целью работы было разработать методику прогноза вскрытия ледового покрова оз. Байкал.

В качестве исходных данных были взяты следующие материалы по четырем пунктам наблюдения (Байкал, Нижнеангарск, Танхой, Хужир) за период с 1938 по 2022 гг.:

- дата вскрытия;
- среднемесячная температура в январе, феврале, марте, апреле;
- устойчивый переход температуры воздуха через 0 °С
- окончательный переход температуры воздуха через 0 °С

Разработка методики вскрытия оз. Байкал

В связи с большей сложностью процессов вскрытия озер и водохранилищ основы методики прогнозов этого явления разработаны еще недостаточно. Мно-

гие важные стороны этого процесса не могут быть практически учтены из-за недостатка исходных данных. В силу этих причин применяемые в настоящее время приемы прогнозов вскрытия озер носят приближенный характер.

Из рассмотрения основных факторов вскрытия озер следует, что его сроки в каждом году зависят главным образом от времени перехода температуры воздуха через 0°C . Именно срок этого перехода определяет в конечном счете, будет ли вскрытие ранним или поздним. Важную роль при этом играет интенсивность самого потепления. Что касается таких факторов, как толщина ледяного покрова и запас воды в снеге, то их влияние на изменение сроков вскрытия может сказываться в пределах нескольких дней. В этом легко убедиться, проанализировав связь сроков перехода температуры воздуха через 0°C со сроками вскрытия озера с учетом интенсивности потепления и других факторов.

Расчет стаивания льда методом теплового баланса в принципе не отличается от снеготаяния. Разница заключается лишь в значении некоторых параметров. Так, альbedo льда меньше, чем альbedo снега. Однако недостаток исходных данных для прямого расчета притока тепла с учетом всех составляющих теплообмена вынуждает пользоваться косвенными его характеристиками или прибегать к упрощенным, более грубым приемам расчета.

В качестве простейшей косвенной характеристики притока тепла принимается сумма градусо-дней положительной температуры воздуха. Для определения этой характеристики берутся как среднесуточные, так и среднедневные или срочные значения температуры.

Довольно широкое распространение в практике прогнозов вскрытия озер получил упрощенный способ оценки притока тепла, основанный на использовании формул, применяемых при расчете снеготаяния. Упрощение состоит в том, что расчет ведется только для дневной части суток. При этом облачность, скорость ветра берутся постоянными, равными средним многолетним значениям, абсолютная влажность воздуха определяется в зависимости от его температуры, а альbedo снега принимается равным 0,5. Разумеется, что все эти упрощения снижают точность оценки притока тепла и делают ее в известной мере условной.

В качестве косвенной характеристики толщины льда используется обычно сумма градусо-дней отрицательной температуры воздуха [3]

Ранее в Иркутском УГМС была разработана в 1948 г. методика, которая представлена в рукописном варианте и по которой прогноз осуществляется по настоящее время [4].

При составлении методики вскрытия оз. Байкал учитывалось, что вскрытие зависит главным образом от теплообмена между водой и атмосферой. Чем больше сумма отрицательных температур воздуха, тем толще лед, тем теплоотдача потоку через лед меньше, следовательно, вскрытие наступит позднее и наоборот, чем тоньше лед, тем больше теплоотдача, тем раньше вскрытие.

Исходя из этого в зависимостях для прогноза дат вскрытия оз. Байкал учтены суммы среднемесячных температур воздуха за период с января по март и с января по апрель. Количество тепла, необходимого для вскрытия оз. Байкал, характеризуется суммой положительных температур воздуха за период с момента перехода через 0°C до вскрытия.

Для более полной характеристики прихода тепла дополнительно учитывается дата перехода температуры воздуха через 0°C , а также интенсивность потепления.

Синоптические процессы марта и апреля характеризуются интенсивным разрушением сибирского антициклона. При разрушении сибирского антициклона наблюдается, как правило, резкое и устойчивое повышение температуры воздуха, с чем связаны сроки вскрытия оз. Байкал. В зависимости от характеристики начала разрушения антициклона принят окончательный переход максимальной температуры воздуха через нуль в сторону положительных значений.

Плавающий лед под действием ветра и волнения разбивается на мелкобитый лед, который задерживается в выше указанных местах на 10–12 дней позже, чем в южной части Байкала [5].

Поверочные прогнозы и оценка эффективности разработанной методики

Проанализировав исходные данные и действующую в УГМС методику прогноза [4], было предложено построить прогнозные зависимости четырех видов.

Первая использует года, где дата вскрытия фиксировалась в апреле. В данной зависимости учитывалась сумма среднемесячных температур воздуха с января по апрель. Для построения данной зависимости были использованы года: 1940–1948, 1952, 1959, 1961–1967.

Во второй зависимости использовались года, где дата вскрытия фиксировалась в мае. В данной зависимости учитывалась сумма среднемесячных температур воздуха с января по май. Для построения данной зависимости были использованы года: 1938–1946, 1950–1958, 1963–1967, 1971–1978, 2000–2003.

Для уточнения прогноза в данной методике было рекомендовано построить прогнозные зависимости предсказания даты вскрытия озера от даты окончательного и устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C .

Окончательный переход температуры воздуха через 0°C это период времени, когда температура воздуха полностью перешла через отметку 0°C и больше ее не достигает.

За дату устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C весной принимается первый день периода, сумма положительных отклонений которого превышает сумму отрицательных отклонений любого из последующих периодов с отрицательными отклонениями.

В третьей прогнозной зависимости учитывались даты вскрытия оз. Байкал и даты окончательного перехода температуры воздуха через 0°C . Для построения данной зависимости использовались года с 1938–2010.

В четвертой прогнозной зависимости учитывались даты вскрытия и даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C . Для построения данной прогнозной зависимости был использован период 1938–2010 гг.

Для оценки применимости и эффективности разработанной методики необходимо было апробировать её на годах, не вошедших в разработку прогнозных зависимостей. Данный период составляет с 2011 по 2022 г.

На первом этапе оценивается соответствие ошибки единичного прогноза к допустимой, которая по «Наставлению гидрологических прогнозов» для весеннего периода составляет 6 суток.

Далее рассчитывалась обеспеченность метода, представляющая собой отношение количества оправдавшихся прогнозов к общему их числу. Методика считается эффективной и применимой, если обеспеченность метода составляет 80 и более процентов.

Полученные результаты по оценки разработанной методики представлены в табл.

Таблица

Обеспеченность метода (%), полученная для разных подходов
в построении прогнозной зависимости

Прогнозные зависимости даты вскрытия от	Пункты наблюдений			
	Байкал	Танхой	Хужир	Нижнеангарск
Суммы среднемесячных температур с января по апрель	83,3	83,3	91,6	83,3
Суммы среднемесячных температур с января по май	91,6	81,3	84,4	91,6
Устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С	83,3	91,6	91,6	91,6
Окончательного перехода температуры воздуха через 0 °С	83,3	91,6	83,3	100

Заключение

В заключение можно сказать, что подход в разработке методики прогноза вскрытия ледового покрова оз. Байкал, использованный в Иркутском УГМС наиболее перспективен. Недостаток этой методики состоит в том, что она представлена в рукописном виде и не охватывает более поздние данные, которые необходимо учитывать в эпоху изменяющегося климата.

Дополнив методику современными исходными данными, используя современные технологии в построении прогнозных зависимостей и апробировав её на независимом материале можно рекомендовать для оперативного использования в прогнозе дат вскрытия ледяного покрова оз. Байкал.

Список литературы

1. *Космаков И. В., Шимараев М. Н.* Термический и ледовый режим в верхних и нижних бьефах высоконапорных // Элементы теплового режима оз. Байкал. Новосибирск : Наука, 1977. 165 с.
2. *Галазий Г. И., Мещерякова А. И.* Климат озера Байкал. Новосибирск : Наука, 1992.
3. *Гинзбург Б. М.* Методика расчетов и прогнозов разрушения льда на водохранилищах рек // Труды ЦИП, 1960. Вып. 100. С. 3–64.
4. *Багров Н. А.* Вероятностные характеристики сроков замерзания и вскрытия рек и водохранилищ Советского Союза. Л. : Гидрометеиздат, 1973. 116 с.
5. Методика вскрытия озера Байкал. Иркутск : Иркутское УГМС, 1948. 23 с.

УДК 556.16.06:001.891.572(678)

Параметризация динамической модели при прогнозе стока на реках Танзании

Рафаэль Мучунгузи Лукас (lucasraphael233@gmail.com, raphael.lucas@meteo.go.tz)^{1,2}

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

²Tanzania Meteorological Authority (TMA), Dar es Salaam

Аннотация. Исследование направлено на оценку применимости динамических моделей для краткосрочных прогнозов расходов воды на реках Танзании. Целью исследования было проведение параметризации модели для условий формирования стока на территории Танзании. Объектом исследования являлся сток р. Руву. В качестве исходной модели рассматривалась модель склонового стока первого и второго порядков, которая ранее не применялась для прогноза стока на данной территории. Для параметризации модели использованы различные подходы. Оценка результатов прогнозов оценивалась и использованием российских и зарубежных критериев. По результатам работы показано, что наилучшие результаты достигаются при использовании динамической процедуры параметризации. Представлены предложения по дальнейшему усовершенствованию методик прогнозирования.

Ключевые слова: динамическая модель склонового стока, параметры модели, коэффициент стока, время добегания, речной бассейн.

Введение

Исследования показывают, что изменение в землепользовании и почвенном покрове на водосборе реки непосредственно влияет на сток и функциональность прогностической модели, и должно учитываться ее параметрами [1]. В гидрологическом прогнозировании при использовании математической модели склонового стока основными параметрами являются коэффициент стока и время добегания или время релаксации бассейна [2]. Изменение характера землепользования, преобразование ландшафтов, влияют на условия стекания стока, что необходимо учитывать в прогностических моделях, путем введения изменчивости ее параметров. Параметризация имеет важное значение также в связи с тем, что каждый речной бассейн имеет свои индивидуальные особенности [3]. Данное исследование направлено на выбор наиболее оптимального метода параметризации модели и периода параметризации. Исследование проводится на примере бассейне р. Руву в Танзании и было выбрано в связи со значительными изменениями в землепользовании и лесном покрове бассейна.

Методология и данные

Область исследования. Бассейн р. Руву расположен между широтами 6°05' и 7°45' южной широты и долготами 37°15' и 39°00' восточной долготы на юго-востоке Танзании. Река Руву берет начало с горы Улугуру в регионе Морогоро. Площадь водосборного бассейна составляет 11 789 км², длина 316 км, а средний многолетний расход составляет 65 м³/с. Климат в бассейне тропический с многолетней среднегодовой температурой 27 °С и многолетним годовым диапазоном температур 3 °С. Количество осадков в бассейне зависит от перемещения

зоны межтропической конвергенции, что приводит к тому, что бассейн находится в бимодальном режиме выпадения осадков с февраля по май и с сентября по декабрь. Карта бассейна представлена на рисунке (рис. 1).

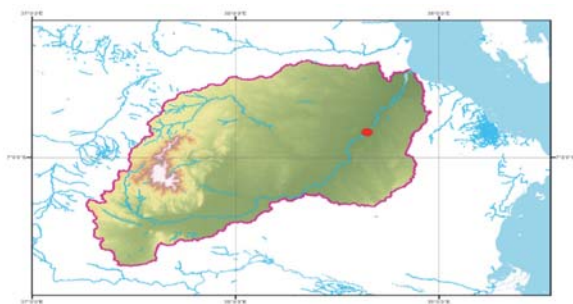


Рис. 1. Водосбор р. Руву

В работе использовались как метеорологические (температура и количество осадков), так и гидрологические данные (уровень воды и сток). Для получения метеорологических данных использовались данные станции Морогоро, в то время как гидрологические данные были использованы со станции Главного моста Руву. В исследовании использовались ежедневные гидрологические и метеорологические данные за период с 2011 по 2015 г.

Методология. Для краткосрочных прогнозов воды использовалась динамическая модель склонового стока. Схема уравнения представлена на рисунке (2). Входными параметрами являются атмосферные осадки, а параметрами – коэффициент стока и время добегания.

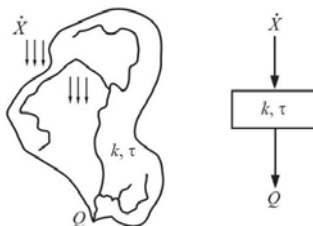


Рис. 2. Схема разработки модели склонового стока

Модель первого порядка записывается в виде уравнения

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

где Q – расход (модуль, слой) стока; \dot{X} – интенсивность осадков; k – коэффициент стока; τ – время релаксации (добегания).

Динамическая модель второго порядка выведена из рассмотрения бассейна как двух ёмкостной модели, включающей поверхностную и подземную ёмкость. Схема разработки модели представлена на рисунке (рис. 3).

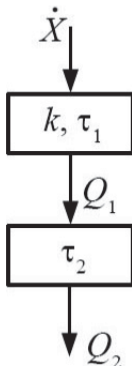


Рис. 3. Схема разработки модели второго порядка

Уравнение второго порядка выглядит следующим образом

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

Представленные модели в виде обыкновенных дифференциальных уравнений могут быть решены при помощи численных (конечно-разностных) методов. Решение модели первого порядка (1) можно представить в виде

$$Q_{i+1} = Q_i + \left(-\frac{1}{\tau} Q_i + \frac{k\dot{X}_i}{\tau} \right) \Delta t. \quad (3)$$

Конечно-разностная аппроксимация модели второго порядка имеет вид

$$\tau_2 \tau_2 \frac{d^2 Q}{dt^2} + (\tau_1 + \tau_2) \frac{dQ}{dt} + Q = k\dot{X}. \quad (4)$$

Параметризация параметров

Процесс параметризации осуществлялся с помощью двух различных методов параметризации. Успешность параметризации оценивалась путем сравнения фактических и спрогнозированных расходов воды с использованием различных критериев: критерия Гидрометцентра (S/σ_Δ), критерия Нэша – Сатклиффа (NSE) [4] и критерий эффективности Клинг-Гупты (КГЕ) [5]. Ниже приведены формулы для определения составляющих критерия Гидрометцентра:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{N - 1}}. \quad (5)$$

$$\sigma_\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{N - 1}}, \quad (6)$$

Если количество выпущенных прогнозов превышает 25, то методика считается хорошей, если значение равно $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,50$; удовлетворительной, если $0,50 \leq S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$, и неудовлетворительной, если $S/\sigma_{\Delta} > 0,80$.

Критерии Нэша-Сатклифа и Клинга-Гупты определяются по формулам:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}, \quad (7)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2}, \quad (8)$$

где r – коэффициент линейной корреляции между наблюдаемыми фактическими и смоделированными значениями; α – мера ошибки изменчивости стока; β – смещение; σ_{obs} – стандартное отклонение в рядах наблюдений; σ_{sim} – стандартное отклонение в смоделированных рядах; μ_{obs} – среднее значение наблюдаённой характеристики; μ_{sim} – среднее значение смоделированной характеристики.

Как и критерий NSE, значение $KGE = 1$ указывает на идеальное соответствие между смоделированными и наблюдаемыми значениями. Аналогично $NSE = 0$, некоторые авторы утверждают, что значение $KGE < 0$ указывает на то, что среднее наблюдаемое значение дает лучшие оценки, чем результаты моделирования [6].

Статистическая параметризация. Это тип параметризации, при котором параметры получают за фиксированный период времени и используются для прогнозирования на другой период времени. В этот период считается, что большинство физических и химических процессов в бассейне остаются постоянными, поэтому любые изменения в бассейне во время прогнозирования не учитываются.

В работе статистическая параметризация проводилась в период с 2011 по 2014 г., и полученные значения параметров использовались при проведении тестового прогноза на 2015 г. по моделям первого и второго порядка.

Полученные результаты показали, что при таком методе параметризации надежные прогнозы можно выпускать с заблаговременностью не более 3 дней.

Динамическая параметризация. Динамическая» параметризация – это процесс, посредством которого параметры модели прогнозирования вычисляются периодически за некоторый предшествующий дате выпуска прогноза период. При смещении даты выпуска прогноза происходит смещение и периода параметризации.

В гидрологии водный режим в водных объектах действительно меняется со временем по разным причинам. Одной из них является изменение погоды в конкретном водосборе, поэтому для расчета параметров модели нам необходимо учитывать все физико-географические условия и время каждого изменения, поэтому при этом эти изменения могут быть рассчитаны в динамическом режиме. Важным моментом является назначение продолжительности периода динамической параметризации. Это может быть предшествующий период в 10 или

30 дней. В ходе выполнения исследования была проведена работа по выбору оптимального времени параметризации. При этом учитывалось и изменение заблаговременности.

На рисунке (рис. 4) приведен фактический и прогнозный гидрограф. График показывает хорошую сходимость между прогнозируемыми и наблюдаемыми данными.

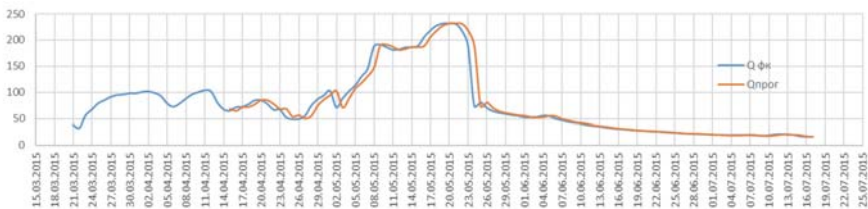


Рис. 4. Представление результата прогноза, полученного путем статистической параметризации параметров модели

Оценка качества прогнозов и эффективности методики проводилась по нескольким критериям: по критерию $S/\sigma\Delta$, принятому в России; по критерию Нэша-Сатклифа NSE, рекомендуемого ВМО, и критерию KGE. Анализ результатов показывает, что согласно критерию $S/\sigma\Delta$ наилучшие результаты получены при периоде параметризации в 30 суток. Но с увеличением заблаговременности более суток методика становится не эффективной. Аналогичные результаты получены и при оценке обеспеченности методики методом ГГИ. Критерии NSE и KGE показывают более высокую эффективность, что связано с особенностями этих критериев. Для более полного анализа и визуализации результаты оценки были нанесены на графики, отражающие зависимость используемых критериев заблаговременности и периода параметризации (рис. 5).

Анализ результатов показывает, что согласно критерию $S/\sigma\Delta$ наилучшие результаты получены при периоде параметризации в 30 суток. Но с увеличением заблаговременности более суток методика становится не эффективной. Аналогичные результаты получены и при оценке обеспеченности методики методом ГГИ. Критерии NSE и KGE показывают более высокую эффективность, что связано с особенностями этих критериев.

Выводы

В ходе выполнения работы была проведена процедура параметризации модели склонового стока первого и второго порядка на основе ретроспективных данных по р. Руву и выбран наиболее оптимальный метод; выполнены поверочные прогнозы по р. Руву и выполнена оценка эффективности используемых методик; выполнен сравнительный анализ моделей с целью выдачи рекомендации по методике выпуска оперативных краткосрочных прогнозов расходов воды на реках Руву.

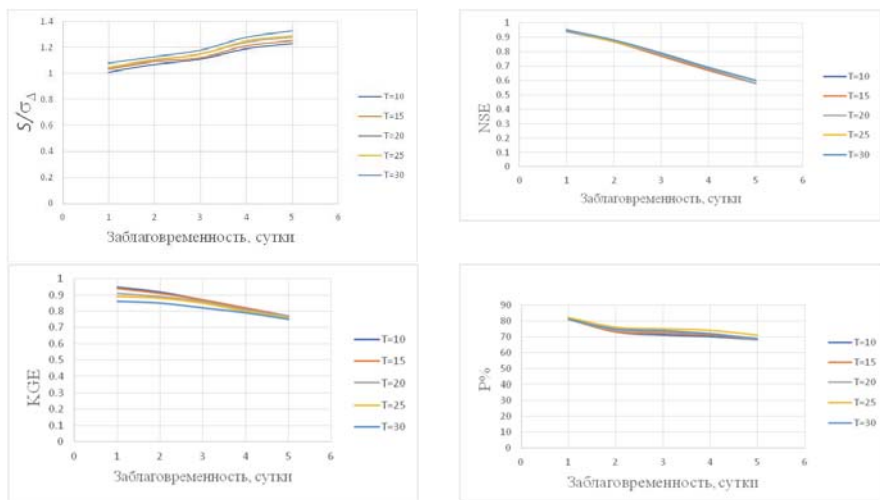


Рис. 4. Связь S/σ_{Δ} , NSE, KGE и P % заблаговременности прогнозов (2015 г.)

По результатам работы были сделаны следующие выводы:

- для бассейна р. Рува статистическая параметризация может быть использована при прогнозировании с заблаговременность до 3 дней;
- при динамической параметризации успешные прогнозы можно выпускать с заблаговременностью от 1 до 6 дней при используемом периоде параметризации от 20 до 30 дней;

Список литературы

1. Hydrological model parameterization using NDVI values to account for the effects of land cover change on the rainfall–runoff response / V. Nourani, A. Fakheri Fard, H. V. Gupta [et al.] // *Hydrology Research*. 2017. Vol. 48 (6). P. 1455–1473. URL: <https://iwaponline.com/hr/article/48/6/1455/37810/Hydrological-model-parameterization-using-NDVI> (date of access: 17.09.2023)/
2. Comparison of two criteria for evaluating the efficiency of short-term runoff forecasting methods / E. F. S. Espitia, N. V. Victorova, V. A. Khaustov, E. V. Gaidukova // *Engineering Studies*. 2018. Vol. 10, N 3–2. P. 626–633.
3. Robert J. H., Brian P. B. How do flow peaks and durations change in suburbanizing semi-arid watersheds? A southern California case study // *Journal of Hydrology*. 2011. Vol. 405. Iss. 1–2. Art. 69–8. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411003210?via%3Dihub> (date of access: 03.10.2023)
4. Nash J. E. The form of the instantaneous unit hydrograph // *Hydrological Sciences Bulletin*, 1957. P. 114–121.
5. Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores / Wouter J. M [et al.]. URL: <https://hess.copernicus.org/preprints/hess-2019-327/hess-2019-327> (date of access: 15.04.2022).
6. Impacts of Regional Climate Models Spatial Resolution on Summer Flood Simulation, in HIC 2018 : 13th International Conference on Hydroinformatics / M. Castaneda-Gonzalez, A. Poulin, R. Romero-Lopez [et al.]. 2018. Vol. 3. P. 372–362.

УДК 556.113.048

К вопросу о расчете испарения с водоемов суши

А. Н. Постников

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Аннотация. В ранее опубликованной работе автора была предложена эмпирическая формула для расчета среднего многолетнего испарения с равнинных водоемов суши в целом за безледоставный период. Формула основана на связи названного испарения с температурной характеристикой теплого периода года с коэффициентом корреляции, приближающемся к единице. В данной работе предпринята попытка установить возможность применения упомянутой формулы для расчета испарения с равнинных водоемов в целом за безледоставные периоды конкретных лет. Проведены расчеты испарения для ряда озер и водохранилищ, для каждого из них за семилетний период. Произведено сравнение результатов расчета с результатами расчета испарения по формуле ГГИ, рекомендованной к применению для определения испарения с водной поверхности. Сравнение показало достаточно близкую сходимости результатов расчета по обеим формулам, на основании чего в работе сделан вывод о возможности применения данной формулы для приближенных оценок испарения за безледоставные периоды конкретных лет.

Ключевые слова: испарение с водоемов; безледоставный период; эмпирические формулы.

К настоящему времени известно несколько методов расчета испарения с поверхности водоемов суши. Это методы теплового баланса, турбулентной диффузии, водного баланса и метод, основанный на использовании эмпирических (полуэмпирических) формул. Первые три метода требуют большого количества информации о различных гидрометеорологических величинах и, ввиду недостатка таковой, редко применяются. Поэтому на практике для оценок испарения с озер и водохранилищ чаще всего используются эмпирические формулы. Количество их довольно велико. Так, в «Гидрологическом словаре» [6], изданном еще в 1974 г., уже находим двенадцать подобных формул различных авторов. Большинство из них базируется на законе Дальтона, согласно которому испарение пропорционально величине $(e_n - e_2)$:

$$E = \alpha(e_n - e_2), \quad (1)$$

где E – испарение; e_n – парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре поверхности воды; e_2 – парциальное давление водяного пара в воздухе на уровне 2 м от поверхности воды; α – коэффициент пропорциональности, или точнее, коэффициент обмена. Эти формулы различаются способом представления коэффициента α . Наиболее признанной и рекомендованной к применению [5] является формула, полученная в Государственном гидрологическом институте (ГГИ)

$$E_{\text{ГГИ}} = 0,14n1 + 0,72u_2(e_n - e_2), \quad (2)$$

где n – число суток в расчетном периоде; u_2 – скорость ветра (м/с) на высоте 2 м над водной поверхностью; величины u_2 , e_n , e_2 здесь осреднены за расчетный период.

В работе автора [3] для приближенных оценок среднего многолетнего испарения с водоемов суши, расположенных на равнинных территориях, в целом за безледоставный период (БП) была предложена эмпирическая формула

$$E = 83t_n, \quad (3)$$

где E – среднее многолетнее испарение с водоема за БП; $t_n = \frac{\sum t_i}{12}$; $\sum t_i$ – сумма средних многолетних значений температуры воздуха за месяцы теплого периода года в пункте применения формулы (3). К теплomu периоду здесь относятся месяцы с нормой температуры выше или равной 0 °С. Таким образом, величина t_n представляет среднюю многолетнюю сумму месячных температур воздуха за теплый период года. Деление на 12 этой суммы производится для того, чтобы в случае, когда средние многолетние температуры за все месяцы года окажутся положительными, величина t_n превращалась бы в среднегодовую температуру воздуха. Формула (3) была получена в результате сопоставления среднеемноголетних значений испарения с водоемов, приведенных в [1; 2; 4], со значениями t_n , полученным по данным наблюдений за температурой воздуха на прибрежных станциях (рис. 1).

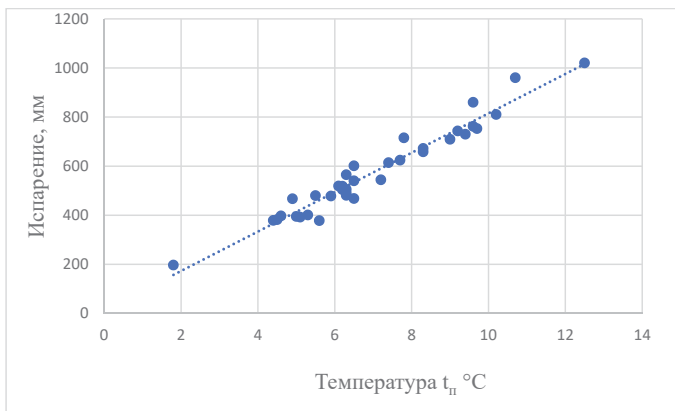


Рис. 1. Связь испарения с водоемов за безледоставный период с температурной характеристикой теплого периода года

В число таких водоемов входили водохранилища, расположенные на Волге, Днепре, Доне, Днестре, и на ряде сибирских рек, двенадцать озер, включая такие крупные, как Ладожское, Онежское, Байкал, Ханка, а также моря Каспийское и Аральское. Коэффициент корреляции между E и t_n оказался равным 0,975. Формула (3) привлекательна тем, что проста в использовании и для ее применения требуется только информация о температуре воздуха, за которой ведутся наблюдения на каждой метеостанции.

В настоящей работе предпринята попытка выяснить, возможно ли применение формулы (3) не только для определения среднего многолетнего испарения за БП, но и для определения испарения за БП конкретного года. При этом данные

результатов расчета испарения по формуле ГГИ принимались за эталон. В табл. 1 приводится список водных объектов и станций, по данным наблюдений которых производился расчет испарения с водной поверхности.

Таблица 1

Список водных объектов и станций

Озеро, станция	Водохранилище, станция
Псковское –г. Псков	Угличское –г. Углич
Ильмень –г. Новгород	Рыбинское –г. Рыбинск
Валдайское –г. Валдай	Волгоградское–г. Волгоград
Белое –г. Белозерск	Камское –г. Пермь
Лача –г. Каргополь	Цимлянское– г. Цимлянск
Галичское–г. Галич	Киевское – г. Киев
Ханка –пос. Турий Пог	Кременчугское–г. Черкассы
	Каховское– г. Каховка
	Красноярское–г. Красноярск
	Братское–г. Братск

Расчет испарения проводился по формулам (2) и (3) за семь БП, относящихся к шестидесятым-семидесятым годам прошлого столетия, для каждого объекта. Необходимая для расчета исходная информация заимствовалась из соответствующих кадастровых изданий «Метеорологический ежемесячник» и «Гидрологический ежегодник». При этом расчет испарения по формуле ГГИ проводился за календарные месяцы, затем путем суммирования месячных величин определялось испарение за соответствующий БП. На методике расчета по этой формуле необходимо остановиться подробнее. В формуле (2) переменная u_2 – это скорость ветра на высоте два метра над водной поверхностью. На практике, как правило, располагают только скоростью ветра (u_{10}) на высоте флюгера (10 м) на прибрежных станциях. Величину u_2 принято [5] определять по формуле:

$$u_2 = k_1 k_2 k_3 u_{10}, \quad (4)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты, характеризующие местоположение метеостанции – ее защищенность и характер рельефа в ее окрестностях; k_3 – коэффициент, учитывающий среднюю длину разгона воздушного потока над водной поверхностью. Значения этих коэффициентов можно определить по таблицам, помещенным в [5], но при этом необходимо иметь описание местности расположения станции. Не имея такого описания, легко допустить ошибку и выбрать по таблице, например, для k_1 значение 1,3 вместо значения 1,1. Такая неточность в выборе величины k_1 может привести к значительным погрешностям при расчете испарения за безледоставный период. В табл. 2 представлены результаты расчета испарения за 7 БП с Волгоградского водохранилища, подтверждающие сказанное.

Таблица 2

Испарение за безледоставный период (мм) с Волгоградского водохранилища в районе г. Волгограда

Годы	1961	1962	1963	1967	1968	1969	1970	Среднее
$K_1 = 1,1$	876	810	826	864	871	850	922	860
$K_1 = 1,3$	1000	924	946	986	995	969	1058	983

Однако такая информация не всегда имеется в распоряжении специалиста, осуществляющего расчет испарения. Не располагал подобной информацией и автор данной работы. Поэтому при определении величин u_2 решено было действовать следующим образом.

Формула (4) была заменена формулой

$$u_2 = k u_{10}, \quad (5)$$

подразумевая при этом, что $k = k_1 k_2 k_3$. Затем задавались различные значения k и при каждом из них производились расчеты испарения по каждому объекту за семь БП с последующим определением среднего значения испарения за эти семь БП. Полученные средние значения сравнивались со значениями испарения, опубликованными в литературных источниках. За конечный результат расчета испарения признавался тот, который был наиболее близок к значению испарения с данного водоема, приведенному в литературных источниках.

В общей сложности расчет испарения был произведен за 119 БП. При этом оказалось, что средние за БП значения испарения, определенные по формулам (2) и (3) очень близки, составляя 590 и 591 мм соответственно.

Относительная погрешность (δ , %) расчета испарения по формуле (3) за каждый БП определялась как

$$\delta = 100 \cdot |E - E_{\text{ГГИ}}| / E_{\text{ГГИ}}. \quad (6)$$

Средние значения δ за семь БП по каждому водному объекту представлены в табл. 2.

Таблица 2

Средняя относительная погрешность расчета испарения за безледоставный период по формуле (3)

Озеро	Относительная погрешность, %	Водохранилище	Относительная погрешность, %
Псковское	5	Угличское	7
Ильмень	5	Рыбинское	4
Валдайское	7	Волгоградское	4
Белое	10	Камское	4
Лача	7	Цимлянское	6
Галичское	7	Киевское	6
Ханка	6	Кременчугское	7
		Каховское	8
		Красноярское	9
		Братское	10
Среднее	7		7

На рис. 2 представлен график связи между испарением за БП, определенном по формулам (2) и (3).

Данные табл. 2 и рис. 2 свидетельствуют о достаточно близкой сходимости значений испарения за БП, определенных по формулам 2 и 3. Отсюда, по-видимому, можно сделать вывод о том, что формула (3) может использоваться хотя бы для приближенных оценок испарения с равнинных водоемов за БП конкретных лет.

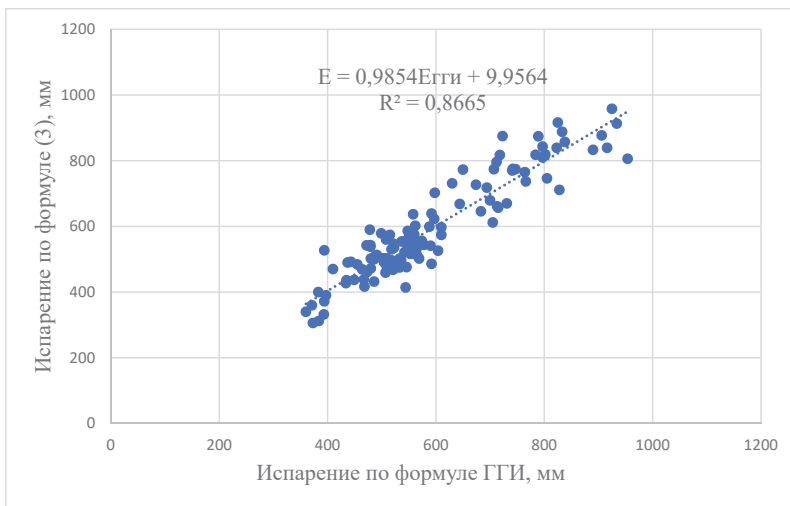


Рис. 2. Связь между испарением за БП, определенным по формулам (2) и (3)

Список литературы

1. Викулина З. А. Водный баланс озер и водохранилищ. Л. : Гидрометеиздат, 1979. 174 с.
2. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Л. : Гидрометеиздат, 1985. 425 с.
3. Постников А. Н. Приближенный метод оценки испарения с озер и водохранилищ // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2010. № 13. 9 с.
4. Рекомендации по расчетам водного баланса крупных озер и водохранилищ. Л. : Гидрометеиздат, 1989. 95 с.
5. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л. : Гидрометеиздат, 1969. 83 с.
6. Чеботарев А. И. Гидрологический словарь. Л. : Гидрометеиздат, 1978. 308 с.

УДК 504.03:711.4(556)

Международные инновации в содержании водоохраннх зон

Е. В. Потапова (e.v.potapova.isu@mail.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Отмечено, что поддержание и сохранение качества водных объектов фактически зависит от состояния окружающих территорий – водоохраннх зон, прибрежных защитных полос, на которых в соответствии с последними тенденциями урбанизации создаются общественные пространства. Приведены примеры современной организации набережных в мире, указаны основные геоэкологические риски водных объектов, предложены более 15 показателей оценки экологической нагрузки для прибрежных участков и представлены около 20 инновационных тенденций создания общественных пространств на прибрежных территориях.

Ключевые слова: набережная, общественные пространства, прибрежная защитная полоса, устойчивое развитие.

В соответствии с Целями устойчивого развития особое значение приобретают общественные пространства, включающие в себя все места общего пользования, публичные и открытые для всех, преимущественно на бесплатной основе и, условно, не предполагающие извлечение прибыли. К ним относятся улицы, бульвары, парки, скверы, площади, зоны вокруг административных, социальных, общественных объектов, мест обслуживания – кафе, театры, рынки, торговые площади, центры развлечений и др.

Особое значение имеют набережные. В мировой практике охраны водных ресурсов и объектов, в градостроительстве применяются различные термины, отличающие участки территории, примыкающие к береговой линии, единого мнения по этому вопросу пока не сложилось. Их доступность и правильная эффективная организация решает целый ряд задач, как по обеспечению населения специальными, социально-инклюзивными, гендерно-инклюзивными, интегрированными и в том числе экосистемными услугами, сохранению качества водного объекта, так и в профилировании жизнеспособности населённого пункта в целом. 70 % всех смертельных случаев в результате стихийных бедствий приходится на наводнения и другие связанные с водой катастрофы [3]. Важным аспектом проблем и структурирования всего водопользования является то, что использование множества водных объектов имеет трансграничный характер и законодательно закреплено в международных актах. основополагающим можно считать документ международного значения «Преобразование нашего мира: повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года» (2015 г.), где отражены цели и задачи водопользования, позволяющие развивать его на уровне стран и государств в интересах будущих поколений.

Не стоит забывать и об эстетике пространства. Что может быть лучше, чем прогулка вдоль берега реки или моря? Только прогулка по одной из самых красивых набережных мира. Общественные пространства относятся к факторам социокультурного развития. Где-то набережные стали историческими символами, местами средоточия мировых достопримечательностей, например: набережная

Сены в Париже (более 20 км по обоим берегам); Малекон в Гаване (протяженностью около 8 км); набережные Невы, Фонтанки и других рек Санкт-Петербурга (совокупно, значительно более 100 км); Набережная Босфорского пролива в Стамбуле и, конечно Венеция и Амстердам. Другие остались классическими местами для длинных прогулок, в том числе под сенью старых деревьев, например набережные Ниццы, Ялты, Ханьи на Крите, Марин-драйв в Мумбаи; Таелет в Тель-Авиве; набережная Виктории и Альфреда в Кейптауне; Акер Бригге в Осло; набережная Ангары в Иркутске. В других местах на набережных созданы ультрасовременные развлекательные центры, например: в Гонконге, Сингапуре, Центральная набережная Торонто; набережная Барселоны. Копакабана в Рио-де-Жанейро – самая известная набережная Нового Света – авенда Атлантика (около 4 км), часть самого большого городского пляжа мира и лучший пляж Африки – Диани Бич (17 км). В Манхэттене одном из самых известных островов мира набережную начали строить лишь в 2011 г. В Казани на набережной оз. Кабан создан один из интереснейших проектов: кроме деревянных променадов на сваях, создан комплекс биологической очистки воды в виде каскада дождевых садов. Автором проекта является китайская компания Tugenscape, победившая в международном архитектурном конкурсе и привнесшая в проект экотехнологии. Ей сейчас разрабатывается и многие другие проекты для России, а реализованы реконструкции набережных в Бангкоке – Benjakitti Forest Park, и множество в Китае, например Jinhua Yanweizhou Park [1].

С проблемой чрезмерной нагрузки на водные ресурсы сталкиваются жители всех континентов, что требует безотлагательного принятия коллективных мер. Основными геоэкологическими рисками для прибрежных территорий являются – водная эрозия, разрушение берегов, подтопление, заболачивание, волны, цунами и накопление загрязнений, в том числе из-за неконтролируемого смыва с окружающих территорий, особенно после выпадения и таяния осадков. Помимо этого, фактически все прибрежные, водоохранные территории, особенно неблагоустроенные подвергаются неконтролируемой переэксплуатации, связанной преимущественно с рекреацией и наездами автомобилей. Для оценки экологической нагрузки, с целью её регламентирования, на основе пространственного анализа территории нужны коэффициенты, учитывающие все виды хозяйственной и иной деятельности в границах водоохранных зон. Необходимо принять во внимание следующие показатели: высота и плотность застройки до определённого расстояния, например в границах водоохранной зоны и/или в пешей доступности; численность постоянно проживающего населения конкретного района или всего поселения; объём поверхностного стока, желательна с учётом наличия и отсутствия ливневой или дренажной системы; площади промышленных предприятий; протяженность транспортных магистралей; стоянки автомобилей и других транспортных средств и места их заправки; оборудованные и стихийные места отдыха; запущенные и замусоренные территории, территории катастрофического состояния; объекты и пространства, где необходима санация и реновация. Для недопущения истощения и обеспечения справедливого распределения

водных ресурсов между всеми пользователями необходимо рациональное управление ими. Глобальные рамочные параметры подхода КУВР, (комплексное управление водными ресурсами), включают стратегию, институты, механизмы управления и особенности финансирования этими территориями. 172 странам, сообщивших о внедрении КУВР удалось заложить прочный фундамент для реализации многочисленных элементов указанного подхода [5]. Конечно, основные проблемы касаются устойчивого финансирования и нехватки людских ресурсов. Но ключевым фактором адаптации КУВР к местным условиям, является участие населения в вопросах принятия и создания эффективных моделей использования прибрежных территорий, например закрепленных в форме соответствующей стратегии или закона.

Использование потенциала прибрежных территорий для увеличения комфорта жителей, повышающее качество жизни, стали одним из инструментов в конкуренции городов за людей, бизнес и капитал. Реновации этих участков проходят фактически во всех населённых пунктах мира и России. Промышленность уходит из городов, освобождая огромные территории, ранее занятые заводами, доками, складами, меняется транспортная логистика. Но трансформация этих участков является пространственным кризисом, потому что ландшафт и архитектура, приспособленные к определенной функции и фазе развития, становится барьером для последующего использования. Обычно здесь в прямом смысле необходимо всё разрушить и создать новое. Реализация множества архитектурных проектов у воды – это освоение безграничного рекреационного потенциала прибрежных территорий.

Ключевые тенденции создания таких объектов, помимо общей безопасности, гуманизации пространства и создания знаковых мест, особой событийности и мультифункциональности, включают в себя следующие:

- разнообразие, в том числе ландшафтное, спортивных сооружений;
- зонирование разной сложности и ценности с учётом потребностей;
- комфорт с разных позиций санитарных норм, безопасности, уюта, увеличение пешеходных пространств;
- инновации, особенно для детей и молодёжи;
- инклюзивность для всех социальных групп, например для маломобильных;
- открытость (гендерная, возрастная, социальные связи, добровольные гражданские инициативы, вечернее использование, оживленная уличная жизнь);
- ценностная ориентированность каждого объекта, например историко-культурная;
- нейтральность, обеспеченная фундаментальной мотивацией посещения такого места – ни личная выгода, ни гражданский долг;
- оригинальность, как возможность приобретения уникального узнаваемого городского портрета;
- образовательные возможности для всех;
- визуализация различных уровней от восприятия окружающих территорий и безопасности до скрытой рекламы, например здорового образа жизни;
- системная взаимосвязанность с городом и страной;

– эффективные транспортные узлы, входы, стыковки и вокзалы.

Кумулятивный эффект общественных пространств на основе полноценного плейсмей-кинга, как разносторонней концепции к обустройству мест общественного пользования, их облагораживанию, снабжению достопримечательностями, брендами, а также подход к управлению, дизайну и смене имиджа этих мест, правильному и эффективному привлечению населения будет лучшим вкладом в будущее любого населённого пункта.

Сегодня реновация прибрежных участков – это одна из ключевых тем в мировой урбанистике, в виде усиления контроля, увеличения затрат бюджета на проведение природоохранных мероприятий и очистку территории. При этом информация об установлении береговых линий, наличии водоохранных зон и проблемах прибрежных защитных полос обычно недоступна даже участникам рынка недвижимости. Установление этих зон с особыми условиями использования проводится без учета сложившегося, иногда столетиями, землепользования и застройки. Нередко установление границ водоохранных зон приводит к ущемлению прав законопослушных землепользователей – оформивших свои права на земельные участки до введения ограничений. Решение задач по выделению, разграничению и указанию территорий водоохранных зон на всей территории РФ требует несоизмеримых затрат времени и средств, при этом регулирование хозяйственной деятельности, только в пределах водоохранных зон, чаще не приносит желаемого положительного эффекта. Эти проблемы, преимущественно российского законодательства, не способствуют улучшению состояния прибрежных территорий. Эффективность таких пространств определяется их посещаемостью, которая может зависеть от различных показателей, в том числе обеспечения круглогодичного использования, особенно в регионах с выраженными сезонами. Как сказано в Хартии общественного пространства 2014 г., «общественные места – это ключевой элемент благосостояния индивида и общества, места коллективной жизни сообщества, выражение разнообразия совместного природного и культурного богатства и основ идентичности».

Ещё в 2011 г. на 23-й сессии Управляющего совета ООН-Хабитат была консолидирована работа по общественным пространствам на уровне компетентных агентств, развивать и продвигать общемировую политику по таким территориям, координировать, распространять знания и оказывать помощь городам в их создании и функционировании. Открытая рабочая группа ООН, ответственная за составление Целей устойчивого развития до 2030 года, предложила в качестве 11-й цели «построение открытых, безопасных, жизнестойких и экологически устойчивых городов и населенных пунктов». Одна из предложенных задач была сформулирована следующим образом: «к 2030 году обеспечить всеобщий доступ к безопасным, доступным и открытым для всех зеленым зонам и общественным местам, особенно для маломобильных групп» [4]. До сих пор 3 из 10 жителей планеты не имеют доступа к безопасным управляемым источникам питьевой воды, поэтому реализация к 2030 г. комплексного плана управления водными ресурсами на всех уровнях, в том числе при необходимости на основе трансграничного сотрудничества, является важной задачей ЦУР 6 «Обеспечение наличия и

рационального использования водных ресурсов и санитарии для всех» и подразделения ООН-Водные ресурсы, координирующего работу Организации Объединенных Наций в области водоснабжения и санитарии [5].

Создание пространств с четко определенными функциями становится одним из ключевых факторов современного развития. Городские общие ресурсы – традиционно определяются как элементы окружающей среды, такие, как атмосфера, леса, реки, места для рыболовства, пастбищные земли, которые повсеместно использовались и были доступны всем. Сегодня общими считаются также такие ресурсы, как общественные блага, включающие общественные пространства, набережные водных объектов, рынки, государственное образование, здравоохранение и инфраструктура, необходимая для функционирования общества [2]. Их эффективное использование с охранением основных ресурсов планеты и доступность на основе международного инновационного опыта позволит целенаправленно моделировать поведение жителей. Необходима разработка и применение транснациональных критериев эколого-экономического обоснования хозяйственных решений и оценки эффективности соответствующих управленческих постановлений в сфере водопользования и использования водных объектов.

Список литературы

1. Официальный сайт компании Turenscape. URL: <https://www.turenscape.com/en> (дата обращения: 28.10.2023).
2. Хабитат-III Исследовательские доклады. 11. Общественное пространство. Нью-Йорк : ООН. 13 с. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://habitat3.org/wp-content/uploads/11-Habitat-III-Issue-Paper-11_Public-Space_rus-A1_fin.pdf (дата обращения: 28.10.2023).
3. ЦУП 6. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/water-and-sanitation/> (дата обращения: 28.10.2023).
4. ЦУП 11. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/cities/> (дата обращения: 28.10.2023).
5. UN-Water. URL: <https://www.unwater.org/> (дата обращения: 28.10.2023).

УДК 556.5.072(282.256.141)

Особенности формирования зоны затопления р. Томь у г. Томска по результатам компьютерного 2D моделирования при сценарии прохождения расчетного расхода воды 1%-ной обеспеченности

Р. В. Романовский (keny146@mail.ru)

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

Аннотация. Представлены результаты компьютерного моделирования прохождения расчетного расхода воды 1 % обеспеченности р. Томь в двухмерной постановке задачи (2D модель) на участке от Коммунального (Южного) моста в г. Томске до г. Северска. Получена расчетная зона затопления р.Томь в динамике с момента начала выхода воды на пойму до формирования максимальной зоны затопления, описана особенность процесса выхода воды на пойму на данном участке, обусловленная рельефом местности, существующей городской застройкой, транспортной инфраструктурой и наличием существующей противопаводковой дамбы вокруг пос. Элеонор.

Ключевые слова: компьютерное 2D моделирование, зона затопления, моделирующая система HEC-RAS, противопаводковые дамбы.

Введение

Промышленное и гражданское строительство в поймах рек в настоящее время является достаточно сложной технической задачей, в том числе с точки зрения инженерно-гидрологического обоснования возможности проведения таких работ и выявления рисков затопления. Чаще всего классические гидравлические расчеты в рамках инженерно-гидрометеорологических изысканий справляются с этой задачей, однако бывают такие участки рек и такое количество объектов в пойме, гидравлическое влияние которых нужно учесть, что классические методы могут либо дать неверный ответ, либо не дать его вовсе. Для подобных осложненных участков рек, оправдано применение метода компьютерного моделирования, который позволяет учитывать более сложную физику движения жидкости, естественный и антропогенный рельеф местности. В данной работе на основании компьютерного 2D-моделирования прохождения расчетного 1 %-ного расхода воды р. Томь показан процесс формирования зоны затопления в динамике, что было выполнено на начальном этапе изысканий с целью оценки данной территории с точки зрения будущего строительства системы противопаводковых дамб.

Материалы и методы исследования, ограничения модели, калибровка

Компьютерное моделирование речной гидравлики с момента выхода воды на пойму и до момента развития максимальной зоны затопления на участке р. Томь выполнялось при помощи моделирующей системы HEC-RAS версии 6.4.1 [1]. Представленная модель разрабатывалась для сценария прохождения максимального расчетного расхода воды 1 % (14 600 м³/с) при существующей

застройке левой поймы р. Томь, транспортной инфраструктуре и существующей дамбе пос. Элеонор (с отметкой 80,00 м БС).

Топографической основой модели является цифровая модель рельефа – ЦМР (рис. 1), созданная на основе крупномасштабных топографических планов и русловых съемок.

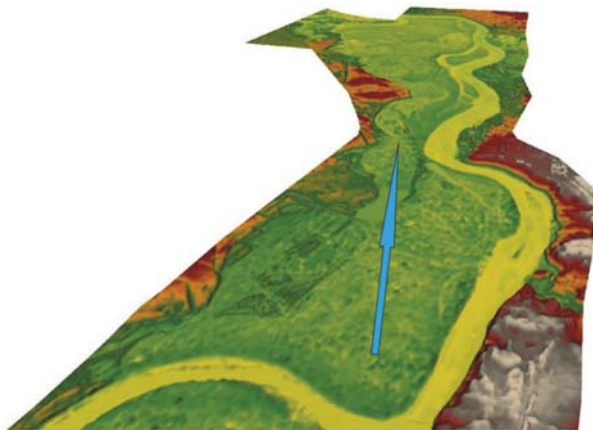


Рис. 1. Цифровая модель рельефа участка исследуемого р. Томь

Расчетный 1 %-ный расход воды определялся на основании ряда наблюдений с 1918 по 2020 г. Возможное влияние ледового покрова в гидравлической модели учитывается косвенно [2] через подбор коэффициента шероховатости на этапе калибровки модели, заторно-зажорные явления отдельно, в данном случае, не учитываются.

Калибровка модели [3; 4] выполнялась путем принятия на стартовом этапе табличных коэффициентов шероховатости [5] с их последующей корректировкой до достижения максимального соответствия выходных данных модели с данными инструментальных измерений на заранее выбранных контрольных точках. Граничные условия заданы расчетным расходом воды и измеренным уклоном водной поверхности (0,0084 ‰), измеренными в период прохождения реального половодья 2023 г.

Результаты

В результате моделирования был выявлен механизм затопления левой поймы р. Томь на рассматриваемом участке реки при существующей степени урбанизации (городская и частная застройка, транспортная инфраструктура) левой поймы реки (рис. 2). На предпроектном этапе работ ожидалось, что выход воды на пойму будет происходить приблизительно равномерно и одновременно по длине рассматриваемого участка, однако, по результатам эксперимента оказалось, что выход воды на пойму осуществляется, сначала, в верхнем створе рассматриваемого участка – в районе д. Черная Речка, а затем, с учетом руслового

времени добегаания, в нижнем створе участка – в районе устья протоки Бурундук (р. Кисловка).

Характерно, что движение пойменного потока в нижнем створе осуществляется по руслу протоки Бурундук вверх по течению, где он движется до тех пор, пока не встретится с другим пойменным потоком, идущим ему на встречу со стороны д. Черная Речка по течению реки. Примерно посередине рассматриваемого участка реки Томь происходит встреча этих двух пойменных потоков, выравнивание уровней, а затем пойменный поток течет соответственно общему уклону долины реки, т. е. со стороны д. Черная Речка в сторону устья протоки Бурундук.

В качестве дополнительного контроля результата, помимо расчетных зон затопления, для момента начала выхода воды на пойму, приведено три поперечных сечения (рис. 3), иллюстрирующих наличие воды на пойме в сечениях № 1, 3 (рис. 4, 6) и отсутствие ее в сечении № 2 (рис. 5) в один и тот же момент времени.

Полученные результаты моделирования, с одной стороны, позволили выделить наиболее опасные, с точки зрения начала процесса затопления участки левой поймы р. Томь, что позволит, в дальнейшем, уделить им особое внимание при начале работ по проектированию Левобережной дамбы, а с другой стороны, получено новое знание о механизме формирования зоны затопления р. Томь при прохождении расчетного расхода воды 1 % обеспеченности в условиях существующей застройки, пронаблюдать который в натуре достаточно проблематично, так как расчетный расход воды является расчетным случаем с вероятностью превышения 1 раз в 100 лет.

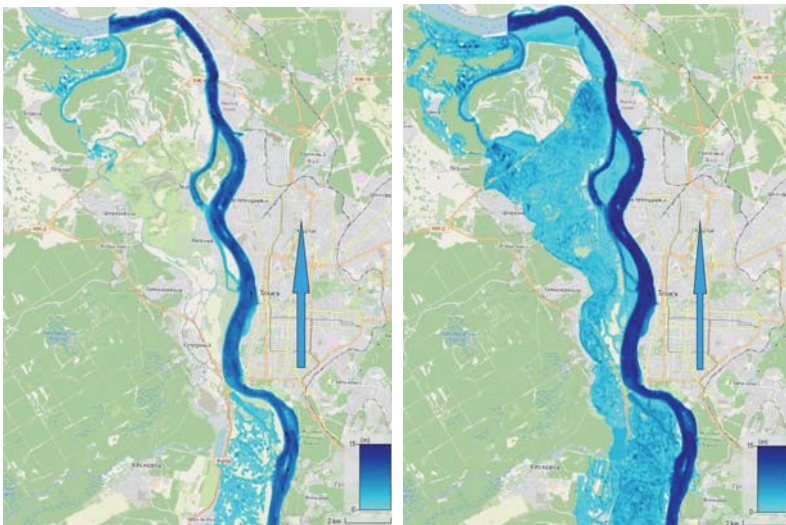


Рис. 2. Процесс выхода воды на пойму р. Томь и формирование зоны затопления: слева – начало выхода воды на пойму 23.04, справа – формирование максимальной зоны затопления 01.05, течение реки с юга на север



Рис. 3. Расположение контрольных створов № № 1–3 на исследуемом участке р. Томь: N1, N2, N3 – порядковые номера профилей поперечного сечения р. Томь

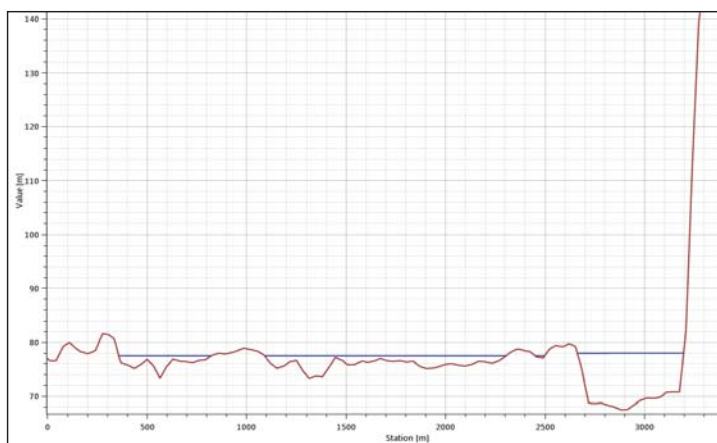


Рис. 4. Профиль поперечного сечения р.Томь в момент начала выхода воды на пойму 23.04 по поперечному сечению № 1

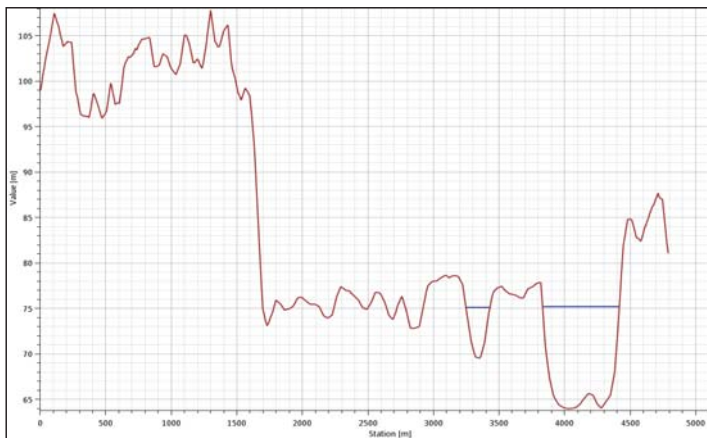


Рис. 5. Профиль поперечного сечения р.Томь в момент начала выхода воды на пойму 23.04 по поперечному сечению № 2

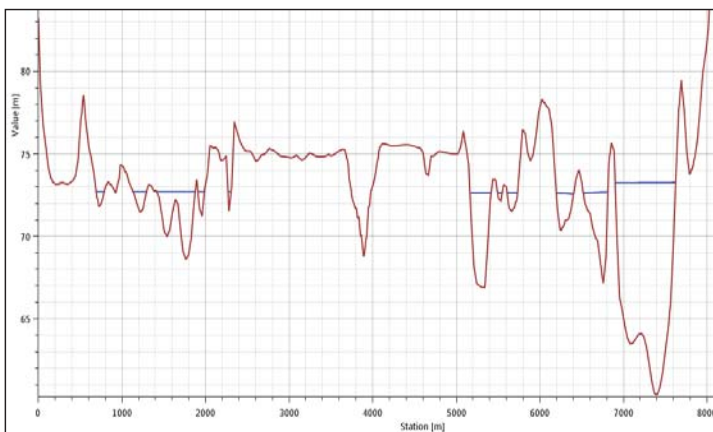


Рис. 6. Профиль поперечного сечения р.Томь в момент начала выхода воды на пойму 23.04 по поперечному сечению № 3

Выводы

На примере выявленного в результате компьютерного моделирования механизма движения воды при ее выходе на пойму на рассматриваемом участке показано, что данный метод исследования является хорошим дополнительным инструментом для принятия обоснованных проектных решений при производстве инженерных изысканий на осложненных городской инфраструктурой и морфологически сложных участках рек, позволяет учесть риски, которые не всегда удастся учесть при использовании стандартной методики в рамках инже-

нерно-гидрометеорологических изысканий, когда гидравлический расчет производится в дискретно выделенных створах. Результаты, озвученные в данном докладе, нашли свое непосредственное практическое применение при обосновании проектных решений в части предполагаемого строительства левобережной дамбы г. Томска и иных объектов в пойме р. Томь.

Список литературы

1. US Army Corps of Engineers. HEC-RAS River analysis system. 2D Modeling user's manual. Version 5.0, 2016. 171 p.
2. Земцов В. А., Вершинин Д. А., Инишев Н. Г. Имитационное моделирование заторов (на примере р. Томь, Западная Сибирь) // Лёд и снег, 2014. С.59–68.
3. Сазонов А. А., Крыленко И. Н. Анализ чувствительности двумерной гидродинамической модели к изменению коэффициента шероховатости // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии, 2018. С. 933–938.
4. Оценка чувствительности характеристик затопления к изменениям природных и антропогенных факторов на основе двумерной гидродинамической модели / И. Н. Крыленко, П. П. Головлев, Е. Д. Корнилова [и др.] // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии. 2018. С. 898–902.
5. Arcement G., Schneider V. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains // Water supply paper. Government printing office. 1989. N 2339. 38 p. DOI: 10.3133/wsp2339

УДК 556.535.8

Особенности пространственной изменчивости гидрохимического состава вод бассейна реки Сетунь (за период мониторинга 2019–2022 гг.)

С. С. Соловьева (sevastiana01@mail.ru), Л. Е. Ефимова (ef_river@mail.ru),
М. А. Терешина, О. Н. Ерина, Д. И. Соколов

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

Аннотация. В последние десятилетия происходит активный рост городов, что приводит к появлению новых городских рек, подверженных значительному воздействию человека. Городские водотоки находятся под значительным антропогенным прессом в силу быстрого роста населения и большого разнообразия источников загрязнения. Снижение качества воды малых рек даже при относительно меньших значениях антропогенных нагрузок, чем у более крупных рек, может приводить к быстрой деградации экосистем этих водных объектов. В работе изучены основные источники загрязнения, оказывающие воздействие на химический состав и качество вод бассейна р. Сетунь. По преобладающим типам поллютантов и их источников выделено несколько основных кластеров загрязнения.

Ключевые слова: городские водотоки, малые реки, гидрохимический состав, антропогенное влияние.

Введение

Бассейн р. Сетунь полностью расположен в административных границах г. Москвы. В верховьях реки расположен Саларьевский полигон ТБО, очистные сооружения ГУП «Мосводосток», снегоплавильные пункты. Помимо плотной,

постоянно увеличивающейся городской застройки, в бассейне реки функционируют многочисленные промышленные предприятия. Часть долины реки включена в крупнейший в Москве природный заказник «Долина реки Сетунь» и имеет статус особо охраняемой природной территории регионального значения. При этом сама р. Сетунь и ее притоки Раменка, Навершка, Сетунька и др. испытывают постоянное, увеличивающееся антропогенное загрязнение ее бассейна из-за большого количества сосредоточенных и рассредоточенных источников. Создание на водосборе городской реки зеленых буферных зон призвано защищать водоток, замедляя скорость движения поверхностных и сточных вод в русле реки, способствовать депонированию загрязняющих веществ в донных отложениях, что может служить источником вторичного загрязнения вод реки [4]. Исследования Jakovlev et al. [7] показали, что существенное влияние на структуру стока урбанизированных рек оказывают его потери в подземных коммуникациях, что также приводит к изменению степени разбавления концентраций поллютантов. Увеличение объема поверхностного стока и его доли в общей структуре питания во многом связано с уплотнением грунтов – «урбаноземов», уменьшением их водопроницаемости [1], что позволяет говорить о роли заасфальтированных территорий в увеличении загрязнения связанными с диффузным стоком поллютантами (нефтепродукты, входящие в состав реагентов соединения, взвешенные вещества). Влияние стока с автомагистралей на качество воды, величину наносов и на биоту малых городских рек подробно рассмотрено в исследованиях [9]. Ниже поступления поверхностного стока с автомагистрали наблюдалось увеличение концентрации органических загрязняющих веществ (нефтепродуктов, ПАУ и др.) [5], тяжелых металлов и металлоидов [6; 11], а также других загрязняющих веществ, которые скапливаются на дорогах и автостоянках после засушливых периодов. Определенную роль также играет тепловое загрязнение водотоков за счет сбросов сточных вод [3] или работы снегоплавильных пунктов (в местах их расположения температура воды может превышать стандартные для остальных отрезков русла значения на 15–20 градусов) [2]. Ряд авторов [8; 10] сходятся во мнении, что формирование химического состава и качества городских вод, во многом, обусловлено совокупностью поступающих сточных вод.

Материалы

Для взаимосоответствия пространственной изменчивости поллютантов и расположения источников загрязнения в бассейне р. Сетунь использовались данные мониторинговых наблюдений (рис. 1), производившихся с 2019 по 2022 г. в рамках проекта РНФ (проект 19-77-30004-П) и данных съемок в рамках проекта НФ «Без рек как без рук»: «Современные технологии мониторинга для улучшения состояния малых рек Подмосковья».

Результаты

Общая минерализация вод р. Сетунь незначительно (примерно на 100 мг/л) уменьшается при продвижении от истока к устью. В зимнюю межень данные изменения менее выражены, за счет притока высокоминерализованных вод в среднем и нижнем течении реки.

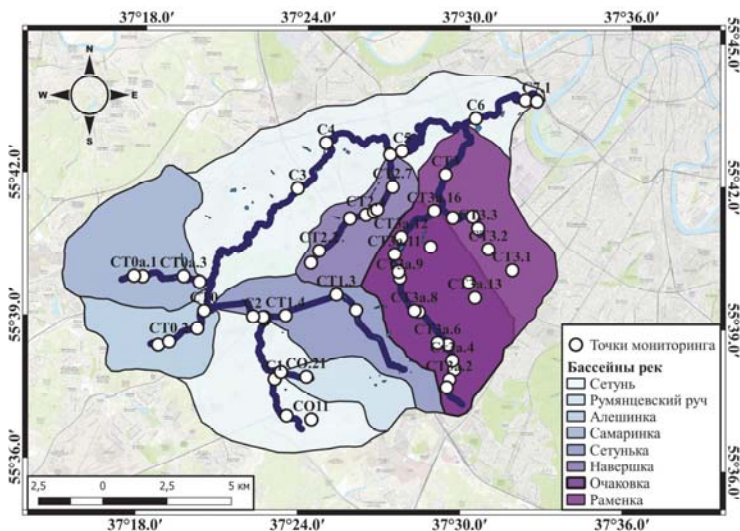


Рис. 1. Расположение точек мониторинга в бассейне р. Сетунь

Наибольший вклад в повышение минерализации (до 2000 мг/л) в зимний период вносит приток вод Навершки (обладают повышенной минерализацией в среднем и нижнем течении) и сток насыщенных хлоридными ионами вод с двух снеготаяльных пунктов, расположенных в пределах Очаковского промышленного кластера. Наименьшие значения минерализации (300–400 мг/л) наблюдались в верховьях Навершки, Раменки и Алешинки. Для всего бассейна характерна ярко выраженная смена гидрокарбонатно-кальциевого типа вод (преобладающего большую часть года) на хлоридно-натриевый с высокой долей кальция, происходящая в период зимней межени. Относительные концентрации натрия (мг-экв %) уменьшаются по мере продвижения от верховьев бассейна к приустьевой части. Так, на р. Алешинке (верхнее течение р. Сетуни) в 2021 г. наблюдалось увеличение доли натрия с 6,4 до 24 %, на Навершке (среднее течение р. Сетуни) – с 10,5 до 21,5 %, в устьевом створе главной реки – с 10,1 до 15,7 %. Обратная тенденция характерна для содержания иона кальция. В зимний период его доля в солевом составе воды увеличивалась от истока к устью реки с 16,6 до 26,1 %. Вниз по течению реки хлоридно-натриевый тип вод сменялся хлоридно-кальциевым. При этом в 2022 г. относительное содержание кальция для устьевового створа в зимние месяцы (24,2 %) было выше, чем в летнюю межень (20,5 %). Это может свидетельствовать об использовании противогололедных реагентов, содержащих CaCl_2 .

Наибольшие концентрации валового фосфора фиксировались в верхнем течении р. Сетуни (0,68 мг/л в июне 2021 г) и в среднем течении р. Раменки (0,217 мг/л до впадения р. Очаковки, август 2021). В верховьях Сетуни отмечено наибольшее содержание растворенных форм фосфора (до 0,55 мг/л, июнь 2021 г).

Это связано с воздействием полигона ТБО «Саларьево» и выпуска нормативно очищенных вод очистных сооружений. По направлению к устью содержание растворенного фосфора (как минерального, так и органического), снижалось.

Высокие концентрации валового азота (3,8–4 мг/л) в начале года характерны для всего бассейна. Пространственные различия в его содержании становятся более выраженными в период летне-осенней межени. В конце августа в водотоках большей части бассейна наблюдается пониженное содержание валового азота (2,5–2,8 мг/л). Исключение составляют участки русла, расположенные в пределах Очаковского промышленного кластера. Также в конце августа наблюдалось повышенное содержание $N_{\text{вал}}$ в верховьях, где его содержание достигало 7,4–10,1 мг/л, что связано с близостью полигона ТБО. Для среднего течения рек Навершки и Раменки, ниже коллекторных участков, пролегающих под зонами жилой застройки характерны высокие концентрации нитритного азота. На этих участках наблюдается максимальная доля нитритов в общем содержании азота (в среднем до 10–11 %). Минимальным количеством нитритов в содержании валового азота характеризуются участки реки, расположенные в ее верховьях или на границе городской и природоохранной территорий. Была выявлена четкая зависимость между удаленностью от истока река и содержанием аммонийного азота в водах Сетуни. Максимальное содержание аммонийного азота наблюдалось в августе 2022 г в верхнем течении и составило 19,43 мг/л. Ниже слияния с р.Сетунькой концентрация снизилась в три раза (5,78 мг/л), в нижнем течении реки уменьшаясь до значений, близких к нулевым. Причиной подобного пространственного распределения является влияние стоков очистных сооружений, расположенных в верховьях реки. Концентрации нитратного азота меньше, чем аммонийного. Закономерности, аналогичной распределению аммонийного азота, выявлено не было. Максимумы концентраций наблюдались в январе 2022 г в воде р. Навершки (абсолютный максимум – 4,9 мг/л) и в среднем течении Сетуни (4,1 мг/л).

Во время проведения съемок в бассейне Сетуни в августе 2021 и марте 2022 г. были отобраны пробы для анализа содержания нефтепродуктов. Прослеживается увеличение содержания НФПР в период повышенного стока с водосбора. В августе для большинства водотоков бассейна были характерны концентрации нефтепродуктов менее 0,1 мг/л. Максимум содержания (0,8 мг/л) отмечен в верховьях р. Самаринки. В низовьях реки, в месте ее впадения в Сетунь концентрация НФПР уменьшалась до 0,034 мг/л. Так как для этой реки не характерно присутствие в непосредственной близости от русла крупных автотрасс или заправочных станций, можно предположить, что основным источником нефтепродуктов в верховьях Самаринки являются предприятия Южной промзоны и ГСК (крупного гаражного кооператива), расположенных примерно в 600 м к западу от истока реки. Также, возможно, что частичное влияние на химический состав воды будут оказывать отходы строительной техники, работающей в этом районе. Максимальное содержание нефтепродуктов в воде Сетуни отмечено в ее среднем течении. Здесь сказывалось влияние вод р. Навершки, загрязненных в

результате работы дорожной и строительной техники и поступление в реку поверхностных вод с территории промышленного кластера с расположенными в среднем течении предприятиями и двумя заправочными станциями менее чем в 150 м от русла. В период половодья максимальные концентрации нефтепродуктов фиксировались именно в верхнем течении Сетуни, особенно это заметно в месте впадения в главную реку р. Сетуньки. Именно на этой территории в пределах 100 м от точки слияния расположены две автомойки (одна на левом берегу, другая на правом берегу реки), которые могут быть источником поступления в воду нефтепродуктов. Минимальное содержание этих веществ наблюдалось в воде Румянцевского ручья (0,057 мг/л), относительно небольшой водосбор которого преимущественно покрыт частной малоэтажной застройкой.

Для вод бассейна Сетуни характерны высокие значения ХПК (в среднем, 50,1 мгО/л). За многолетний период значения показателя в основном русле варьировались от 26,6 мгО/л (август 2019 г, 3 км выше устья) до 132 мгО/л (июньский паводок 2020 г). Среднегодовые величины ХПК постепенно уменьшаются от истока к устью (от 52 до 47,3 мгО/л). Максимальные по бассейну величины ХПК характерны для участков рек Навершки, Раменки и Очаковки, расположенных в пределах Очаковского промышленного кластера. Была построена зависимость между ХПК и содержанием взвешенных веществ. Максимальная величина аппроксимации для полученной зависимости наблюдались в трех километрах выше устья (0,77). Это единственная точка, со всех сторон окруженная природоохранной территорией, находящаяся на территории природного заказника «Долина реки Сетунь». То есть для нее характерен повышенный приток взвешенных веществ с водосбора за счет большей подверженности естественных природных грунтов эрозионным процессам. Поблизости от остальных точек мониторинга расположены либо зона жилой застройки, либо дорожное полотно, либо коллектор. Это значительно уменьшает содержание взвешенной органики. Максимальные значения ХПК_{общ} характерны для точек с минимальным влиянием взвешенных веществ, что может свидетельствовать о значительной роли антропогенного фактора в формировании состава органических веществ в среднем течении р. Сетунь.

В приустьевой зоне хорошо был выражен зимний период повышенных величин биохимического потребления кислорода. Минимальные средние значения этой характеристики большую часть года наблюдались в точках мониторинга С3 и С4 (4,14 и 4,17 мгО₂/л, соответственно), максимальные – в точках С2 и С5 (5,45 и 4,71 мгО₂/л). Для них же характерно и наиболее высокое содержание растворенных ОВ (по ХПК_{красв}). Повышенное содержание БПК₅ в устье Сетуньки обусловлено расположением в зоне загрязнения реки коммунально-бытовыми стоками (в верховьях реки, малоэтажные селитебные зоны и очистные сооружения) и влиянием расположенного в непосредственной близости полигона Саларьево. Относительно пониженные значения БПК₅ в среднем течении Сетуни обусловлены преобладанием в стоке вод, смываемых с заасфальтированной части водосбора. Эти показатели отмечены в точках мониторинга, расположенных рядом с промышленным кластером, и характеризующихся пониженной долей коммунально-бытовых стоков в общем количестве сточных вод. В целом для реки характерно постепенное снижение величины БПК₅ от истока к устью.

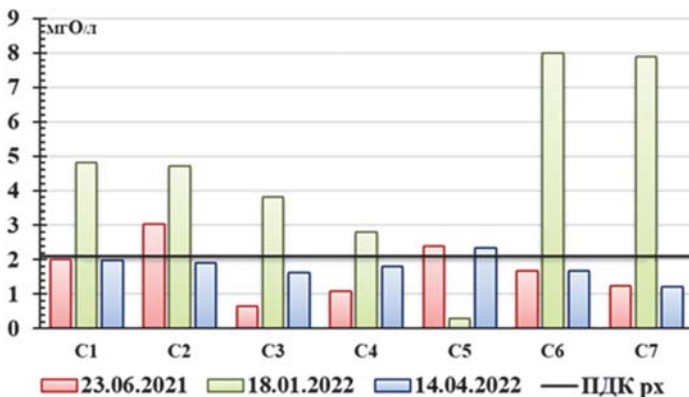


Рис. 2. Пространственное распределение значений БПК₅ по течению р. Сетунь

Выводы

Значительное влияние на ионный состав вод бассейна Сетуни в зимний период оказывают диффузный сток насыщенных солями реагентов вод с автотрасс и сбросы талых вод со снегоплавильных пунктов. В летний период состав вод приближен к естественному. Увеличение концентраций биогенных компонентов, наблюдающееся в летний период обусловлено естественным циклом. Увеличение содержания форм азота и фосфора в верхнем течении в периоды повышения водности во многом определяется влиянием Саларьевского полигона ТБО. В распределении аммонийных ионов и значений БПК₅ большую роль играют сбросы сточных вод и воздействие очистных сооружений. Для большинства компонентов химического состава характерно снижение концентраций по мере продвижения от истоков рек бассейна к устью с присутствием локальных пиков их содержания в среднем течении.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 19-77-30004-П.

Список литературы

1. Кошелева Н. Е., Цырман А. Г. Пространственно-временные тренды и факторы загрязнения почвенного покрова Москвы // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26, № 2. С. 207–236.
2. Селезнева А. В. Антропогенная нагрузка на реки от точечных источников загрязнения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2003. Т. 5, № 2. С. 268–277.
3. Соловьева С. С., Магрицкий Д. В., Ефимова Л. Е. Современное гидролого-гидрохимическое состояние малых рек Москвы, заключенных в коллекторы : материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы». Воронеж, 2019. Т. 2. С. 298–301.
4. Is stormwater harvesting beneficial to urban waterway environmental Flows? / T. D. Fletcher, V. G. Mitchell, A. Deletic [et al.] // Water Science and Technology. 2007. Vol. 55, N 4. P. 265–272.
5. Hydrogeochemistry and transport of organic contaminants in an urban watershed of Chesapeake Bay (USA) / G. D. Foster, Jr. E. C. Roberts, B. Gruessner, D. J. Velinsky // Applied Geochemistry. 2000. Vol. 15, N 7. P. 901–916.
6. Gobel P., Dierkes C., Coldewey W. G. Storm water runoff concentration matrix for urban areas // Journal of Contaminant Hydrology. 2006. Vol. 91, N 1–2. P. 26–42.

7. Rising groundwater levels in Northern-eastern Ukraine: hazardous trends in urban areas / V. V. Jankovlev, L. P. Svirenko, O. Ju. Chebanov, O. I. Spirin // Current problems of Hydrogeology on urban areas. Urban Agglomerates and industrial centers. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2002. P. 221–241.

8. LeBlanc R. T., Brown R. D., Fitzgibbon J. E. Modeling the effects of land use change on the water temperature in unregulated urban streams // Journal of Environmental Management. 1997. Vol. 49, N 4. P. 445–469.

9. The effects of motorway runoff on freshwater ecosystems: 1. Field study / L. Maltby, D. M. Forrow, B. A. Boxall Alistair [et al.] // Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal. 1995. Vol. 14, N 6. P. 1079–1092.

10. Robson M., Spence K., Beech L. Stream quality in a small urbanised catchment // Science of The Total Environment. 2006. Vol. 357, N 1–3. P. 194–207.

11. Anthropogenic factors affecting the Moskva River water quality: levels and sources of nutrients and potentially toxic elements in Moscow metropolitan area / G. Shinkareva, O. Erina, M. Tereshina [et al.] // Environmental Geochemistry and Health. 2022. Vol. 45, N 6. P. 3113–3141.

УДК 551.510.42

Утилизация осадков сточных вод с использованием дождевых червей *Eisenia andrei*

Т. С. Румянцева (t.rumyanceva90@mail.ru), А. Д. Стом (apatania@yandex.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Исследованы варианты переработки осадков сточных вод (ОСВ) в различных соотношениях с серой лесной почвой с помощью *E. andrei* по следующим показателям: выживаемость особей, продуктивность общая (количество коконов на контейнер), выход ювенильных особей из коконов, соотношение возрастных состояний и вертикальное распределение в субстрате. Результаты культивирования *E. andrei* в исследуемых образцах показали, что олигохеты снижают токсичность ОСВ. Эффективность этих процессов зависит от соотношения почвы и ОСВ в образцах смеси.

Ключевые слова: осадки сточных вод, дождевые черви, олигохеты, *E. andrei*, утилизация.

Введение

Осадки сточных вод представляют собой органические (до 80 %) и минеральные (около 20 %) вещества, выделенные из воды в результате механической, биологической и физико-химической очистки. В состав ОСВ могут входить соединения, обладающие общетоксическим, токсикогенетическим, эмбриотоксическим, канцерогенным и другими негативными свойствами. Осадки часто содержат высокие концентрации тяжелых металлов (ТМ), а также патогенную микрофлору, яйца гельминтов. Выделяемые ОСВ вредные газы могут превышать предельно допустимые концентрации в несколько раз, дурно пахнут. Их запах равен 4–5 баллам по шкале органолептических показателей.

ОСВ ухудшают экологическую обстановку в районе самих иловых карт и в местах их последующего захоронения. Они могут служить источниками бактериального и гельминтного заражения, а также высокотоксичных химических веществ, в том числе тяжелых металлов. Процессы самоочищения из-за больших концентраций ксенобиотиков и высокой их устойчивости к разложению идут

очень медленно [1]. Поэтому актуальной экологической задачей является восстановление окружающей среды: рациональная переработка промышленных и сельскохозяйственных отходов; санация и восстановление плодородия земель, утилизация отходов иловых стоков предприятий и т. д.

Вермикультивирование позволяет перерабатывать различные виды органических отходов в качественное экологически чистое удобрение – биогумус [5; 6]. Продуктивные и неприхотливые калифорнийские черви *E. andrei* заслужили стойкую популярность у вермифермеров [2; 3; 4; 7].

Объекты и методы исследования

Красный калифорнийский гибрид *E. andrei* в лаборатории разводили в контейнерах при температуре 20–25 °С и влажности 65–75 %. В экспериментах использовали половозрелых, имеющих поясковую зону (clitellum), червей длиной 8–10 см. Кормление *E. andrei* раз в неделю листьями капусты и органическими остатками домашнего хозяйства. Бананы и их кожуру, любые остатки дыни, арбуза, тыквы, помидоров, огрызки яблок и груш. Также подходит морковь, свекла, очистки картофеля, остатки каш, заплесневелый хлеб, сухари, грибы, листья капусты, гнилые сухофрукты и прочие отходы растительного происхождения.

Проводили пять вариантов экспериментов. Все образцы предварительно измельчали, просеивали, увлажняли и смешивали до однородного состояния. Анализировали следующие соотношения почв (в контейнеры помещали по 300 г образцов в каждый): 1) контрольный образец почвы – серая лесная почва; 2) осадки сточных вод (ОСВ); 3) 20 % серая лесная почва и 80 % ОСВ; 4) 50 % серая лесная почва и 50 % ОСВ; 5) 80 % серая лесная почва и 20 % ОСВ.

В исследуемых вариантах на протяжении всей экспозиции (50 сут.) поддерживали влажность в контейнерах, оптимальную для жизнедеятельности червей (65–75 %). Влажность почвы и образцов смеси определяли профессиональным влагомером почвы MC-7828 SOIL и выражали в процентах. В каждый контейнер помещали по 7 взрослых особей дождевых червей олигохет *E. andrei*. Изменения фиксировали по следующим показателям: выживаемость особей, продуктивность общая (количество коконов на контейнер), выход ювенильных особей из коконов, соотношение возрастных состояний и вертикальное распределение в субстрате.

Эксперименты ставили с двумя параллельными в двух биологических опытах. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с помощью программы Microsoft Excel. Выводы сделаны при вероятности безошибочного прогноза $p \geq 0,95$.

Основные результаты и обсуждения

Спустя 21 день экспозиции стали отмечать появление копролитов, внешне напоминающие плотные гранулы размером 1–5 мм. За счет интенсивного перемешивания органических веществ с минеральными частицами почвы и микроорганизмами, а также выделения ферментов слизи, дождевые черви создают устойчивые почвенные агрегаты, которые улучшают структуру почвы. Копролиты были отмечены только на поверхности образцов с серой лесной почвой и там, где она составляла 80 %, а ОСВ только 20 % (рис. 1).



Рис. 1. Копролиты в 4-м исследуемом образце (серая лесная почва 80 %, ОСВ 20 %) – 21-й день экспозиции

В тех образцах, где преобладало содержание ОСВ – 80 %, а серая лесная почва составляла только 20 % – копролиты были не выявлены (рис. 2).



Рис. 2. Копролиты в 3-м исследуемом образце (серая лесная почва и ОСВ 50 % на 50 %) – 21-й день экспозиции

Через 28-мь суток от начала экспозиции наблюдали тонкий слой капролитов во всех исследуемых образцах (рис. 3), что нашло отражение в изменении веса контейнера (табл. 1).

Таблица 1
Изменение веса контейнеров во время эксперимента (50 суток, грамм)

Пропорции почвы и ОСВ, %	Вес контейнера после увлажнения, 07.04	Вес контейнера на 21.04 (до увлажнения)	Вес контейнера на 12.05 (до увлажнения)	Вес контейнера на 18.05 (до увлажнения)
Серая лесная почва	338,2	366,2	394,6	405,8
ОСВ	299,3	318,1	303,7	306,5
50/50	361,1	389,8	395,8	404,4
80/20	345,7	379,7	390,7	391,9
20/80	315,8	335,9	331,3	339,2



Рис. 3. Копролиты в 3-м исследуемом образце (серая лесная почва и ОСВ 50 % на 50 %) – 28 дней экспозиции

На момент завершения экспозиции (50 сут.), копролиты составляли слой в контейнере от 3 до 5 мм, но слой почвенных агрегатов не был равномерным. В исследуемых образцах, где была серая лесная почва 100 % (контрольный субстрат) и соотношение серой лесной почвы к ОСВ 80 % на 20 % – *E. andrei* выживаемость составила 93 %, а также были обнаружены коконы и от 5 до 12 мелких особей длиной до 2 см.

В исследуемых образцах, где ОСВ 100 % выжило только 50 % особей, и ОСВ в соотношении с почвой 80 на 20 – выжило около 64 % *E. andrei* (рис. 4). Все особи выглядели здоровыми и активными, но не было обнаружено ни коконов, ни молоди.

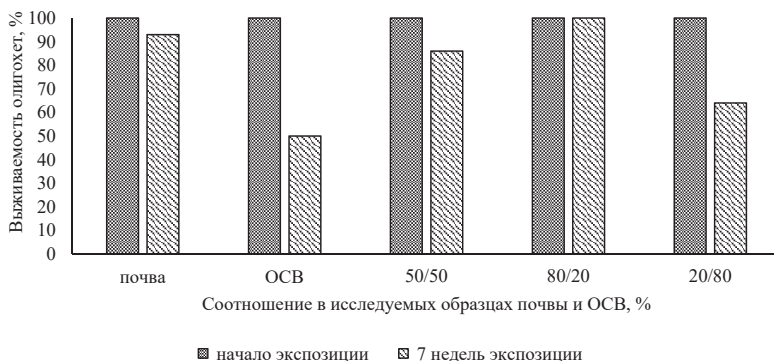


Рис. 4. Выживаемость олигохет *E. andrei* в исследуемых образцах, содержащих серую лесную почву и ОСВ в течение 50-суточной экспозиции

Как видно из рисунка количество особей *E. andrei* уменьшается в среднем на 36–50 % – в исследуемых образцах где ОСВ 100 % и где ОСВ преобладает (80 %), а также в них не было обнаружено ни коконов, ни молоди. Это позволяет сделать вывод, что подобное соотношение серой лесной почвы и ОСВ не самое благоприятное для *E. andrei*.

Репродуктивная активность червей в зависимости от токсичности среды также является достоверным показателем при биотестировании. Необходимо отметить, что основными параметрами при исследовании репродуктивности червей считаются: динамика между числом особей и полученных от них коконов и количество вылупившейся молоди из этих коконов. При изучении динамики вылупляемости червей в исследуемых образцах обнаружено, что появление коконов и молоди наблюдается через 30 дней от начала экспозиции увеличение их численности происходило только в исследуемых образцах, где преобладала серая лесная почва по отношению к ОСВ.

В образцах, где соотношение серой лесной почвы и ОСВ 50 % на 50 % через 50 дней эксперимента, численность особей калифорнийского червя уменьшалась в среднем на 14 % и был обнаружен всего один кокон, а молоди, как и в образцах, где ОСВ преобладало, не было (табл. 2).

Таблица 2

Выживаемость и основные параметры репродуктивности червей в контрольных (серая лесная почва) и исследуемых образцах (смеси почвы и ОСВ)

Соотношение почвы и ОСВ, %	Кол-во олигохет на начало экспозиции, %	Кол-во олигохет на конец экспозиции (50-й день), %	Наличие коконов, шт.	Наличие молоди олигохет, шт.
Серая лесная почва	100	93	4	10
ОСВ	100	50	–	–
50/50	100	86	1	–
80/20	100	100	4	7
20/80	100	64	–	–

Выводы

Поиск наиболее эффективных методов переработки ОСВ продолжается и метод вермикультивирования предстает как наиболее экологически безопасный, простой и дешевый, а использование *E. andrei* для переработки данных отходов перспективно. Вермикомпостирование ОСВ в результате жизнедеятельности *E. andrei* позволяет не только утилизировать ОСВ, но и получать экономический эффект за счет рекультивации и возврата нарушенных земель в хозяйственный оборот. Наиболее положительные результаты в условиях проведенного эксперимента были получены в образцах, где преобладает серая лесная почва, а содержание ОСВ не более 20 %, что резко увеличивает затраты на переработку этим методом на данный момент.

Список литературы

1. Шлёкова И. Ю., Кныш А. И. Очистка сточных вод: практикум : учеб. пособие. Омск : Омский ГАУ, 2020. 86 с.
2. Григорьев М. Ф., Степанова Д. И., Григорьева А. И. Возможности производства вермикомпостов для улучшения почвосмесей закрытого грунта // International agricultural journal. 2023. Vol. 66, N 2. Art. 15.
3. Кравец А. В. Совместная предпосевная обработка семян пшеницы гуминовым и бактериальным препаратами // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. № 5–4 (80). С. 182–185.
4. Стюм Д. И., Казаринова Т. Ф., Титов И. Н. Дождевые черви в переработке отходов. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2012. 111 с.

5. *Тумов И. Н.* Вермикультура: технологии рециклинга бытовых, сельскохозяйственных и промышленных органосодержащих отходов // Вермикомпостирование и вермикультивирование как основа экологического земледелия в XXI веке: достижения, проблемы, перспективы : сб. науч. тр. / ред. кол.: С. Л. Максимова [и др.]. Минск, 2013. С. 211–232.

6. *Тумов И. Н.* Дождевые черви. Руководство по вермиккультуре.: в 2 ч. Ч. 1. Компостные черви. М. : Точка опоры, 2012. 284 с.

7. *Usmani Z.* Role of earthworms against metal contamination: a review / Journal of Biodiversity and Environmental Sciences. 2015. Vol. 6. P. 414–427.

УДК 556.55(282.256.341)

Влияние климатических изменений на прибрежные апвеллинги в зал. Лиственничный (Южный Байкал)

Е. С. Троицкая (elena.troitskaya@lin.irk.ru)^{1,2}

¹*Иркутский государственный университет, г. Иркутск*

²*Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск*

Аннотация. Представлены результаты анализа влияния изменений климата на отдельные характеристики апвеллингов в заливе Лиственничный (Южный Байкал) в период с 1941 по 2023 г. Показано, что каждый год формируется от одного до трех апвеллингов (максимум 13). Чаще всего (80 %) причиной возникновения апвеллинга являются ветры западного сектора. Выявлено, что в первые десятилетия (1941–1969 гг.) апвеллинг мог развиваться в конце мая – июне и ноябре, а в более поздние годы (1970–2023 гг.) апвеллинги формируются только в июле – октябре. Анализ показал, что произошло увеличение продолжительности апвеллингов в 1970–2023 гг. по сравнению с 1941–1969 гг., а также рост величины понижения температуры воды во время апвеллинга. Так, средние ее значения возросли с 4,2 до 5,3 °С, максимальные с 12,0 до 13,5 °С, а минимальные значения понизились с 1,0 до 0,6 °С, соответственно, в 1941–1969 и 1970–2023 гг.

Ключевые слова: залив Лиственничный, апвеллинг, температура воды, ветер, климат.

Введение

Апвеллинг может сильно изменять физические и химические условия (например, распределение температуры воды, солености, плотности, химический состав воды и загрязняющие вещества) и, таким образом, влиять на биологические процессы (например, жизненные циклы бактерий, фито- и зоопланктона) в озерных экосистемах. Известно, что апвеллинг может развиваться в прибрежных и пелагических областях. Прибрежные апвеллинги достаточно хорошо изучены в озерах Мичиган, Ладожское, Онежское и Танганьика [2; 8; 9; 13].

Г. Ю. Верещагин [4] был первым, кто охарактеризовал прибрежный апвеллинг в Байкале. Он измерил температуру воды и концентрации растворенного кислорода в прибрежных поверхностных водах, которые соответствовали значениям, наблюдаемым в пелагических областях на глубине от 50 до 200 м. Позднее апвеллинги были обнаружены в прибрежных районах Северного Байкала по спутниковым снимкам NOAA/AVHRR [15]. Изучая влияние циркуляции воздушных масс над северным полушарием на сезонность температуры воды в

оз. Байкал, С. Л. Кац с соавторами [11] предположили, что изменчивость струйных течений является одним из факторов, влияющим на динамику местных вод в озере, в частности, на развитие прибрежного апвеллинга. Шимараев и др. [7] сделали первые количественные оценки (максимум изменений температуры воды, продолжительность, глубина развития апвеллинга и вертикальные скорости) прибрежных апвеллингов в Южном Байкале.

Влияние апвеллинга на распределение планктона в Байкале сообщалось в некоторых биологических исследованиях. М. М. Кожов [5] наблюдал мощный апвеллинг в проливе Малое Море и прилегающих районах озера после сильного СЗ шторма 4–9 сентября 1951 г. Температура поверхности воды снизилась с 12–13 до 7–7,5 °С в проливе Малое Море и до 8–9 °С у восточного берега острова. Планктон «был очень редок, и относительно равномерно распределен в верхнем 100-метровом слое» [5] после этого события. В августе 1963 г. [6], сильный СЗ ветер вблизи пос. Большие Коты (Южный Байкал) привел к подъему глубинных вод с температурой 5–6 °С на поверхность. Биомасса зоопланктона снизилась до 1,2 г/м² по сравнению со среднегодовым значением 40–50 г/м². Э. Л. Афанасьева [1] также показала, что вертикальные движения воды в зоне апвеллинга могут переносить науплии копепода эпишуры *Epishura baikalensis* из глубинных слоев воды на ее поверхность. На основе измерений фитопланктона и спутниковых SeaWiFS наблюдений в 2001–2003 гг. Б. Хейм с соавторами [10] пришли к выводу, что уменьшения концентрации хлорофилла *a* вдоль восточного берега Северного Байкала были связаны с апвеллингами. Примечательно, что концентрация хлорофилла *a* может увеличиваться после релаксации апвеллинга, как отметил ранее В. И. Верболов и др. [3] во время комплексных гидрофизических исследований на полигоне в районе мыса Елохин (западный берег Северного Байкала) в августе 1988 г.

Апвеллинг является одним из процессов, который приводит к вертикальной адвекции водных масс, питательных веществ и т. д. Ф. Питерс с соавторами [14], используя обратное моделирование показали, что годовые скорости и объемы воды, обнаруженные при подъеме воды общим адвективным переносом в отдельных бассейнах озера, соответствуют полученным оценкам потоков основных биогенов. На глубине 400 м скорости составляют ~21 м/год в Южном Байкале, 9 м/год в Среднем Байкале, и 29 м/год в Северном Байкале, где потоки составляют 110, 70 и 290 км³/год, соответственно. Потоки азота, фосфора и кремнезема из гипolimниона к поверхности оцененные отдельно для Южного и Северного Байкала составляют N = –93 и –34 ммоль/м²·год, P = –5 и –3 ммоль/м²·год и SiO₂ = –630 и –460 ммоль/м²·год, соответственно [12]. Судя по всему, апвеллинг развивается в верхнем слое воды и выносит питательные вещества на поверхность из глубинных слоев вблизи дна.

Целью данной работы было определение количественных характеристик прибрежного апвеллинга, развивающегося в заливе Лиственничный (Южный Байкал), его связи с ветровыми условиями и оценкой влияния изменений климата на его развитие.

Материалы и методика обработки данных

Для выявления случаев апвеллинга и оценки его характеристик были использованы данные о температуре воды, полученные в 1941–2023 гг. у пирса ЛИН СО РАН в п. Листвянка, расположенном на берегу Лиственничного залива в Южном Байкале (рис. 1). В 1941–2005 гг. температура измерялась опрокидывающимся ртутным термометром (точность $\pm 0,02$ °С) в 8, 14 и 20 ч., с 2006 г. по настоящее время электронными датчиками температуры (точность $\pm 0,002$ °С, дискретность измерений от 1 с до 2 мин). Для анализа случаев развития прибрежного апвеллинга использовались среднесуточные значения температуры воды. Определялись даты начала и окончания апвеллинга, его продолжительность и величина понижения температуры.

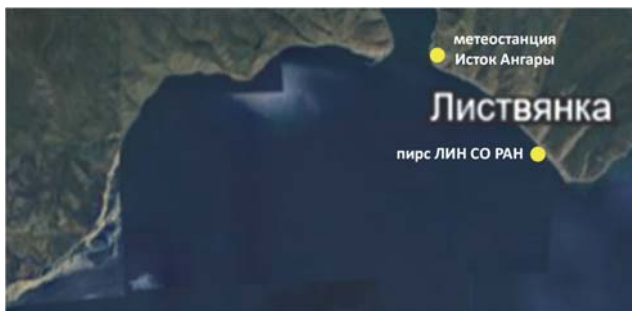


Рис. 1. Карта Лиственничного залива и место проведения измерений

Чтобы проанализировать ветровые условия развития апвеллинга, использовались суточные данные о скорости и направлении ветра за 1954–2010 гг. с метеостанции Исток Ангары, с 2011 г. по настоящее время – с метеостанции, установленной на пирсе ЛИН СО РАН (п. Листвянка). Так как расстояние между ними составляет около 4 км, ряд данных по ветру был принят однородным.

Анализ результатов

В 1941–2023 гг. были выявлены 286 случаев апвеллинга, которые наблюдались с мая по октябрь (рис. 2). В каждый отдельный месяц было зафиксировано от одного до четырёх случаев апвеллинга. В течение одного года чаще всего фиксировалось 1–3 апвеллинга (рис. 3). Максимальное количество достигало 13 случаев за год (1943).

Наибольшая повторяемость случаев апвеллинга приходится на август и составляет 42,7 % всех зафиксированных случаев, в июле выявлено 27,6 %, в сентябре – 21,0 %, октябре – 4,9 %, июне – 3,5 % и в мае 0,35 %. Самый ранний апвеллинг наблюдался в 1943 г. (рис. 4). Он начал развиваться 30 мая (6,2 °С), 31 мая достиг минимальной температуры (3,4 °С) и затем уже происходила релаксация апвеллинга до 4 июня (5,3 °С). Из анализа температуры воды следует, что весна-лето 1943 г. были теплыми, и прямая термическая стратификация установилась в третьей декаде мая. К сожалению, из-за отсутствия данных по ветру нет возможности проанализировать условия формирования апвеллинга.

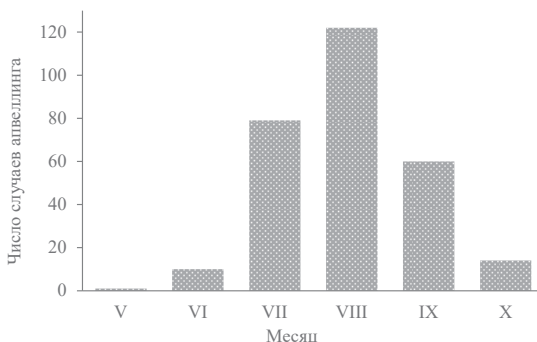


Рис. 2. Распределение выявленных в 1941–2023 гг. случаев апвеллинга по месяцам

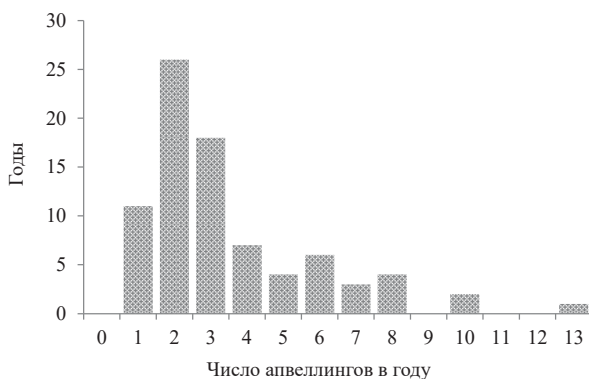


Рис. 3. Число выявленных апвеллингов в отдельные годы в 1941–2023 гг.

Средняя продолжительность апвеллингов за весь период наблюдений составила 7 сут., максимальная 21 сут. и минимальная 3 сут.

Средняя величина понижения температуры воды составляла 4,8 °С, минимальная не превышала одного градуса (0,06 °С, 13–19 июля 2022 г.), а максимальная достигала 13,5 °С (10–18 августа 2016 г.).

Анализ данных по ветру за 1954–2023 гг. показал, что апвеллинги были вызваны, в основном, ветрами западного сектора (рис. 5), которые наблюдались в течение предшествующих подъему воды суток или же в день начала развития апвеллинга при средней скорости ветра 5,5 м/с (максимальная 14 м/с). Чаще всего случаи апвеллинга наблюдаются при ЮЗ ветрах (34,4 % от всех случаев), при З – 20 %, С – 11,7 %, СЗ – 8,9 %, ЗЮЗ – 6,7 %, ЗСЗ – 6,1 % и на остальные направления приходится 12,2 %. Реже всего причиной развития прибрежного апвеллинга у п. Лиственничный являются ветры восточного сектора (3,9 %), так как с этой стороны берег Лиственничного залива защищен мысом Березовый и Приморским хребтом.

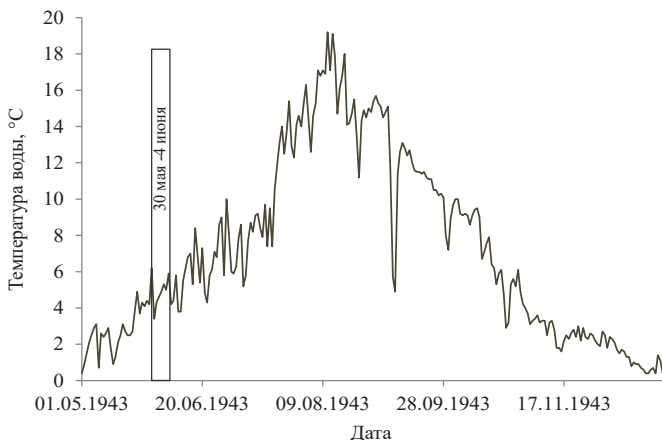


Рис. 4. Самый ранний зафиксированный апвеллинг, май – июнь 1943 г.

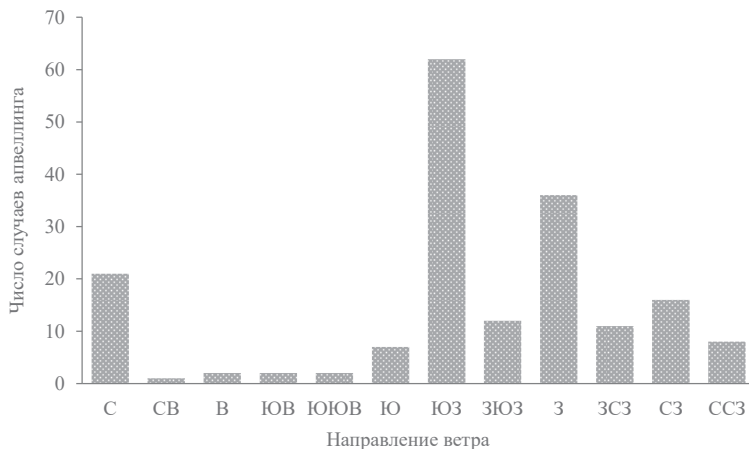


Рис. 5. Число случаев апвеллинга, развившихся при ветре определенного направления

Данные о температуре воды в июне – октябре 1941–2023 гг. позволяют проследить динамику изменения температуры в исследуемый период. Изменение температуры поверхностного слоя воды характеризовалось сначала понижением в 1941–1969 гг., а с 1970 г. по настоящее время происходит повышение (рис. 6). Анализ трендов показал, что понижение температуры воды в 1941–1969 гг. происходило со скоростью $-0,39\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ($r = 0,38$, $p = 0,04$), рост температуры составлял $0,26\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ($r = 0,38$, $p = 0,009$).

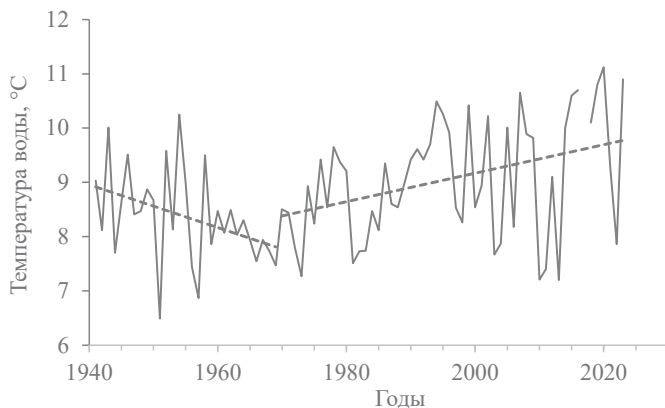


Рис.6. Средние за июнь-октябрь значения температуры воды на пирсе ЛИН СО РАН в п. Листвянка в 1941–2023 гг. (сплошная кривая) и линейные тренды в 1941–1969 и 1970–2023 гг. (пунктирные кривые)

Сопоставление двух периодов выявило общие черты и особенности в частоте развития апвеллингов в разные месяцы (рис. 7). Всего в 1941–1969 гг. было зафиксировано 129 апвеллингов, а в 1970–2023 гг. – 157. В 1941–1969 гг. развитие апвеллингов отмечается, начиная с конца мая – июня (0,78 и 6,98 % в мае и июне, соответственно), в то время как в 1970–2023 гг. в эти месяцы апвеллинги почти не развивались (0 и 0,64 % в мае и июне, соответственно). В июле, сентябре количество апвеллингов остается примерно одинаковым – 26,4 и 28,7 % в июле, 20,9 и 21,0 % в сентябре соответственно. В августе количество апвеллингов возросло с 38,0 в 1941–1969 гг. до 46,5 % в 1970–2023 гг.

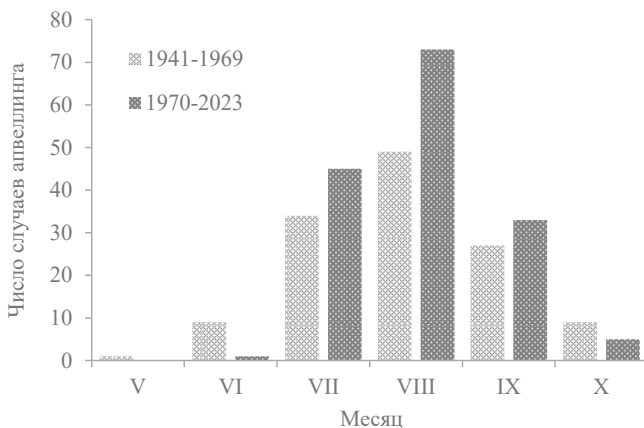


Рис. 7. Число случаев апвеллинга в отдельные месяцы в 1941–1969 и 1970–2023 гг.

Кроме того, при одинаковой средней продолжительности апвеллингов (7 сут) выявлено смещение продолжительности в большую сторону, начиная с 1970 г. (рис. 8). В 1941–1969 гг. чаще всего апвеллинги существовали в течение 4–6 сут. (57,7 %), в то время как в 1970–2023 гг. продолжительность апвеллингов чаще составляла 5–8 сут. (56,1 %). В последние десятилетия на треть выросло количество апвеллингов с продолжительностью 10 сут. и более (11,5 и 17,8 % в 1941–1969 и 1970–2023 гг. соответственно).

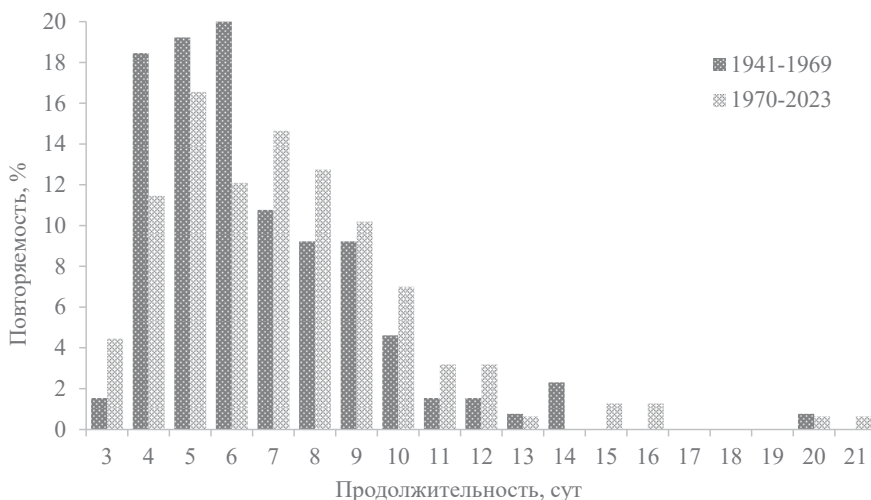


Рис. 8. Повторяемость разной продолжительности апвеллингов в 1941–1969 и 1970–2023 гг.

Отличаются и величины понижения температуры воды во время подъема воды. В 1941–1969 и 1970–2023 гг. средние значения составили 4,2 и 5,3 °С, максимальные – 12,0 и 13,5 °С, минимальные – 1,0 и 0,6 °С соответственно.

Заключение

Анализ случаев апвеллинга в заливе Лиственничный (Южный Байкал) в период с 1941 по 2023 г. показал, что апвеллинги развиваются каждый год. В основном, можно выделить 1–3 случая в год. Однако в зависимости от особенностей температурных и ветровых условий апвеллингов может быть больше (максимум 13). Продолжительность апвеллингов в среднем составляет 7 сут. и варьирует в пределах 3–21 сут. Температура воды понижается примерно на 5 °С, максимально на 13,5 °С. В 80 % случаев причиной возникновения апвеллингов являются ветры западного сектора, на ветры других направлений приходится лишь 20 %.

Чаще всего апвеллинги развиваются в июле – сентябре. На август приходится 42,7 % выявленных случаев апвеллинга, на июль – 27,6 %, сентябрь – 21,0 %, октябрь – 4,9 %, июнь – 3,5 % и май 0,35 %. Отмечено, что в первые десятилетия (1941–1969 гг.) апвеллинг мог развиваться в конце мая – июне, что практически не наблюдалось в более поздние годы (1970–2023 гг.). Выявлено

также увеличение продолжительности апвеллингов в 1970–2023 гг. по сравнению с 1941–1969 гг.

Таким образом, можно говорить о влиянии изменений климата на развитие апвеллингов в заливе Лиственничный (Южный Байкал). За время наблюдений произошло сокращение периода, когда развиваются апвеллинги, с ростом их числа в августе и увеличением продолжительности и величины понижения температуры воды.

Список литературы

1. *Афанасьева Э. Л.* Биология байкальской эпишуры : Наука, 1977. 144 с.
2. *Бояринов П. М., Петров М. П.* Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Наука, 1991. 155 с.
3. Оценка гидрофизического состояния деятельного слоя по материалам полигонных наблюдений на Байкале / В. И. Верболов, Н. Г. Гранин, А. А. Жданов [et al.] // Водные ресурсы. 1992. № 5. С. 74–86.
4. *Верещагин Г. Ю.* Некоторые данные о режиме глубинных вод Байкала в районе Маритуга. Труды Комиссии по изучению оз. Байкал : Наука, 1927. Т. 2. С. 77–138.
5. *Кожов М. М.* Биология озера Байкал. АН СССР, 1962. 315 с.
6. *Кожов М. М., Помазкова Г. И., Устюжин Ю. А.* Распределение зоопланктона в Южном Байкале / Известия Биол.-геогр. ин-та при Иркутском ун-те. 1970. Т. 23. Вып. 1: Бентос и планктон Южного Байкала. С. 87–94.
7. Об апвеллингах в озере Байкал / Шимараев М. Н., Троицкая Е. С., Блинов В. В. [и др.] // Доклады Академии наук (Науки о земле). 2012. Т. 442, № 5. С. 696–700.
8. *Bell G. L., Eadie B. J.* Variations in the distribution of suspended particles during an upwelling event in Lake Michigan in 1980 / J. Great Lakes Res. 1983. Vol. 9 (4). P. 559–567.
9. Upwelling couples chemical and biological dynamics across the littoral and pelagic zones of Lake Tanganyika, East Africa / J. R. Corman, P. B. McIntyre, B. Kuboja [et al.] // Limnol. & Oceanogr. 2010. Vol. 55 (1). P. 214–224.
10. Variation in Lake Baikal's phytoplankton distribution and fluvial input assessed by SeaWiFS satellite data / В. Heim, H. Oberhaensli, S. Fietz, H. Kaufmann // Global and Planet Change. 2005. Vol. 46. P. 9–27.
11. Influence of longdistance climate teleconnection on seasonality of water temperature in the World's largest lake Lake Baikal, Siberia / S. L. Katz, S. E. Hampton, L. R. Iznest'eva, M. V. Moore // PLoS ONE. 2011. Vol. 6 (2). Art. e14688.
12. Internal carbon and nutrient cycling in Lake Baikal: sedimentation, upwelling, and early diagenesis / В. Müller, M. Maerki, M. Schmid [et al.] // Global and Planet Change. 2005. Vol. 46. P. 101–124.
13. Classifying and forecasting coastal upwellings in Lake Michigan using satellite derived temperature images and buoy data / S. Plattner, D. M. Mason, G. A. Leshkevich [et al.] // J. Great Lakes Res. 2006. Vol. 32. P. 63–76.
14. Vertical turbulent diffusion and upwelling in Lake Baikal estimated by inverse modeling of transient tracers / F. Peeters, R. Kipfer, M. Hofer [et al.] // J. of Geophys Res. 2000. Vol. 105 (C2). P. 3451–3464.
15. Use of satellite observations to study thermal fronts of Lake Baikal / S. V. Semovski, M. N. Shimaraev, N. P. Minko, R. Yu. Gnatovskii // Earth Observation and Remote Sens. 2001. Vol. 16 (5). P. 773–787.

УДК 556.522(517)

Связь морфометрических и гидрологических характеристик и некоторых форм ландшафтов в бассейне оз. Хубсугул

А. А. Ушкалов (Lolitam@mail.ru)^{1,2}, Е. А. Ильичева (lenail3663@mail.ru)^{1,2}

¹Институт географии им В.Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск

²Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Проведен анализ морфометрических и структурно-гидрографических параметров и факторов, влияющих на формирование речного стока рек бассейна оз. Хубсугул и ландшафтами в суббассейнах. Исследование проводилось в условиях ограниченной гидрологической и метеорологической информации, где использование фондовых данных, моделирования на основе ЦМР и расчёта энтропии с применением пространственного анализа оказалось актуальным. В начальной фазе работы была создана геоинформационная модель, объединяющая картографические данные и данные цифровой модели высот. Эта система также включает в себя морфометрических характеристик речных бассейнов и их районирование в пределах исследуемой территории.

Ключевые слова: бассейн, Хубсугул, морфометрические характеристики, структурно-гидрографические параметры, ландшафт, речной сток, максимальный речной сток.

В статье рассматривается анализ факторов, влияющих на формирование стока, с уделением внимания на геоморфологические характеристики бассейнов, а также ландшафтные аспекты. Исследование проводилось в условиях ограниченной гидрологической и метеорологической информации, где использование фондовых данных гидрологических наблюдений, расчёта энтропии, дистанционных методов с применением пространственного анализа оказалось актуальным. В начальной фазе работы была создана геоинформационная система (ГИС), объединяющая картографические данные, Эта система также включала данные морфометрических характеристик речных бассейнов и районирование. На втором этапе исследования была проведена оценка влияния морфометрических параметров и разнообразных ландшафтов на формирование как среднесноголетнего стока, так и максимального расхода воды с использованием корреляционного анализа. Было выяснено, что наиболее тесные связи показали группа морфометрических – гидрологических характеристик бассейнов и вытекающие из них значения энтропии. Разнообразие ландшафтов его пространственное распределение, включающее в себя около 50 типов и 7 комплексов и оказывает влияние на формирование стока во всем бассейне.

В орографическом отношении бассейн Хубсугула расположен между Восточным Саяном на севере, отрогами Хангая на юге, горными системами Тувы на западе и Байкальской горной областью на востоке. Это высокоподнятая горная страна с наивысшей абсолютной отметкой – вершиной Мунку-Сардык (3491 м), наименьшая же отметка приурочена к урезу воды в озере (1645 м). Хребты Прихубсугуля, ориентированные преимущественно в меридиональном и субмеридиональном направлениях, являются связующими звеньями между Восточным Саяном и отрогами Хангая.

Озеро Хубсугул по данным [8] является регионом с самым высоким уровнем осадков в Монголии, при этом 92 % осадков выпадает в теплое время года, из которых около 80 % приходится только на летние месяцы. Согласно наблюдениям Хатгальской гидрометеорологической станции, за 54 года уровень воды в озере поднялся на 110 см, в среднем на 2,5 см в год, общее годовое количество осадков увеличилось на 36 мм, или на 12,8 %. Деградация вечной мерзлоты и таяние ледников в горах значительно усиливаются. Колебания уровня воды за 6–12 месяцев превышают 30–60 см. Большая часть бассейна оз. Хубсугул относится к округе озерно-котловинному степенно-луговому с полидоминантными злаковыми степями и лиственничными травяными лесами. На северо-востоке рассматриваемой территории разложился Мунку-Сардыкский высокогорный округ. Горная территория и сложное геологическое строение, многолетняя мерзлота, карстовые бассейны в купе создают специфическую картину формирования и трансформации речного стока.

В коллективной монографии «Ландшафтно-гидрологический анализ территории» [4] сказано, что одним из важнейших вопросов ландшафтно-гидрологического анализа является определение объектов такой комплексной проработки, где характер взаимосвязи процессов и структур пространственно локализован и отвечает представлениям о системности. Н. А. Ржаницын в своих трудах раскрыл основы структурно-гидрографического анализа [7], позволяющего на основе зависимостей рассчитывать некоторые гидрологические характеристики. Связи порядка реки по Шайдегеру и площади водосбора реки представлена на (рис. 1) коэффициент $r = 0,8$ величина достоверности аппроксимации (R^2) составляет 0,98, тренд отлично описывает распределение, связь между величинами тесная, при увеличении порядка, площадь бассейна нелинейно увеличивается.

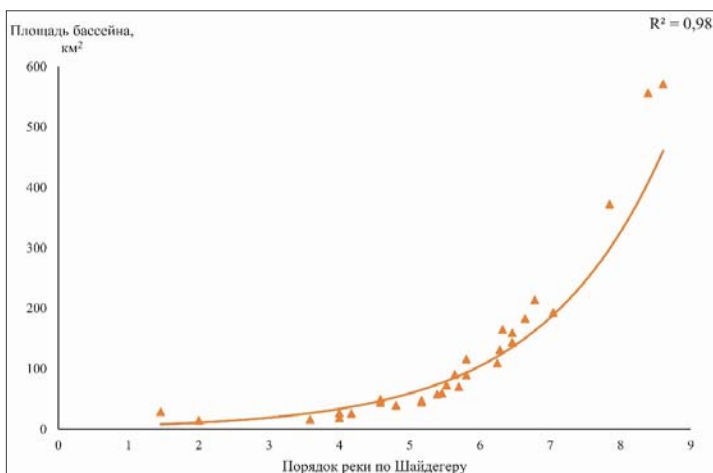


Рис. 1. График связи порядка реки по Шайдегеру и площадью водосбора

Магнитуа речной или же порядок сети по Шайдегеру вычисляется по порядковой системе Хортона, когда суммируется количество элементарных водотоков 1-го порядка. Речные системы представляются конечными связными графами без циклов – бинарными ориентированными деревьями. А. Шайдегером предложена формула (1) определения порядка в схеме Хортона:

$$K = 1 + \log_2 S_{1(k)} \quad (1),$$

где необходимым условием является учет насыщенности однофункциональными потоками, $S_{1(k)}$ – сумма элементарных потоков, при этом порядки отдельных притоков не представляют самостоятельного интереса.

Стационарные наблюдения за уровнями и расходами воды на водотоках бассейна оз. Хубсугул не осуществлялись. В течение 1969–1972 гг. было произведено гидрографическое обследование бассейна озера, а на трех репрезентативных бассейнах рек: Их-Хоро-Гол, Тойн-Гол, Джиглэг-Гол велись гидрометрические наблюдения. На основе цифровой модели высот (ЦМВ) была построена водно-эрозионная сеть. Из 229 водотоков, впадающих в озеро, площадь суббассейнов 63 рек занимает более 81 % всего водосбора. Определение временных водотоков проведено по топографической карте, где они обозначены особым условным знаком. Суммарная площадь 28 временных водотоков водосборов 326 км², что занимает 7 % водосбора. К эпизодическим водотокам относятся, как правило, элементарные водотоки, имеющие собственное устье на побережье и слаборазветвленную русловую сеть, представленную системами логов, балок и оврагов. Эпизодических водотоков насчитывается 140, их занимают 7 % от общей площади или 358 км². Водосборам с нерусловым стоком принадлежит менее 5 % общей площади. Такие водосборы выявляются в результате автоматической обработки SRTM, и их идентификация зависит от разрешения исходной цифровой модели высот (ЦМВ).

Связь площади речных бассейнов и суммарной энтропии (рис. 2) характеризуется очень тесной, об этом свидетельствует коэффициент корреляции $r = 0,99$ и $R = 0,98$, т. е. при увеличении площади водосбора будет увеличиваться значение энтропии при максимальном речном стоке, речная сеть была смоделирована в программе ArcGIS, далее представлена в виде графа и рассчитана в соответствии с ее сложным строением.

Для расчета суммарной энтропии использовалось уравнение Шеннона [3] Эта величина названа структурной мерой и позволяет описывать структуру графа с точностью до изоморфизма. Структурные меры могут быть определены через топологические характеристики (M , L , d), через их геометрические аналоги или через гидрологические параметры водотоков (расходы воды, площади водосбора), формула (2). Для каждой i -той точки слияния водотоков определяется величина:

$$H_i = -\frac{\bar{m}}{n+m} \log_2 \frac{\bar{m}}{n+m} - \frac{\bar{n}}{m+n} \log_2 \frac{\bar{n}}{m+n} \quad (2),$$

где \bar{m} и \bar{n} – топологические параметры сочленяющихся потоков. Суммирование H_i по всем точкам слияния представляет собой характеристику, именуемую по предложению Б. А. Казанского «энтропия», либо «структурная мера» [3].

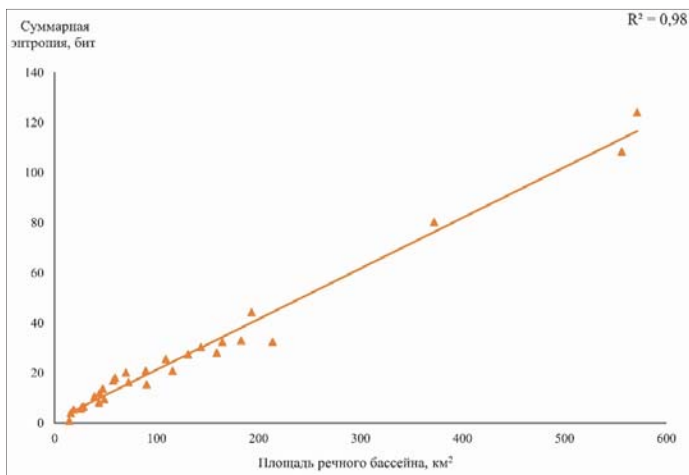


Рис. 2. График связи площади бассейна и суммарной энтропии

Важно отметить, что весомым фактором является отсутствие древесной растительности и ее влияние на такие элементы водно баланса, как испарение, просачивание и время добегающего стока. Связь площади безлесных территорий и среднегодового стока с преобладающими площадями ландшафтов представлена на (рис. 3). Отобрана часть бассейнов с долей безлесных территорий более 60 %, приуроченных к степным ландшафтам, коэффициент корреляции равен 0,67 что свидетельствует о средней степени связи.

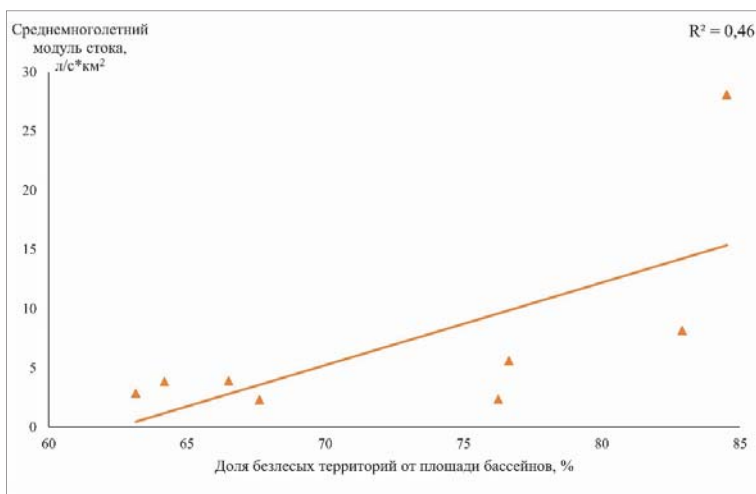


Рис. 3. График связи доли безлесных территорий от площади бассейна и среднегодового модуля стока

Нередко дожди, вызывающие хорошо выраженные паводки в речных бассейнах, лишенных леса, активизируют эрозию в бассейнах в процессе их развития, увеличивающих «сложность строения речной системы», т. е. формирование небольших водотоков – ручейков, перерастающих в полноценные реки, учитывая сложное геологическое строение бассейна оз. Хубсугул, активную тектонику и крутые бассейны формирующие сток, можно предположить, что лишенные лесной растительности участки бассейнов влияют на формирование стока и конечное строение. Увеличение площади безлесых территорий деградация почвенного покрова, вследствие вырубок и пожаров в будущем может вызывать катастрофические паводки и увеличение количества материала, выносимого рекой, активизацию селей. Неконтролируемый выпас скота нарушают лесную подстилку, ухудшают инфильтрационную способность почв и видоизменяет водный баланс.

Взаимосвязь средней высоты водосбора и среднегогодового модуля стока представлена на (рис. 4). В связи с отсутствием многолетней гидрологической информации, данные об среднегодовых модулях стока воды были взяты из [1; 6]. Коэффициент корреляции между величинами равен 0,91, $R = 0,82$, прямая хорошо аппроксимирует переменные. С увеличением средней высоты водосбора среднегогодовой сток линейно возрастает.

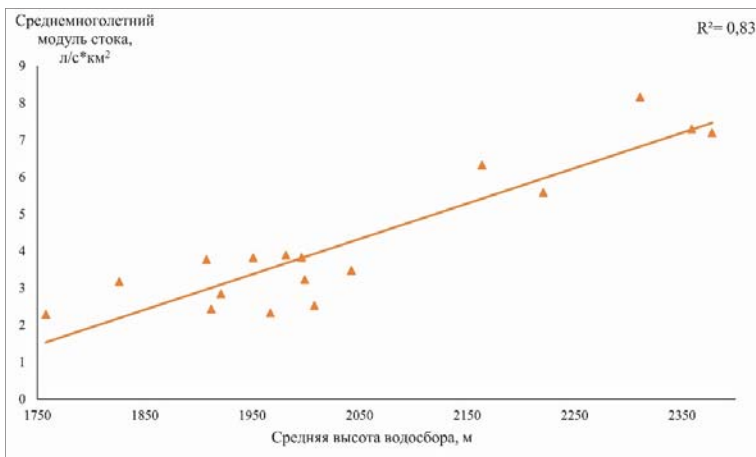


Рис. 4. График связи средней высоты водосбора и среднегогодового модуля стока

В работе А. Н. Антипова [2] отмечена важная роль такого фактора как уклон водосбора, влияющего на формирование и трансформацию стока. Значения максимального модуля стока взяты из Атласа МНР [6]. На основе рассчитанных значений уклонов водосбор построен совместный график с максимальным модулем стока (рис. 5).

Коэффициент корреляции 0,84, коэффициент аппроксимации составляет 0,71, т. е. при увеличении уклона водосбора происходит увеличение максимально модуля стока (с обеспеченностью 1 раз в 50 лет). Увеличение уклона поверхности приводит к уменьшению задержки или задержке инфильтрации осадков в подземные воды, что в свою очередь увеличивает максимальный сток воды. Это связано с тем, что подземные воды имеют меньше времени для накопления и медленного поступления в водные системы при более крутом уклоне.

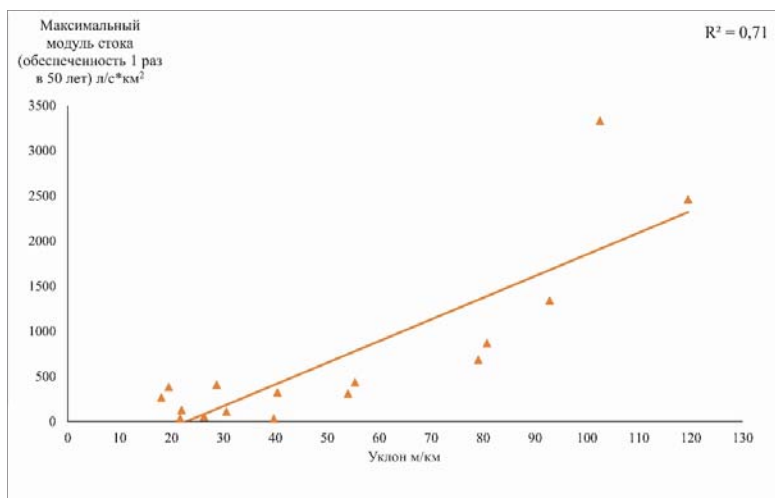


Рис. 5. График связи уклона водосбора и максимального модуля стока

Влияние растительности на сток. С помощью ГИС программ были построены карта лесобразующих пород масштабом 1:100 000, основой стала карта из Атласа оз. Хубсугул [1]. Оцифрованы все участки степей и лесов различной породы. На основе полученных значений было выявлено, что степные территории занимают около половины Хубсугульского бассейна, порядка 52 % (табл.).

Таблица

Площади компонентов лесобразующих пород и безлесых территорий

Компонент	Площадь, км ²	% от общей площади,
Площадь бассейна озера (без водного зеркала)	4917,2	100
Общая площадь лесов и редколесий	2365,7	48
Площадь безлесых территорий	2551,5	52
Площадь редколесий	214,0	4
Площадь лиственных лесов	1024	21
Площадь лиственных лесов в сочетании со степными участками	592,1	12
Площадь кедровых лесов в сочетании с лиственными участками	156,6	3,19
Площадь кедровых лесов	29,3	0,6

Связь стока с преобладающими площадями ландшафта представлена на (рис. 6). Было отобрано 8 бассейнов, преобладающими комплексами ландшафтов в бассейне, площадь которых варьируется от 28 до 50 %. Воздействие комплекса нижнетаежных горных условий на формирование стока проявляется умеренно (коэффициент аппроксимации равен 0,5) и носит характер возрастающей зависимости (при увеличении доли площади ландшафтов сток с водосбора увеличивается). Для остальных типов и комплексов ландшафтов зависимости найти не удалось, либо их площади были недостаточными для учета, как преобладающих.

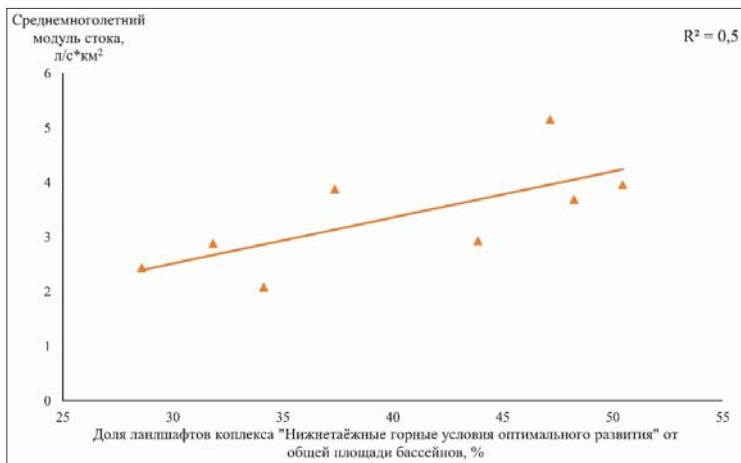


Рис. 6. График связи между долями комплекса ландшафтов «Нижнетаежные горные условия оптимального развития» и среднегодовом модуле стока

С целью учета редукции стока в зависимости от площади водосбора, максимальные модули стока были приведены к условной площади 200 км² по формуле: $q'_{200} = q(A/200)^n$, где q – модуль стока, A – площадь бассейн реки, n – показатель степени редукции, равный 0,15. Площадь бассейнов, смоделированная на основе ЦМВ варьируется от 14,4 до 372 км², модуль стока 2,1–5,1 л/с*км². Комплекс нижнетаежных горных условий оптимального развития преимущественно распространен на восточном побережье, бассейны относятся к двум районам: Северо-восточный горный лесной и Восточно-Прихубсугульский горно-лесной, с преобладанием в бассейнах первого. Для Северо-восточного горно-лесного района характерно широкое распространение многолетнемерзлых пород, являющихся водоупором и создающих дополнительные объемы стока при оттаивании. Район находится в пределах горно-лесного пояса, частично захватывая гольцовый и подгольцовый пояс. В прибрежной части бассейнов Восточно-Прихубсугульский горно-лесной район характеризуется низкогорным рельефом и относительно сильно изрезанными речными долинами, чередованием лесных (по вершинам водоразделов и северным склонам), степных (по южным склонам) и луговых (по долинам рек) сообществ. Отмечается повышенная влажность воздуха

в связи с близостью к акватории озера, несмотря на меньшее количество атмосферных осадков по сравнению с высокогорьем [5].

Заключение

Закономерности строения речных систем – устойчивые соотношения их структурных параметров, для каждой речной системы значения этих соотношений индивидуальны, что обусловлено спецификой влагооборота, геологического строения и ландшафтом ее бассейна. Использование закономерностей строения речных систем нашло широкое практическое применение в гидрологических расчетах. Выявлены тесные связи между структурно-гидрографическими и морфометрическими характеристиками, например средней высотой водосбора и среднемноголетним слоем стока, площадью речного бассейна и порядком по Шайдегеру. Связь с ландшафтными характеристиками не дает устойчивых зависимостей. Сложность в отборе показательных бассейнов, где главным критерием является процент площади занимаемого ландшафта на рассматриваемой территории более 60 %. Связь ландшафтных характеристик и речного стока позволяет строить регрессионные зависимости, но для более точного понимания процессов взаимодействия текучих вод с подстилающей поверхностью, необходимы натурные наблюдения в экспериментальных бассейнах на уровне урочищ и фаций.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГ СО РАН им. В. Б. Сочавы (№ государственной регистрации АААА-А21-121012190059-5

Список литературы

1. Атлас озера Хубсугул. Монгольская Народная Республика / Д. Базардорж, О. М. Кожова, Ж. Бямба [и др.]. М. : ГУГК. 1989. 119 с.
2. Антипов А. Н., Федоров В. Н. Ландшафтно-гидрологическая организация территории. Новосибирск : СО РАН, 2000. 254 с.
3. Гарцман И. Н., Казанский Б. А., Корытный Л. М. Структурная мера речных систем и ее индикативные свойства (на примере систем Южно-Минусинской котловины) // Доклады Института географии Сибири и Дальнего Востока. Иркутск : Восточно-Сибирская правда, 1976. № 49. С. 54–60.
4. Ландшафтно-гидрологический анализ территории / под ред. А. Н. Антипова, Л. М. Корытного. Новосибирск : Наука, 1992. 208 с.
5. Природные условия и ресурсы Прихубсугулья в МНР / под ред. Ж. Батмунх, Н. Ф. Лосева. Иркутск – Улан-Батор : Изд-во ИГУ, 1973. 468 с.
6. Природные условия и ресурсы Прихубсугулья в МНР / под ред. Н. Содном, Н. Ф. Лосев. М. : Недра, 1976. 354 с.
7. Ржаницын Н. А. Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л. : Гидрометеиздат, 1960. 238 с.
8. Integral Natural Resource Management in the Baikal Basin Transboundary Ecosystem. URL: <http://baikal.iwlearn.org> (date of access: 24.11.2023).

УДК 556.114.6

Основной ионный состав воды Иркутского водохранилища

Г. Б. Хомматлиев (hom@igc.irk.ru)^{1,2}, В. И. Полетаева (alieva@igc.irk.ru)¹,
М. В. Пастухов (mpast@igc.irk.ru)¹, О. А. Бархатова (barhat2006@mail.ru)²

¹Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск

²Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Иркутское водохранилище является водоемом питьевого и рыбохозяйственного назначения. Для изучения его гидрохимических характеристик в мае 2021 г. были собраны и проанализированы 23 пробы поверхностных и придонных вод. Результаты показали, что величина минерализации в среднем 95,5 мг/л. Основным катионом является Ca^{2+} , составляющий 63 % от общего количества катионов, анионом – HCO_3^- , составляющий 89 % от общего количества анионов. Гидрохимический тип вод $\text{HCO}_3\text{-Ca}$. В русловой части водоема от истока р. Ангары до плотины Иркутской ГЭС концентрации основных ионов значительно не изменяются, что определяет решающее влияние на формирование состава вод Иркутского водохранилища стока оз. Байкал.

Ключевые слова: Иркутское водохранилище, главные ионы.

Введение

Природные факторы, влияющие на химический состав поверхностных вод, разделены на две основные группы. К первой группе относят прямые факторы, непосредственно воздействующие на водную среду, т. е. действие веществ, которые могут обогащать воду растворимыми соединениями: горные породы, почвы, живые организмы. Ко второй группе относят косвенные факторы, определяющие условия, в которых происходит взаимодействие веществ с водой: климат, рельеф, водный режим, растительность, гидрогеологические и гидродинамические и прочие условия [1].

В настоящее время большое влияние на гидрохимический состав водоемов оказывает антропогенная составляющая, к которой относятся бытовые сточные воды, промышленные стоки, использование удобрений и др. [6]. В связи с этим в условиях постоянного и порой увеличивающегося антропогенного пресса на окружающую среду большое значение приобретает изучение гидрохимических характеристик поверхностных водотоков [8].

Иркутское водохранилище, используемое для питьевого и рыбохозяйственного назначения, по своему происхождению является уникальным водоемом в связи с тем, что оно относится к единой пресноводной Байкало-Ангарской водной системе. Трансформация его гидрохимического состава неминуемо приведет к негативным последствиям как для водной флоры и фауны, так и для проживающего на его побережье населения. С развитием промышленной и туристической деятельности в бассейне Иркутского водохранилища антропогенная нагрузка на экосистему водоема значительно возрастает, предопределяя проведения контроля за загрязнением его водных ресурсов. Поэтому целью исследования стало определение концентраций компонентов основного ионного состава Иркутского водохранилища и выделение особенностей их пространственного распределения.

Материалы и методы

Иркутское водохранилище – первая ступень Ангарского каскада, создано в результате зарегулирования р. Ангары. От истока р. Ангары до плотины Иркутской ГЭС водохранилище простирается с юго-востока на северо-запад. Общая протяженность 55 км. Ширина в истоке р. Ангары составляет 1 км, у плотины Иркутской ГЭС – около 2,5 км, достигая в районе залива Курма 7 км. Наполнение водохранилища длилось с декабря 1956 г. по июль 1962 г. При НПУ площадь зеркала водохранилища 154 км², а объем 2,1 км³.

Изучение основного ионного состава вод Иркутского водохранилища проведено на основе данных, полученных в результате химического анализа 23 проб вод. Пробы отобраны в мае 2021 г. на 8 станциях русловой части водохранилища (от истока р. Ангары до плотины Иркутской ГЭС) и 6 станциях, приуроченных к устьевым частям заливов: зал. Курма, зал. Уладова, зал. Еловый, зал. Ершовский, зал. Чертугеевка, зал. Якоби (рис. 1). На большинстве станций отобраны пробы поверхностных (глубина 0,2 м) и придонных (глубина 1 м от дна) вод, в истоке р. Ангары, заливах Чертугеевка и Якоби – пробы поверхностных вод. Для пробоотбора использован батометр Ocean Test 110А.

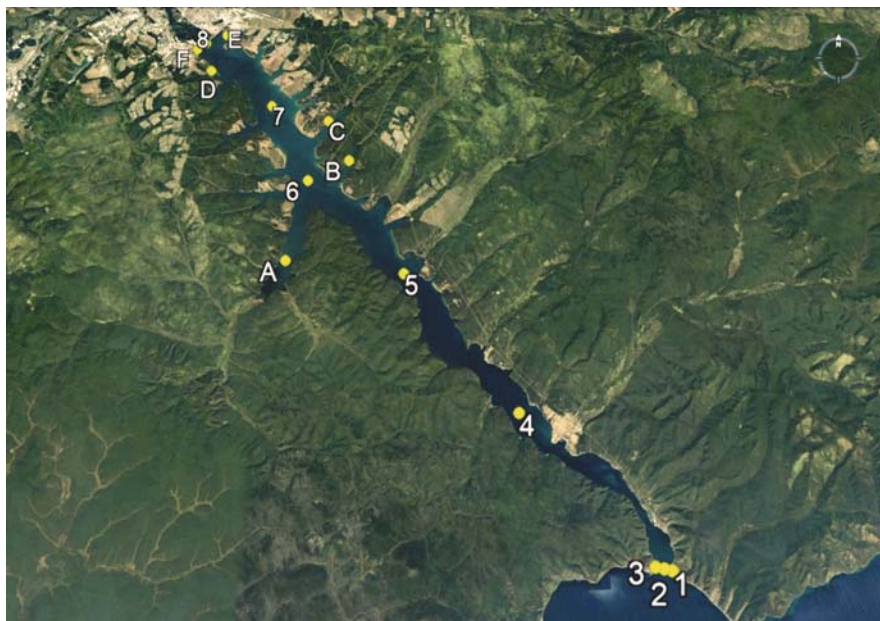


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб воды Иркутского водохранилища:

- 1 – Исток правый берег; 2 – исток середина; 3 – исток левый берег; 4 – русловая часть напротив д. Большая Речка; 5 – русловая часть напротив залива Бурдугуз; 6 – русловая часть напротив залива Курма; 7 – русловая часть напротив д. Мельничная падь; 8 – плотина ГЭС.
А – залив Курма; В – залив Уладова; С – залив Еловый; D – залив Ершовский; E – залив Чертугеевский; G – залив Якоби

Пробы воды проанализированы на оборудовании ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН (г. Иркутск). Используются следующие методы анализа: атомно-абсорбционная спектрометрия (ПНД Ф 14.1.2:4.137-98) для определения концентраций магния и кальция; пламенно-эмиссионная спектрометрия (ПНД Ф 14.1.2:4.138-98) – концентраций натрия и калия; меркурический (ПНД Ф 14.1.2.111-97) – хлорид-ионов; турбидиметрический (ПНД Ф 14.1.2. 159–2000) – сульфат-ионов; определение свободной и общей щелочности с последующим расчетом массовых концентраций гидрокарбонат-ионов (ГОСТ 31957-2012 (А.2)).

Результаты и обсуждение

В табл. представлены статистические данные по концентрации HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ в воде Иркутского водохранилища. Результаты химического анализа вод показывают, что наибольшая амплитуда колебаний наблюдается для Cl^- и SO_4^{2-} . Коэффициент вариации (C_v) показал незначительную изменчивость (<10 %) для концентраций HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ и среднюю изменчивость (>10 %) для концентраций SO_4^{2-} .

Таблица

Статистические и литературные данные по концентрации основных ионов в воде Иркутского водохранилища, истока р. Ангары и оз. Байкал

Пункты		Основные ионы						Литература	
		HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+		Na^+
Исток р. Ангары		67,00	4,37	1,11	15,6	3,10	0,99	3,40	Настоящее исследование
Иркутское вдхр.	среднее	66,36	4,96	1,08	15,19	3,14	0,97	3,06	
	минимум	50,40	4,37	0,83	11,7	3,10	0,71	2,70	
	максимум	69,60	7,48	1,22	16,3	3,4	1,03	3,50	
	коэф. вариации	5,66	12,71	7,73	5,53	2,50	6,42	9,28	
оз. Байкал		65,05	5,34	0,46	16,02	3,03	0,96	3,36	[2]
Исток р. Ангары		65,59	5,61	0,45	16,2	3,06	0,98	3,41	
Исток р. Ангары (до зарегулирования)		63,30	5,10	0,90	15,3	3,40	3,00–4,90		[5]
Исток р. Ангары		65,40	5,97	0,87	16	2,90	4,50		[7]
Иркутское вдхр.		61,90	6,00	10,90	19,2	8,50	1,60		[3]

В воде Иркутского водохранилища преобладающим анионом является HCO_3^- , составляющий 89 % от общего количества анионов, катионом – Ca^{2+} , составляющий 63 % от общего количества катионов. По химическому составу вода водохранилища относится к гидрокарбонатному классу – группе кальция. Минерализация воды, изменяющаяся от 78,5 до 100,6 мг/л, в среднем составляет 95,5 мг/л.

На рис. 2 показано распределение основных ионов по длине русловой части водохранилища от истока р. Ангары до плотины Иркутской ГЭС. На большинстве станций отбора проб концентрации в поверхностной и придонной воде

близки между собой, принципиальных различий не выделяется. Вместе с этим концентрация хлорид-иона на станции напротив д. Мельничная падь (45 км), концентрации ионов кальция, калия и гидрокарбонат-ионов на станции напротив залива Курма (35 км) в придонной воде выше, чем в поверхностной. И напротив, концентрации сульфатов в поверхностной воде станции напротив залива Курма выше, чем в придонной.

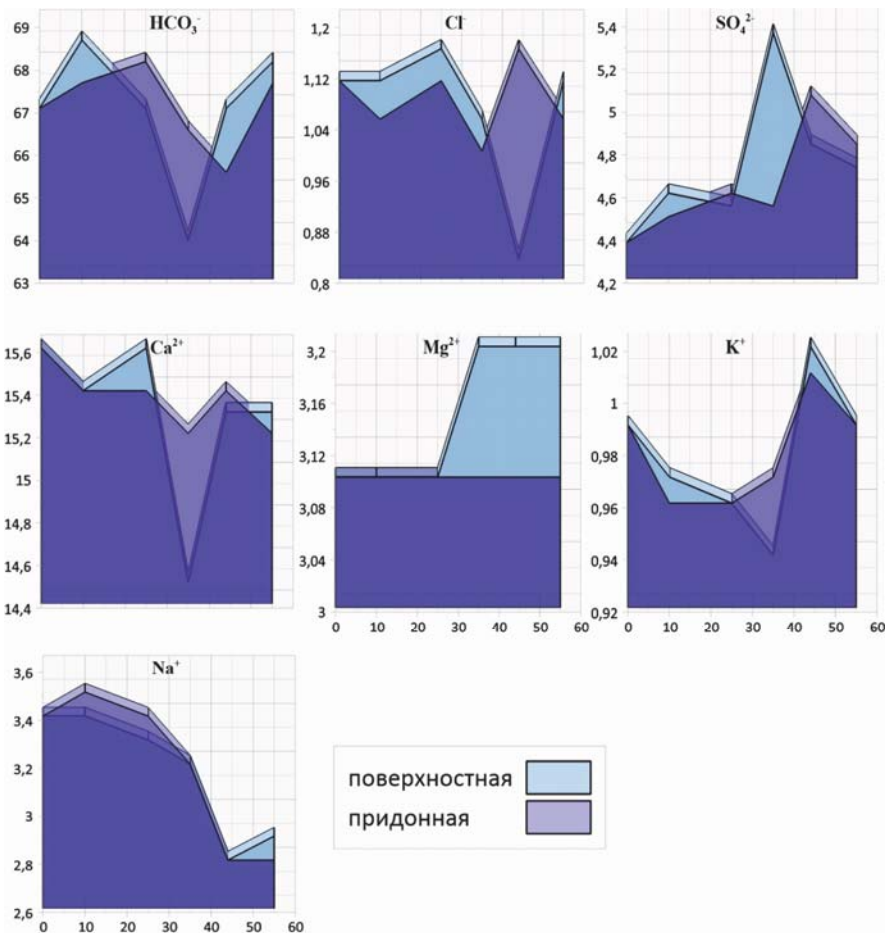


Рис. 2. Концентрации (мг/л) основных ионов в воде Иркутского водохранилища

Возможную трансформацию гидрохимического состава, проходящую в пределах водоема, могут показать различия между концентрациями элементов во входном створе водохранилища и верхнем бьефе плотины ГЭС. Разница

между концентрациями основных ионов в истоке р. Ангары и у плотины Иркутской ГЭС небольшая: для Ca^{2+} 0,3 мг/л, Mg^{2+} 0,1 мг/л, HCO_3^- (1,1 мг/л). Концентрации K^+ и Cl^- равны между собой. Только для Na^+ наблюдается видимое уменьшение концентраций с 3,4 до 2,9 мг/л, а для SO_4^{2-} увеличение концентраций с 4,37 до 4,83 мг/л.

Результаты исследования показывают, что максимальные концентрации большинства основных ионов фиксируются в устьевых частях заливов: Cl^- 1,22 мг/дм³ – в зал. Уладова, а SO_4^{2-} (7,48 мг/дм³) – в зал. Курма. М. Д. Николаева (1964) считает, что на гидрохимический состав заливов оказывают влияние выпадающие реки [5]. Помимо этого повышение в заливах концентраций основных ионов, а особенно сульфат- и хлорид-ионов, которые относятся к основным антропогенным компонентам, возможно в следствие поступления хозяйственного-бытового стока от поселков, расположенных в прибрежной зоне. Необходимо отметить, что выделенные станции с повышенными концентрациями Cl^- и SO_4^{2-} расположены напротив наиболее эксплуатируемых частей побережья Иркутского водохранилища

В табл. показано сравнение полученных в 2021 г. результатов химического состава вод Иркутского водохранилища с литературными данными, отражающими гидрохимию Иркутского водохранилища в 2013 г. и оз. Байкал. Отдельно выделен исток р. Ангары, так как считается, что состав его вод отражает сток всего оз. Байкал. Сравнение показывает близость концентраций HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ во всех водных объектах. Только концентрации Cl^- (1,11 мг/л) в воде истоке р. Ангары выше, чем в озере (0,46 мг/дм³ [2]). Сходные результаты получены в истоке реки до ее зарегулирования плотиной Иркутской ГЭС (Николаева, 1964). В воде Иркутского водохранилища среднее значение концентраций Cl^- , составляющие 1,08 мг/л, также в 2 раза выше, чем в воде оз. Байкал. Еще более высокие концентрации Cl^- (в 10 раз выше) получены для вод Иркутского водохранилища Г. А. Карнаухова (2013). В период настоящего исследования как в водах русловой части, так и заливах Иркутского водохранилища, таких концентраций ионов хлора обнаружено не было.

Небольшие вариации концентраций основных ионов в пределах всего Иркутского водохранилища определяются, в первую очередь, интенсивностью его водообмена. О. М. Кожова [4] отмечает, что за второй год существования водохранилища (1957) вода в водохранилище сменилась 87 раз, в 1958 г. – 30 раз. Со второй половины 1959 г. интенсивность водообмена стабилизировалась, сменяясь около 24 раза/год или более 2 раз/месяц. Такая особенность гидрологического режима, а также близкие концентрации основных ионов в воде всей акватории Иркутского водохранилища и оз. Байкал определяют, что сток озера, в воде которого концентрации гидрокарбонатов, сульфатов, хлоридов, кальция, магния, натрия и калия стабильны в межгодовом аспекте [2], является основным фактором, влияющим на гидрохимию Иркутского водохранилища. Увеличение концентраций основных ионов в воде устьевых частях заливов анонсирует работы по более углубленному изучению гидрохимического состава на участках, приуроченных к местам интенсивного освоения прибрежных территорий.

Список литературы

1. Алевкин О. А. Основы гидрохимии. Л. : Гидромет. изд-во, 1970. 444 с.
2. Ионный состав воды озера Байкал, его притоков и истока реки Ангара в современный период / В. М. Домышева, Л. М. Сорокичкина, В. Н. Синюкович [и др.] // Метеорология и гидрология. 2019. № 10. С. 77–86.
3. Карнаухова Г. А. Изменение гидрохимического состава воды в процессе эксплуатации Иркутского водохранилища // Метеорология и гидрология. 2018. № 7. С. 87–96.
4. Кожова О. М. Общая физико-географическая характеристика Иркутского водохранилища // Биология Иркутского водохранилища. Новосибирск : Наука, 1964. С. 3–16.
5. Николаева М. Д. К гидрохимии Иркутского водохранилища // Биология Иркутского водохранилища. Новосибирск : Наука, 1964. С. 17–40.
6. Влияние антропогенных факторов на водные экосистемы / П. Я. Пукало, А. В. Базаева, А. В. Беспалый, М. А. Панчишный // Животноводство и ветеринарная медицина. 2020. № 3 (38). С. 33–36.
7. The cyclicity in the changes in the chemical composition of the water source of the Angara River (Baikal Stock) in 2017–2018 in comparison with the last 20 years of data / V. I. Grebenshchikova, M. I. Kuzmin, A. A. Doroshkov [et al.] // Environmental Monitoring and Assessment. 2019. N 191. Art. 728. DOI: 10.1007/s10661–019–7888-z
8. Hydrochemical Characteristics and Human Health Risk Assessment of Surface Water in the Danjiang River Source Basin of the Middle Route of China's South-to-North Water Transfer Project / L. Lin, Y. Zhang, X. Qian, Y. Wang // Water. 2023. N 15 (12). DOI: 10.3390/w15122203

УДК 556.542(282.256.341.5)

Гидроморфологический мониторинг русловой сети дельты р. Селенги

Ю. И. Шкимелис (jcract@mail.ru)¹, Е. А. Ильичёва (lenail3663@mail.ru)^{1,2},
М. В. Павлов (maksimpavlov_v@mail.ru)², А. А. Ушкалов (lolitamen@mail.ru)^{1,2},
С. Х. Габриелян (imperator.gs24@mail.ru)¹

¹Иркутский государственный университет, г. Иркутск

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

Аннотация. Представлены результаты гидролого-геоморфологических исследований в основных магистральных рукавах дельты р. Селенги за полевой сезон 2023 г. и проведен сравнительный анализ с данными прошлых лет. Исследовался сток воды и наносов, состав руслоформирующих наносов и пойменных отложений, динамика берегов основных рукавов и озерного края дельты в условиях повышенной водности. Дана оценка распределения стока по рукавам дельты и невязка баланса стока, объясняющаяся выходом вод на поймы и береговым регулированием. Гидрометрические работы проводились на морфостворах с географической и высотной привязкой, организованных в 2003 г., что позволяет вести продолжительный ряд мониторинговых исследований динамики планового и вертикального изменения русел, эрозионно-аккумулятивных процессов, с оценкой скоростей и направленности развития субэаральной дельты и ее озерного края, включая блокирующие бары. Исследования носят, как фундаментальный, так и прикладной характер: взаимодействие текучих вод с подстилающей поверхностью, в условиях системы «река – озеро», для рационального природопользования дельтовых равнин.

Ключевые слова: Селенга, расход воды, динамика озерного края, дельта, устьевая система, мониторинг.

Введение

Мониторинговые гидролого-морфологические исследования в устьевой области р. Селенги проводятся сотрудниками лаборатории гидрологии и климатологии Института географии им. В. Б. Сочавы под руководством Е. А. Ильичевой с 2003 г. Гидрометрическая сеть Росгидромета охватывает низовья крупных и некоторых средних притоков Байкала, уровенные посты часто удалены от устьев рек. Наблюдения проводятся вне зоны совместного воздействия принимающего водоема и реки и не дают полноценной информации о динамике специфических гидрологических процессов, протекающих в устьевых областях. В настоящее время наблюдения за устьевыми процессами ведутся в основном эпизодически, в рамках научно-исследовательских программ и грантов. Ввиду отсутствия постоянных наблюдений за устьевыми процессами на побережье Байкала, получаемые данные по дельте р. Селенги и некоторых других притоков носят уникальный характер и могут сравниться с работами, проводимыми на устьевых станциях крупных рек, впадающих в моря, организованными в советский этап исследований. Основная цель настоящей работы заключается в продлении рядов гидрометрических данных и выявлении динамики развития русловых процессов под влиянием внешних гидроклиматических и техногенных факторов: многоводный период и регулирование уровня Байкала. В работе представлены материалы по распределению стока воды и наносов по семи основным рукавам дельты р. Селенги за июль 2023 г. в сравнении с предыдущими наблюдениями. Также дана оценка динамики озерного края дельты и представлены материалы по условой морфодинамике.

Материалы и методы исследований

Исследование проводилось в июле 2023 г. Гидрометрические работы выполнялись на организованных ранее морфостворах в основных рукавах дельты р. Селенги. Измерения скоростей потоков проведены ИСВП-ГР-21м, глубины измерялись с помощью карт-плоттера Lowrance, с возможностями географической привязки точек и профилей, а также построением моделей рельефа дна. Высотная привязка уровенных наблюдений произведена нивелирование IV класса. Картографические построения и расчеты выполнены в ГИС-пакете Q-GIS. Расчеты морфологических параметров дельты выполнялись по методике В. Н. Михайлова [4]. Отбор проб взвешенных наносов производился с помощью погружного насоса, обработка выполнялась по методике потерь при прокаливании. Отбор образцов наносов активного слоя осуществлялся дночерпателем-драгой, обработка проведена ситовым методом [3]. Классификация руслообразующих наносов выполнена по Р. С. Чалову [5]. Гидрометданные взяты с сайта <https://gmvo.skniivh.ru> – Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов [1].

Результаты

Береговая линия отражает стабильный уровенный режим маловодного периода с 2001 по 2018 г. (рис. 1). Средний уровень Байкала (ос. пгт Бабушкин) в 2011 г. составлял 455,92 м (БС), для этого периода характерен и низкий сток

р. Селенги – 547 м³/с по посту разъезд Мостовой при среднем за период наблюдений -890 м³/с. Рассматриваемый 2023 г. характеризуется как многоводный, среднегодовой расход воды р. Селенги превышает 1200 м³/с, данные по уровню Байкала в настоящее время недоступны в онлайн-сервисах, средний уровень воды в Байкале в 2021 г. составил 456,16. Рассматриваемый период показал существенное выдвигание дельты, особенно в центральной части, что возможно, обусловлено заполнением речными наносами мелководных заливов (соров) и фитогенным органическим осадком. Выдвигание дельты в заливы Провал и Черкалов Сор менее значимы, но тем не менее составляет десятки и сотни метров. Не смотря на выдвигание приустьевых форм рельефа, в 2023 г. отмечалось значительное ее затопление, как со стороны озера, так и затопление высоких (до 3 м) пойм по всей дельте. Важно отметить, что положительная морфодинамика дельты не прекращается в многоводный период, и более того, выдвиганию сопутствует приращение абсолютных отметок субаэральной дельты, за счет увеличения стока наносов, как минеральной, так и органической частей, прироста фитомассы в вегетационный период.

В табл. 1 представлены результаты расчетов коэффициентов развития дельты в различные годы, более, чем за 100 лет.

Таблица

Динамика морфометрии дельты р. Селенги [2]

Год	В, км	L мк, км	L ог, км	F _{вд} , км ²	F д, км ²	K	N
1908	34,9	119,5	60,1	478,1	483,2	1,99	1,01
1956	36,9	126,3	60,4	534,4	512,5	2,09	0,96
1986	38,2	132,3	61,1	572,8	514,8	2,17	0,90
1998	38,4	189,5	59,6	578,8	451,3	3,18	0,78
2007	38	159,9	60,5	566,8	471,5	2,64	0,83
2011	38,3	161,8	59,8	575,8	453,5	2,71	0,79
2023*	38,6	178,8	61,8	585,7	493,0	2,89	0,84

*Примечание: * – расчеты проведены по материалам ДЗЗ. Пояснения: В – ширина, выдвинутой части дельты; L_{ок} – длина озерного края дельты; L_{ог} – длина огибающей береговой линии дельты; F_{вд} – площадь сопряженного полукруга, построенного по ширине дельты; F д, км² – площадь дельты, выдвинутой за генеральную линию берега; K – коэффициент изрезанности; N – коэффициент выдвинутой дельты (по В. Н. Михайлову [4]).*

Рассматриваемый 2023 г. характеризуется повышенной водностью, расход воды в вершине дельты превысил ранее нами наблюдаемый и составил 3618 м³/с и сток наносов в вершине дельты – 212 кг/с в сравнении с измеренными в предыдущие годы от 12 до 64 кг/с. Результаты обработки гидрометрических измерений, лабораторных исследований приведены в табл. 2 и рис. 2.

Наименьшие значения мутности речных вод отмечаются в руслах протоков Среднеустьевского сектора и составляют – 0,01–0,03 г/л и наименьший сток наносов – 1–2 кг/с, что свидетельствует о низкой эрозионной деятельности. Наиболее активизированы протоки Левобережная, Лобановская, Казанова. Многие устьевые процесс и механизмы дельтоформирования, наблюдаемые в данный сезон, обусловлены выходом воды на поймы, береговыми и русловыми деформациями, сложным взаимодействием с грунтовыми водами (рис. 3).

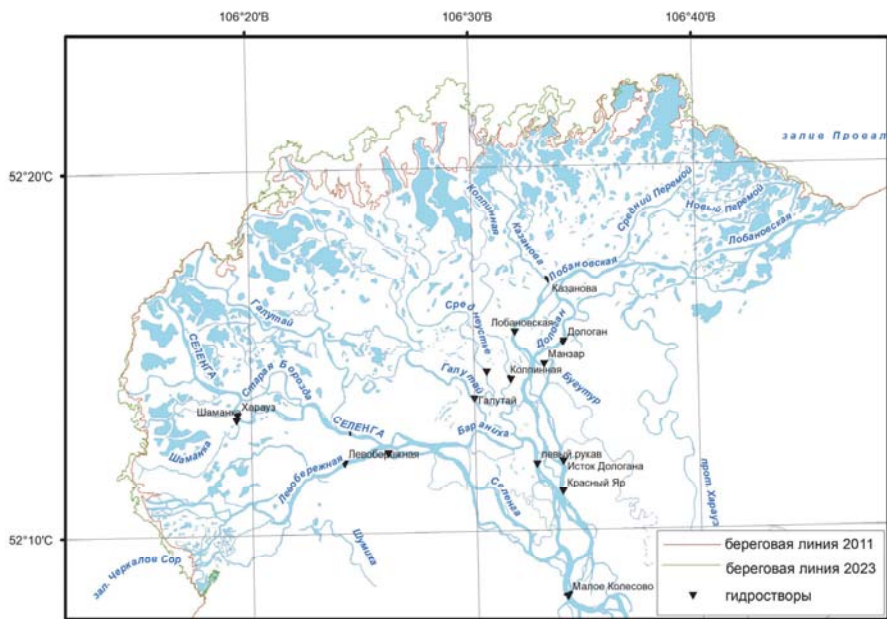


Рис. 1. Расположение гидрофторов и положение береговой линии дельты за разные годы

Таблица 2

Основные морфометрические параметры и расходы воды

Морфоствор	V , м/с	B , м	H , м	ω , м ²	Q , м ³ /с	ρ , г/дм ³	R , кг/с	Распределение водного стока по секторам дельты	
								сектор	%
ВД	2,1	407,0	4,2	1723,0	3618,2	0,058817	212,81	3618,2	100,0
Харауз	0,9	158,0	3,3	525,1	457,8	0,066476	30,43	1066,7	29,5
Левобережная	1,0	224,0	2,6	585,7	608,9	0,086942	52,94		
Галутай	1,5	140,0	2,5	356,7	523,1	0,047966	25,09	666,3	18,4
Среднеустье	0,9	60,0	1,5	89,0	79,5	0,013116	1,04		
Колпинная	0,9	55,0	1,3	69,8	63,6	0,031565	2,01		
Казанова	1,0	88,5	2,8	246,4	256,7	0,103478	26,56	883,0	24,4
Лобановская	1,1	126,0	2,5	316,5	363,9	0,104124	37,89		
Дологан	1,3	184,0	2,3	414,3	519,1	0,047119	24,46		
Невязка, м ³ /с					1002,3				27,7

Как и ранее, выявлена невязка стока, более 25 %. Выход воды из русел и заполнение пониженных участков пойменных комплексов и подстилающих почвогрунтов до полной влагоемкости создают невозможность учета стока через современную устьевую область р.Селенги в Байкал традиционными методами измерений. Для оценки стока в устьевых областях необходимо рассматривать привлечение методов по исследованию берегового регулирования стока.

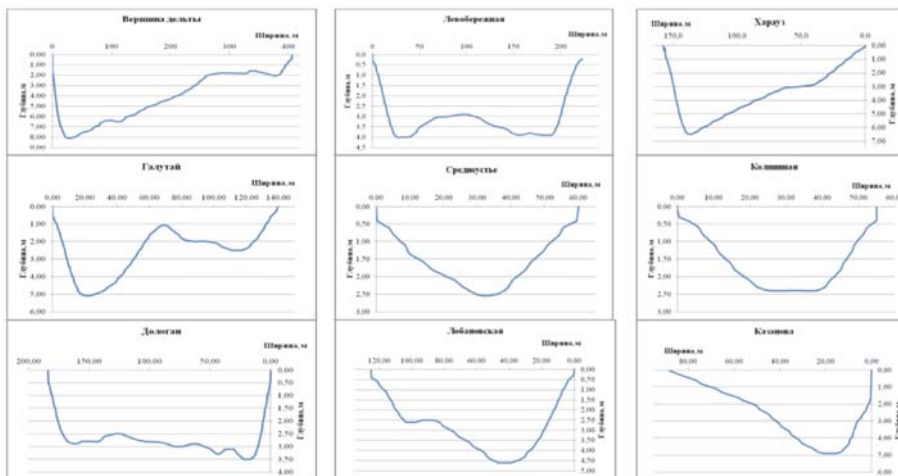


Рис. 2. Поперечные профили морфостворов в бровках русла (июль 2023 г.)

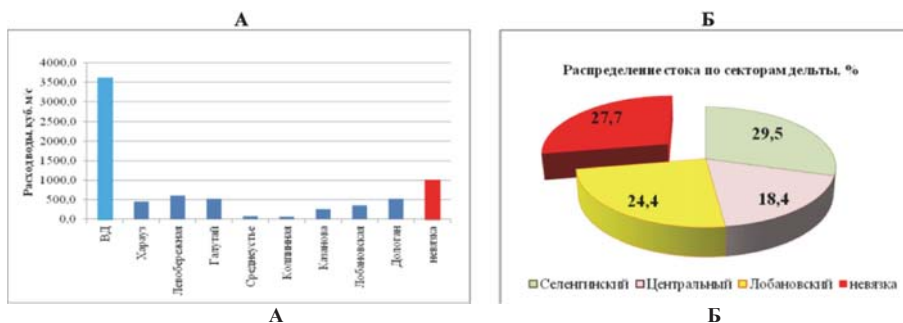


Рис. 3. Распределение стока по основным рукавам (А) и секторам дельты р. Селенги (Б)

Протоки разветвленной устьевой системы р. Селенги имеют уклоны от 2–4° (падение составляет от 3 до 6 м/км) и относятся к потокам (рекам) равнинного типа, чем и обусловлено формирование илесто-песчаных русловых фаций непосредственно при впадении в Байкал и более грубого материала в вершине дельты (табл. 3). В целом фациальный состав донных отложений меняется от перстративной стадии руслоформирующих наносов в вершине дельты к констративной стадии в устьях. При анализе результатов гранулометрического исследования состава аллювия выявлено, что донные наносы в вершине состоят из гравия (гравелистых частиц >50 %) и гальки средней и мелкой размерности в вершине, а также мелко-среднезернистого песка (частиц фракции 0,5–0,1 мм >90 %, преобладает фракция 0,25–0,1 мм) к устьям. Также отмечается стадия врезания в протоках Галутай, Колпинная, Дологан когда в отложениях появляется галька до 38 %

Таблица 3

Руслоформирующие наносы

Место отбора проб донных наносов / размер фракции	Содержание фракции, %								
	>10 мм	5	2	1	0,5	0,25	0,1	<0,1	Сумма
Селенга ВД	18,17	26,63	31,98	12,84	4,47	4,09	1,80	0,00	100,00
Харауз	0,99	0,00	0,11	0,33	1,86	30,78	65,30	0,63	100,00
Левобережная	1,68	11,51	27,18	11,41	9,74	17,79	20,63	0,06	100,00
Галугай	38,10	37,36	18,77	1,87	0,88	1,23	1,76	0,02	100,00
Среднеустье	0,00	1,03	0,95	0,81	0,82	27,97	67,85	0,58	100,00
Колпинная	12,51	18,81	25,35	6,12	3,47	26,79	6,94	0,01	100,00
Лобановская	0,00	0,24	0,23	0,10	0,12	49,42	49,78	0,11	100,00
Казанова	0,22	0,54	0,19	0,31	0,86	43,26	54,41	0,22	100,00
Дологан	8,66	6,92	14,84	11,77	11,90	37,84	8,06	0,02	100,00

Заключение

Проведенные исследования дополняют ряды экспериментальных данных о развитии устьевой системы р. Селенги, имеющих научно-прикладную ценность, как для решения фундаментальных проблем, так и задач территориального планирования.

Выявлено, что развитие дельты в многоводный период в плане ее выдвижения в акваторию Байкала происходит значительно быстрее, чем в период маловодий. Невязка баланса распределения стока в дельте обусловлена невозможностью измерений стока, что требует разработки новых методов исследований берегового регулирования в устьевых системах.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГ СО РАН им. В. Б. Сочавы (№ государственной регистрации АААА-А21-121012190059-5.

Список литературы

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 10.11.2023).
2. Ильичева Е. А., Павлов М. В., Андреев Ф. М. Морфодинамика устьевых систем южной котловины Байкала // Географические основы и экологические принципы региональной политики природопользования : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти члена-корреспондента РАН А. Н. Антипова. Иркутск : Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2019. С. 110–114.
3. Методические указания управлениям гидрометслужбы № 85. Изучение гранулометрического состава донных отложений рек. Л. : Гидрометиздат, 1974. 30 с.
4. Михайлов В. Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М. : ГЕОС, 1997. 176 с.
5. Чалов Р. С. Русловые исследования (Избранные главы по курсу «Водно-технические изыскания») : учеб. пособие. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1995. 58 с.



СЕКЦИЯ

**ПОГОДА И КЛИМАТ.
МОНИТОРИНГ
И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ**



УДК 551.583(571.53)

Пространственно-временные особенности температурного режима в Иркутской области в современный климатический период

С. Ж. Вологжина (svologzhina@gmail.com), А. В. Гекова (gekova00@bk.ru),
И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru), К. А. Лощенко (loshchenko@bk.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Статья посвящена изучению климатического режима территории Иркутской области в современный климатический период (1991–2020 гг.) в сравнении с предшествующим (1961–1990 гг.). На основе данных метеорологических станций впервые выполнено картирование территории по среднегодовым значениям температуры воздуха и температуры поверхности почвы. Проанализированы межгодовые вариации температур и выявлены сезонные и пространственные особенности температурного режима, которые характеризуются преобладающими тенденциями роста температур. Проведен статистический анализ интенсивности городского острова тепла на примере станций Иркутск и Хомутово и термического влияния оз. Байкал на побережье по данным станций Исток Ангары и Хомутово. Полученные результаты имеют важное практическое значение для проведения климатических исследований в Иркутской области.

Ключевые слова: климат, температура почвы, температура воздуха, годовые амплитуды температуры, зональность, Иркутская область.

Введение

Современный климат характеризуется высокими темпами изменений, как в глобальном, так и региональном масштабах. Введение в научную литературу термина «климат», который дословно означает «наклонение, наклон», восходит ко II в. до н. э.. Так назвал древнегреческий астроном Гиппарх из Никеи (190–120 гг. до н. э.) каждую из пяти зон, на которые он разделил Землю. Представления Гиппарха господствовали вплоть до начала XIX в., пока А. Гумбольдт (1769–1859) в своем труде «Космос» не дал новое определение, которое учитывало влияние океана и суши. В последующем в трудах Докучаева, Кеппена, Алисова, Дроздова, Рубинштейна и др. была развита и детализирована теория широтной и вертикальной климатической зональности поверхности суши, были разработаны типизации, появились многочисленные климатические карты для различных регионов и сезонов года [4].

В современной трактовке под климатом понимают «статистический ансамбль состояний, проходимых климатической системой за достаточно длительные промежутки времени» [5]. Принято различать внешние и внутренние климатообразующие факторы. Среди внешних климатообразующих факторов особое значение имеют астрономические факторы, среди которых выделяют светимость Солнца, т. е. интегральный во всем диапазоне электромагнитных волн солнечного спектра поток энергии; положение и движение Земли в Солнечной системе, наклон ее оси вращения к плоскости орбиты и скорость вращения. Ука-

занные факторы определяют инсоляцию Земли и колебания инсоляции на внешней границе атмосферы, обусловленные гравитационным воздействием планет Солнечной системы (теория Миланковича). Геофизические факторы связаны со свойствами Земли как планеты. К этим факторам относятся размеры и масса планеты, скорость вращения вокруг оси, собственные гравитационное и магнитное поля, внутренние источники тепла, свойства поверхности, определяющие ее взаимодействие с атмосферой [6].

Наряду с радиационным режимом формирование климатического режима тесно связано с внутренними климатообразующими факторами, среди которых принято выделять циркуляционные и орографические факторы. Вследствие радиационного нагрева, потоков явного и скрытого тепла в атмосфере формируется циркуляция, имеющая характерные географические и сезонные особенности. Деятельный слой суши играет подчиненную роль по отношению к другим компонентам климатической системы. Так как его теплоемкость мала, изменения температуры в слое происходят синхронно с изменениями температуры атмосферы. От скорости вращения Земли зависят суточные колебания метеорологических параметров, характер циркуляции атмосферы (режим Гадлера в тропиках, Россби – в умеренных широтах), геострофичность поля скорости. Подстилающая поверхность обменивается с атмосферой теплом, влагой и импульсом.

Главными метеорологическими климатообразующими факторами являются масса и химический состав атмосферы. Очень важным является вопрос о чувствительности климатической системы к малым изменениям внешних факторов. В такой сложной системе, какой является климат, действие внешних факторов может усиливаться или ослабляться обратными связями.

Вариации климатических характеристик по длительности можно разделить на четыре группы: короткие (от года до десятков лет), внутривековые и межвековые (от десятков и сотен лет до нескольких тысяч лет), долгопериодные (от десятков до сотен тысяч лет) и геологические (сотни тысяч и миллионы лет). В программе CLIVAR, являющейся основным компонентом Всемирной программы исследований климата, в качестве одного из основных объектов исследований названа климатическая изменчивость, соответствующая трем интервалам времени: от сезона до года; от года до десятилетия; от десятилетия до столетия [7].

Оценки косвенных данных и данных прямых наблюдений показали, что в XX столетии глобальная ТВП увеличилась на $0,6 \pm 0,2$ °C, величина потепления оказалась больше, чем в любое столетие прошедшего тысячелетия. В связи с тем, что рост температуры был зафиксирован в большинстве районов земного шара, это явление получило название «Глобального потепления». Осознание серьезности этого явления и его потенциальной опасности привело к учреждению Всемирной климатической программы, организации Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) и принятию Рамочной конвенции по изменению климата в ООН [9].

Положительный тренд средней годовой температуры в основном обусловлен трендом температуры в холодное полугодие, летняя температура менялась незначительно. Частично это можно объяснить увеличением количества облачности в последние десятилетия. По данным МГЭИК потепление над континентами в средних широтах Северного полушария характеризовалось в основном повышением минимальных температур в ночное время. При этом наиболее высокими были темпы роста температуры над подстилающей поверхностью. В тропосфере наибольший прирост температуры наблюдался на уровне 850 гПа (более 1 °C за столетие). Вблизи тропопаузы температуры не менялись, а в стратосфере понижались [2].

Потепление регистрируется практически во всех регионах России. За столетие рост температуры в России в целом составил около 1 °C, при этом температура росла зимой и весной, но почти не менялась осенью. Изменения средней по России температуры воздуха неплохо согласовались с изменениями глобальной температуры, но имелись и различия. В частности, все экстремумы глобальной температуры были выражены более четко, чем экстремумы в изменении средней температуры по России. Размах вариаций средней годовой температуры на территории России достигал 3–4 °C, тогда как в среднем для земного шара амплитуда вариаций была чуть больше 1 °C [3].

Исследование климатического режима Сибири проводилось как по данным непосредственных наблюдений на станциях, так и на основе архивной базы Реанализов. Расчеты показали высокие темпы потепления на всей территории Сибири во второй половине столетия (более 0,2 °C/10 лет), а в отдельных районах Восточной Сибири величины линейного тренда достигали 0,5 °C/10 лет, в основном, за счет повышения зимних температур [8].

Объект исследования

Иркутская область, которую часто называют Приангарьем или Прибайкальем (Предбайкальем), находится на юге Восточной Сибири, фактически в центре азиатского материка, в непосредственной близости к континентальным центрам действия атмосферы – Азиатскому антициклону и Центрально-Азиатской депрессии, оказывающим влияние на формирование погодных и климатических условий соответственно в холодный (октябрь-март) и теплый (апрель-сентябрь) периоды года.

Наряду с приходом солнечной радиации важным климатообразующим фактором является рельеф земной поверхности, который в Иркутской области сложен и многообразен благодаря неоднородностям геологического строения, проявляющимся в преобладании различных видов плато с подчиненным участием равнинного, низкогорного и плоскогорного рельефа. На фоне широтной зональности в распределении климатических величин, обусловленной различиями приходящей солнечной радиации, сочетание приподнятых и пониженных участков рельефа территории Иркутской области сказывается в проявлении мозаичной структуры климата [1].

Результаты исследования

Распределение температуры воздуха и почвы по земному шару зависит от общих условий притока солнечной радиации по широтам (влияние широты местности), от распределения суши и моря, которые по-разному поглощают радиацию и по-разному нагреваются (влияние подстилающей поверхности), и от воздушных течений, переносящих воздух из одних областей в другие (влияние циркуляции атмосферы) [10].

В современный климатический период (1991–2020 гг.) по данным 63 метеорологических станций порядка 57 % станций, расположенных преимущественно в северных, верхнеленских и высокогорных районах, имеют отрицательную среднюю годовую температуру поверхности почвы, на 43 % станций, расположенных в западных, южных районах области и на побережье оз. Байкал, средняя годовая температура положительная. В пространственном отношении выделяется зональность в распределении средних годовых температур поверхности почвы, которая характеризуется ее повышением от $-8,3^{\circ}\text{C}$ на севере (Наканно) до $2,8^{\circ}\text{C}$ на юге (Хужир), хотя, частично нарушается понижением температур в высокогорных районах Восточного Саяна ($-3,0^{\circ}\text{C}$) и Хамар-Дабана ($-4,4^{\circ}\text{C}$) (рис. 1).

В течение года минимальные температуры поверхности почвы в Иркутской области отмечаются в январе за счет низкого прихода солнечной радиации и высокой отражательной способности снежного покрова на фоне господствующего влияния Азиатского антициклона (рис. 2). С мая по сентябрь средняя температура поверхности почвы на всей территории области становится положительной, достигая максимума в июле, на фоне высоких значений прямой и рассеянной солнечной радиации.

Годовая амплитуда температуры поверхности почвы, которая определяется разностью средних температур самого холодного месяца (январь) и самого теплого (июль) изменяется от 37°C на ст. Алыгджер, подверженной отепляющему влиянию фенового эффекта в предгорьях Восточного Саяна, и на метеорологических станциях Большой Ушканий и Исток Ангары, где сказывается отепляющее влияние оз. Байкал в холодный период года и охлаждающее в теплый. Максимальные перепады температур между зимним минимумом и летним максимумом отмечаются на северных станциях Наканно и Ербогачен ($55\text{--}57^{\circ}\text{C}$).

Исследование температурного режима приземного слоя атмосферы на территории Иркутской области в период современной климатической нормы (1991–2020 гг.) было выполнено по данным 64 метеорологических станций. На большинстве из них (78 %) средняя годовая температура воздуха отрицательная. В целом по территории области она варьирует от $-7,3^{\circ}\text{C}$ на самой северной станции Наканно до $1,4^{\circ}\text{C}$ на южной ст. Иркутск – самый крупный промышленный центр области, где дополнительно сказывается влияние городского острова тепла. По сравнению с близлежащей станцией Хомутово средняя годовая температура воздуха в Иркутске выше на $1,8^{\circ}\text{C}$. В распределении средней годовой температуры воздуха прослеживается зональность, которая нарушается локальными очагами холода в Качугском районе, локальными очагами тепла на побережье оз. Байкал и на подветренных склонах Восточного Саяна (рис. 3).

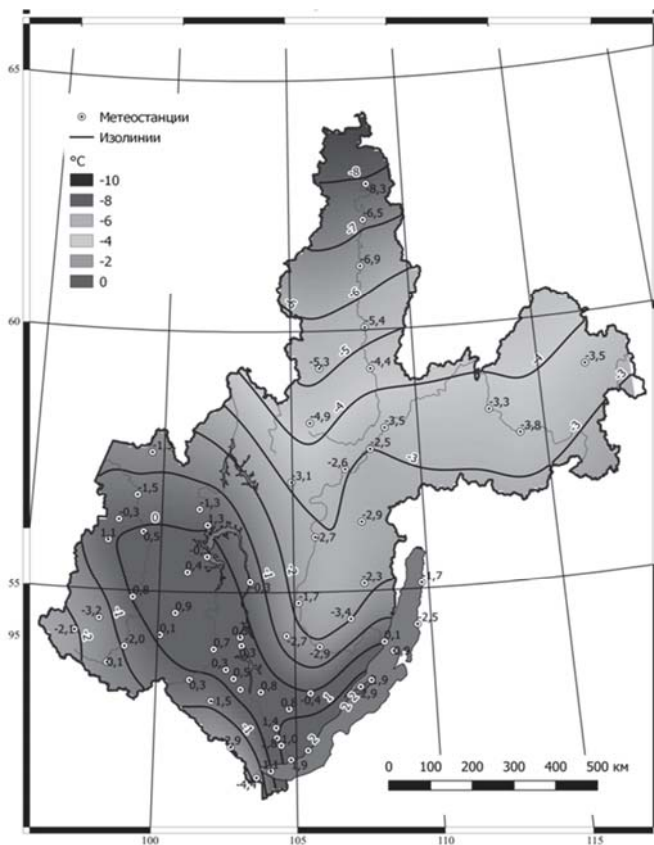


Рис. 1. Среднегодовые температуры поверхности почвы в Иркутской области по данным 63 метеорологических станций за 1991–2020 гг.

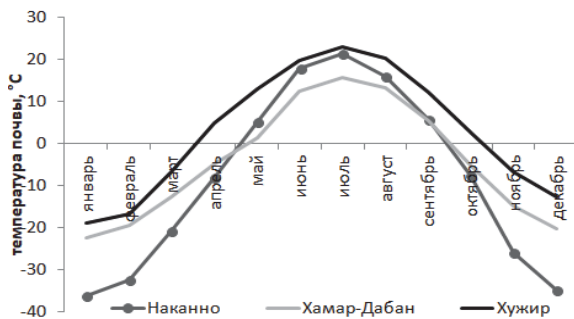


Рис.2. Годовой ход средней месячной температуры поверхности почвы на метеорологических станциях Иркутской области в 1991–2020 гг.

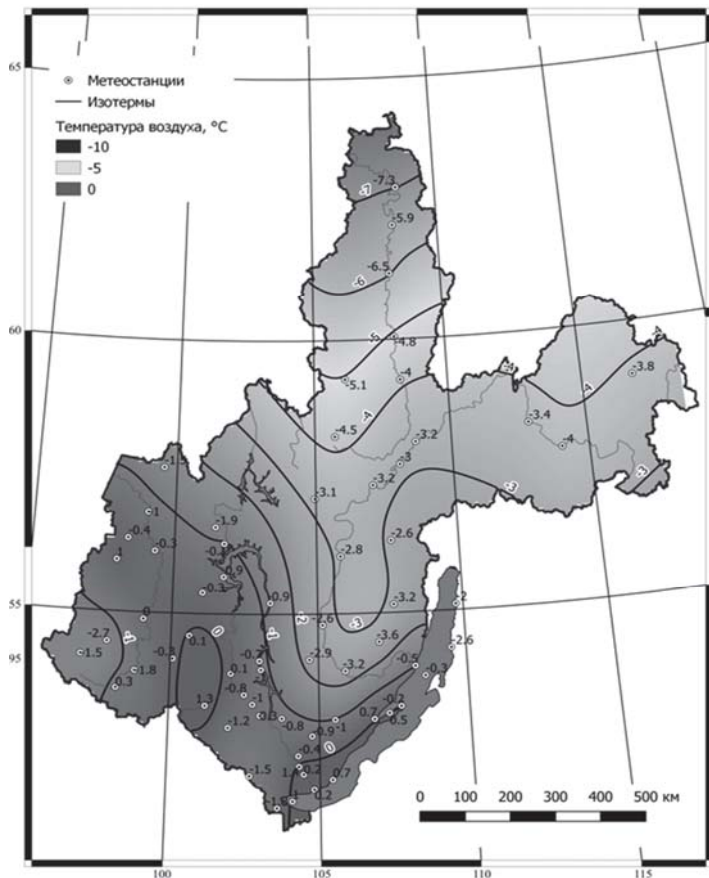


Рис. 3. Среднегодовые температуры воздуха в Иркутской области по данным 64 метеорологических станций за 1991–2020 гг.



Рис. 4. Средние значения разности температуры воздуха (°C) между метеорологическими станциями Иркутской области в 1991–2020 гг.

В пространственном отношении наибольшие горизонтальные градиенты температуры воздуха между северными и южными районами Иркутской области отмечаются зимой (15–17 °С), а наименьшие летом в июне и июле (1,5–2,0 °С). Годовые амплитуды температуры воздуха, характеризующие континентальность климата, варьируют в среднем от 30 °С на высокогорной станции Хамар-Дабан и байкальской ст. Исток Ангары до 50 °С на севере области (Наканно). В Иркутске они составляют в среднем 37 °С, что на 4 °С ниже, чем в Хомутово.

Интенсивность городского острова тепла в крупном промышленном центре – Иркутск, оцениваемая по разности температуры воздуха со ст. Хомутово, расположенной на удалении 25 км, достигает 4 °С в январе и феврале в период господствующего влияния Азиатского антициклона. В летние месяцы температурные контрасты сглаживаются (рис. 4). Отопляющее влияние оз. Байкал, оцениваемое по разности температур прибрежной станции Исток Ангары в юго-западной оконечности озера и внутриконтинентальной станции Хомутово, расположенной на удалении 77 км от побережья, сказывается в период с октября по март с наибольшими значениями (7 °С) в декабре и январе. Охлаждающее влияние озера на прибрежные байкальские станции сказывается с апреля по сентябрь, с наибольшими значениями (6 °С) в июне.

Абсолютный минимум температуры воздуха в Иркутской области изменялся от -61,7 °С на ст. Хамакар Катангского района (15 января 1966 г.) до -35,7 °С на байкальской станции Большой Ушканий. Абсолютный максимум варьировал от 42,8 °С на станции Выдрино-на-Чуне (28 июня 1979 г.) до 28,9 °С на байкальской станции Большой Ушканий. В Иркутске абсолютный максимум составил 37,2 °С 24 июля 1915 г., а абсолютный минимум -50,2 °С 12 января 1915 г. Таким образом, перепады температур на территории Иркутской области составили 104,5 °С.

Заключение

В распределении средней годовой температуры поверхности почвы на территории Иркутской области в современный климатический период (1991–2020 гг.) хорошо прослеживается зональность, обусловленная зональным характером распределения приходящих потоков коротковолновой солнечной радиации, на которую накладывается влияние неоднородного рельефа.

Средняя годовая температура поверхности почвы изменяется от -8,3 °С в крайних северных районах до 2,8 °С в средней части оз. Байкал, локально понижаясь до -3...-4 °С в высокогорных районах Восточного Саяна и Хамар-Дабана. Минимальные температуры поверхности почвы в Иркутской области приходятся на январь, а максимальные на июль.

Абсолютный максимум температуры поверхности почвы изменяется от 52 °С на высокогорной станции Хамар-Дабан до 70 °С в лесостепной зоне Усть-Ордынского Бурятского округа, а абсолютный минимум от -42 °С в южной и средней части оз. Байкал до -68 °С в крайних северных районах.

В современный климатический период (1991–2020 гг.) по сравнению с предшествующим (1961–1990 гг.) на территории Иркутской области во всех районах, кроме Качугского, средние температуры поверхности почвы возросли со скоростью от 0,1 °С за тридцатилетие на южной оконечности оз. Байкал до 1,7 °С в Черемховском районе.

В распределении средних температур воздуха по территории Иркутской области наряду с зональностью хорошо прослеживается региональность (секторность), которая обусловлена влиянием адвекции теплых и холодных воздушных масс при развитии циклонической деятельности на фоне неоднородного рельефа.

Значительную часть года (с сентября по апрель) самые низкие средние температуры воздуха отмечаются в крайних северных районах области (Наканно), с мая по июль на байкальской станции Большой Ушканий, в августе на высокогорной станции Хамар-Дабан. Самые высокие средние температуры в период с сентября по январь приходятся на байкальские станции (Большой Ушканий, Хужир и Байкальск), февраль и март – на высокогорные станции Восточного Саяна, апрель и май – Иркутск, летом – Усть-Уда и Тайшет. Отопляющее влияние оз. Байкал отчетливо проявляется в период с сентября по январь, а охлаждающее с мая по июль.

Большую часть года, с февраля по октябрь, в современный климатический период (1991–2020 гг.) по сравнению с предыдущим (1961–1990 гг.) в Иркутской области отмечается потепление климата с максимальными темпами в феврале. В период с ноября по январь темпы роста средних температур снижаются, а на ряде станций Катангского, Качугского, Киренского, Верхнеленского районов и высокогорной станции Хамар-Дабан происходит незначительное похолодание.

Список литературы

1. География Иркутской области: учеб. пособие / Н. А. Ипполитова, С. Н. Коваленко, Г. Ф. Орел [и др.]. Иркутск : Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2013. 233 с.
2. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Оценка предстоящих изменений климата на территории Российской Федерации // Метеорология и гидрология. 2009. № 11. С. 15–29.
3. Изменение климата на азиатской территории России во второй половине XX столетия: сравнение данных наблюдений и реанализа / Е. А. Дюкарев, И. И. Ипполитов, М. В. Кабанов, С. В. Логинов // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19, № 11. С. 934–940.
4. Монин А. С. Введение в теорию климата. Л. : Гидрометеиздат, 1982. 246 с.
5. Монин А. С., Сонечкин Д. М. Колебания климата по данным наблюдений. Тройной солнечный и другие циклы. М. : Наука, 2005. 191 с.
6. Монин А. С., Шишков Ю. А. История климата. Л. : Гидрометеиздат, 1979. 407 с.
7. Переведенцев Ю. П. Теория климата. Казань : Изд-во Казан. ун-та, 2009. 503 с.
8. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. Л. : Гидрометеиздат, 1969. 645 с.
9. Шерстюков Б. Г. Пространственные и сезонные особенности изменений климата в период интенсивного глобального потепления : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук : 25.00.30. Казань, 2008. 36 с.
10. Zwiers F. W., Weaver A. J. The causes of 20th century warming // Science. 2000. Vol. 290. P. 2081–2082.

УДК 551.583(571.53)

Исследование общей и нижней облачности в Иркутской области

К. А. Лощенко (loshchenko@bk.ru), Н. С. Сухов (nik.sukhov.03@mail.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Статья посвящена исследованию годового распределения и многолетней динамики общего количества облаков и количества нижней облачности в Иркутской области за период 1940–2020 гг. по данным метеорологических станций Иркутск и Киренск, которые расположены в южном и северном районах. Облачность является важным климатическим параметром на территории Иркутской области, определяющим условия выпадения атмосферных осадков, влияющим на радиационный и температурный режим тропосферы. Характеристики общей и нижней облачности существенно различаются по календарным сезонам года, основной максимум в их годовом распределении согласуется с годовым режимом температуры воздуха, сезонными проявлениями подвижного циклогенеза и развитием термической конвекции. В многолетней динамике выявлены тенденции увеличения в последние десятилетия количества нижней облачности и уменьшения общего количества облаков на фоне роста средних температур и увеличения сухости воздуха на севере и юге Иркутской области.

Ключевые слова: общая облачность, нижняя облачность, температура воздуха, относительная влажность, атмосферное давление, Иркутск, Киренск.

Введение

Облачность является важной составляющей атмосферных процессов, которые оказывают существенное влияние на радиационный и водный режим атмосферы, а в многолетней динамике на климат Земли. Например, изменения облачного покрова могут смягчить последствия или усугубить глобальное потепление [1]

В этой связи важно проводить исследования многолетнего режима облачности в разных регионах, учитывая, что форма и количество облаков существенно зависят не только от характера стратификации атмосферы (конвективные облака создаются преимущественно атмосферной конвекцией в неустойчиво стратифицированной воздушной массе, а устойчивая стратификация определяет наличие слоистых облаков), но, и от особенностей рельефа местности.

По данным [3] над территорией Северной Евразии во второй половине XX в. выявлено увеличение количества конвективной облачности и уменьшение слоистообразной облачности, которые произошли в 1970–1980-е гг. Согласно более поздним исследованиям за 2001–2010 гг. [2] среднее количество общей облачности варьирует в России от 0,8 на арктическом побережье с максимумом в сентябре и октябре, минимумом в январе и феврале до 0,6 в южных районах европейской части России с минимумом летом и на юге Дальнего Востока с минимумом зимой. Частота безоблачных дней изменяется от 1 до 2 % в прибрежных регионах и центральных регионах Европейской части до 10–20 % в континентальной части Дальнего Востока (с максимумом зимой). Повторяемость дней с пасмурной погодой составляет около 20–40 %. Зимой, для центральных регионов европейской части она составляет 60–70 %, а наименьших значений (до 10–15 %) достигает в Восточной Сибири. Летом максимум числа пасмурных дней наблюдается в прибрежных районах (40–50 %), а минимум в южных районах европейской части, Урала и Сибири (5–15 %).

Изменения общего количества облаков за период 2001–2010 гг. по сравнению с 1991–2000 гг. над территорией России характеризуются их увеличением зимой на 0,05–0,1 в южных регионах европейской части, Восточной Сибири и над большей частью Дальнего Востока. Весной увеличение общего количества облаков (на 0,02–0,1) преобладает в районах южнее 60° с. ш., за исключением самых западных регионов европейской части. Летом наиболее значительные изменения произошли в бассейне р. Волги, где общее количество облаков снизилось на 0,1–0,2, тогда как на юге Сибири и на Дальнем Востоке их количество возросло на 0,05–0,15. Осенью общее количество облаков уменьшилось только над муссонными районами Дальнего Востока. Что касается изменений разновидностей облаков, то кучево-дождевая облачность заметно уменьшилась над территорией России за период 2001–2010 гг. по сравнению с 1991–2000 гг. летом и осенью (на 15–20 %), количество слоисто-дождевых облаков снизилось преимущественно летом, возросло число дней со слоистыми и слоисто-кучевыми облаками преимущественно весной и осенью.

Наблюдаемые изменения облачности могут быть связаны с изменениями динамических и термодинамических процессов. В частности, увеличение температуры воздуха в теплый период может привести к увеличению конвективной облачности и уменьшению слоистообразных облаков [4]. В целом наибольшие изменения в количестве общей облачности между периодами 2001–2010 гг. и 1991–2000 гг. отмечаются в Европе и на юге Сибири зимой, что вызвано главным образом уменьшением облаков среднего яруса, но, увеличилось количество кучево-дождевых облаков.

Объект и методы исследования

В работе выполнен статистический анализ распределения общего количества облаков и количества нижней облачности по данным метеорологических станций Иркутск и Киренск за период 1970–2020 гг. Метеорологическая станция Иркутск (широта 52°27', долгота 104°30', высота над уровнем моря 469 м) расположена на юге Иркутской области в пределах южной оконечности Иркутско-Черемховской равнины. Метеорологическая станция Киренск (широта 57°77', долгота 108°00', высота над уровнем моря 258 м) находится в южной части Среднесибирского плоскогорья, окаймленного на востоке хребтами и нагорьями Прибайкалья, в 650 км северо-восточнее Иркутска на р. Лене в месте впадения р. Киренги.

В работе проанализирована многолетняя динамика общего количества облаков и количества нижней облачности в разные месяцы года и в среднем за год. По данным метеорологической станции Иркутск выявлены различия в годовом распределении общего количества облаков и количества нижней облачности. Для определения возможного вклада метеорологических факторов в многолетней динамике общего количества облаков и количества нижней облачности на примере г. Иркутска выполнен корреляционный анализ, где рассмотрены такие метеорологические параметры, как средняя годовая температура воздуха, годовые суммы осадков и среднегодовые значения относительной влажности воздуха.

Результаты исследования

Исследование распределения общего количества облаков на метеорологической станции Иркутск по данным наблюдений за 1940–2020 гг. показало, что среднее за год количество облаков составляет 7 баллов и варьирует в течение года от 6,4 баллов в феврале до 7,8 баллов в декабре, второй максимум 7,5 баллов приходится на июль и ноябрь. Максимальное количество облаков составило 9,8 и 9,7 баллов и отмечалось соответственно в декабре и августе, а минимальное количество 3,4 и 3,5 баллов наблюдалось соответственно в феврале и в марте (рис. 1).

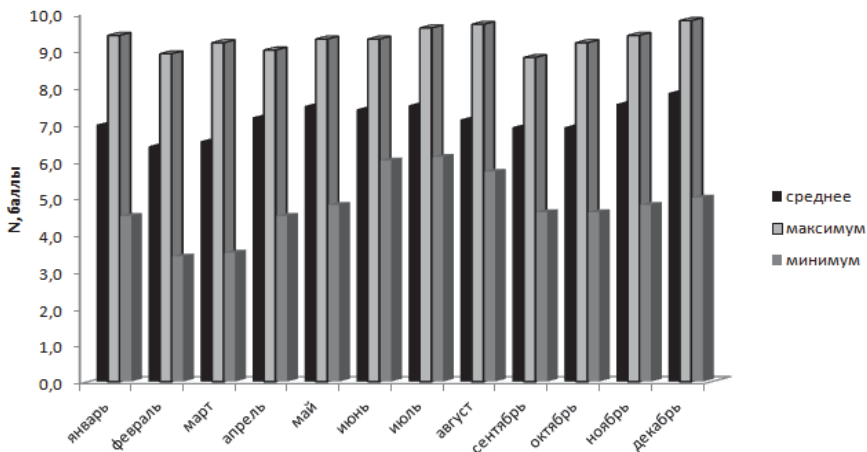


Рис. 1. Годовой ход общего количества облаков в Иркутске в 1940–2020 гг.

Годовой ход количества нижней облачности в Иркутске тесно согласован с годовым ходом температуры воздуха. Минимум количества нижней облачности отмечается зимой, в феврале и декабре, максимум летом, в июле и августе, когда также отмечается второй максимум в годовом распределении общего количества облаков (июль). В среднем за год за период 1970–2020 гг. количество нижней облачности в Иркутске составляет 2,7 балла и варьирует от 1,0 и 1,2 баллов соответственно в феврале и марте до 3,8 баллов в июле и августе (рис. 2).

В многолетней динамике общего количества облаков в Иркутске максимальные значения в разные месяцы года приходятся на период 1967–1984 гг. До этого, начиная с 1970-х гг., общее количество облаков в Иркутске возрастало, затем тенденция сменилась на уменьшение их количества. В среднем за весь исследуемый период, наибольшее количество общей облачности за год отмечалось в 1983 и 1984 гг. (8,7 баллов), а малооблачным был 1948 г. (5,7 баллов). В изменениях количества нижней облачности в Иркутске основной максимум приходится на период 2012–2020 гг., минимум на 1990-е, начало 2000-х гг. и на период 1950–1960 гг. По среднегодовым значениям наибольшее количества нижней облачности в Иркутске было в 2000 г. (3,9 балла), а наименьшее в 1993 г. (1,8 баллов).

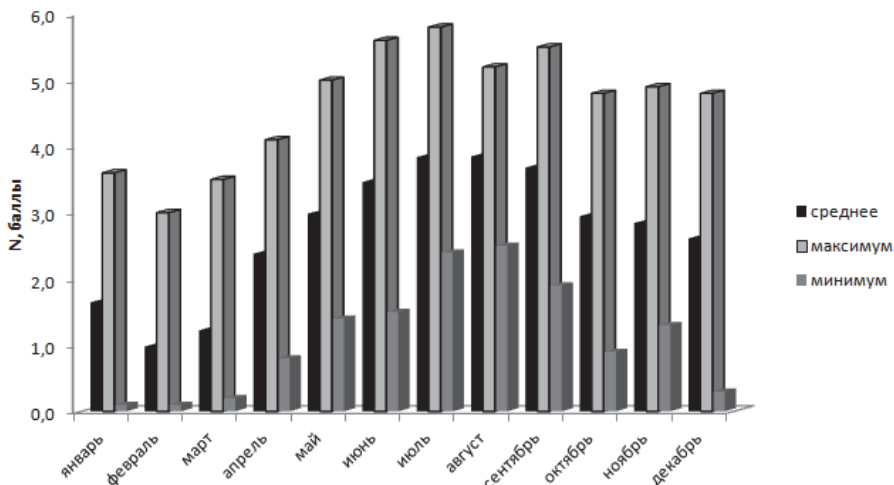


Рис. 2. Годовой ход количества нижней облачности в Иркутске в 1940–2020 гг.

Для сравнения была рассмотрена многолетняя динамика общей и нижней облачности на севере области по данным метеостанции Киренск, где основной максимум общего количества облаков приходится на период 1984–1989 гг., а основной минимум на 1940-е гг. В исследуемый период наибольшее количество облаков в среднем за год в Киренске отмечалось в 1985 и 1986 гг. (9,1 балла), а самым малооблачным оказался 1947 г. (6,1 балла). Более сложный характер имеет распределение многолетней динамики количества нижней облачности в Киренске. Основной максимум приходится на период 1950-е гг. и на два последних десятилетия, а основной минимум чаще отмечался с 1974 по 1985 г. В исследуемый период наибольшее количество нижней облачности в Киренске в среднем за год отмечалось в 2008 г. (4,4 балла), а самым малооблачным оказался 1975 г. (2,0 балла).

Таким образом, в многолетней динамике среднего за год количества общей облачности в Иркутской области по данным южной станции Иркутск и северной станции Киренск можно видеть согласованную динамику увеличения количества облаков с 1940-х по середину 1980-х гг., которая в дальнейшем сменилась тенденцией их уменьшения (рис. 3). Обращает внимание, что в 1960-е гг. общее количество облаков по северу и югу области было примерно одинаковым (7 баллов), в 1980-е гг. увеличилось до 8 баллов, а в настоящее время по северу Иркутской области среднегодовое количество облаков составляет 8,5 баллов, что выше, чем по югу (6,5 баллов). В изменениях среднегодового количества нижней облачности до начала 1980-х гг. по северу и югу Иркутской области была выражена тенденция уменьшения количества облаков. В начале 1980-х гг. их количество в среднем было примерно одинаковым и составляло 2,8 балла. В 1980–90-е гг.

происходило увеличение количества низких облаков, более выраженное по северу области, а в последние годы вновь среднее количество низких облаков стало примерно одинаковым по северу и югу (4 балла), что на 1 балл больше по сравнению с начальным периодом исследования (1940 г.).

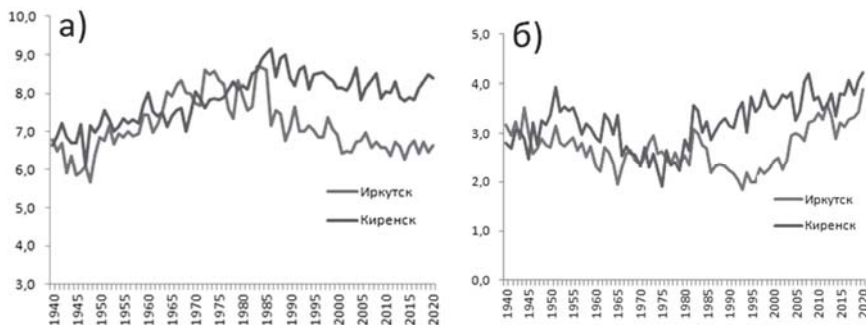


Рис. 3. Изменение количества общего количества облаков (а) и количества нижней облачности (б) в Иркутске и Киренске в 1940–2020 гг.

Чтобы оценить возможный статистический вклад других метеорологических факторов в многолетней динамике общего количества облаков и количества нижней облачности на примере г. Иркутск были рассчитаны коэффициенты парной корреляции, которые показали, что статистически значимые корреляционные линейные связи между изменениями количества облаков, температурой воздуха, атмосферным давлением, относительной влажностью и атмосферными осадками отсутствуют. Можно лишь отметить, что уменьшение общего количества облаков и увеличение количества нижней облачности в Иркутске в последние годы происходит на фоне уменьшения относительной влажности воздуха и увеличения средних годовых температур.

Заклучение

На метеорологической станции Иркутск по данным наблюдений за 1940–2020 гг. среднее за год общее количество облаков составляет 7 баллов, количество нижней облачности 3 балла. Увеличение количества облаков в Иркутске в годовом ходе отмечается зимой и летом. Зимой увеличивается вклад облаков нижнего яруса (слоистых и слоисто-кучевых) на фоне частых приподнятых инверсий температур в условиях господствующего влияния Азиатского антициклона, летом существенный вклад в общее количество облаков и облаков нижнего яруса вносят конвективные облака.

Самыми облачными по общему количеству облаков в Иркутске и в Киренске были 1983–1986 гг., а малооблачными 1947 и 1948 гг., по количеству нижней облачности самыми облачными оказались 2000 и 2008 гг., а малооблачными 1975 и 1993 гг.

В многолетней динамике с середины 1980-х гг. по северу и югу Иркутской области отмечается уменьшение общего количества облаков и увеличение количества нижней облачности. Уменьшение общего количества облаков тесно согласуется с ростом средних годовых температур воздуха и уменьшением относительного влагосодержания, т. е. с более теплым и сухим воздухом, а увеличение количества нижней облачности можно объяснить увеличением вклада конвективной составляющей в образовании низких облаков на фоне роста средних температур воздуха. Увеличение количества низких облаков может сопровождаться ростом числа опасных явлений погоды, связанных с ними, таких как шквальный ветер под передней кромкой кучево-дождевых облаков, грозы, ливни и град.

Список литературы

1. *Мохов И. И., Семенов В. А.* Погодно-климатические аномалии в российских регионах и их связь с глобальными изменениями климата // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 2. С. 16–28.
2. Recent variations of cloudiness over Russia from surface daytime observations / *A. V. Chernokulsky, O. N. Bulygina, I. I. Mokhov* // *Environmental Research Letters*. 2011. Vol. 3. Art. 035202. DOI: 10.1088/1748-9326/6/3/035202
3. *Groisman P. Y.* Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change // *Clim. Change*. 1999. Vol. 42 (1). P. 243–283.
4. *Norris J. R.* Interannual and interdecadal variability in the storm track, cloudiness, and sea surface temperature over the summertime North Pacific // *Journal of Climate*. 2000. Vol. 13 (9). P. 1603–1603.

УДК 551.521(213)

Парниковый эффект во внутритропической зоне конвергенции

В. Н. Малинин¹, П. А. Вайновский², С. М. Гордеева (gordeeva@rshu.ru)¹

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

²ООО «Прогноз», г. Санкт-Петербург

Аннотация. Составлена концептуальная схема взаимосвязи межгодовой изменчивости гидрометеорологических параметров во внутритропической зоне конвергенции (ВЗК) с учетом радиационных индексов G_a и G_s , характеризующих парниковый эффект. Показано доминирующее влияние влагосодержания атмосферы одновременно на формирование межгодовой изменчивости G_a и G_s . При этом тренд во влагосодержании атмосферы формируется за счет процессов влагообмена, поскольку тренды в осадках и испарении в разы превышают тренд в изменчивости температуры воздуха. Установлено, что осадки определяют интенсивность восходящей ветви ячейки Хэдли, т. е. служат «мотором» меридиональной циркуляции атмосферы. Доминирующее влияние на осадки оказывают парниковый эффект, определяемый по индексу G_a , и испарение в зоне 0–10 °ю.ш., которые описывают 87 % дисперсии межгодовой изменчивости осадков в главной зоне ВЗК – севернее экватора.

Ключевые слова: парниковый эффект, внутритропическая зона конвергенции, влагосодержание атмосферы, тренд.

Введение

Считается, что главной причиной современного глобального потепления является парниковый эффект (ПЭ), который во внутритропической зоне конвергенции (ВЗК) достигает максимальных значений. Для его оценки могут быть использованы радиационные индексы G_a (atmosphere greenhouse effect parameter), который представляет разность между собственным длинноволновым излучением подстилающей поверхности [7] и G_s (surface greenhouse effect parameter), означающий противоизлучение атмосферы [5]. Отсюда видно, что G_a характеризует величину ПЭ всей атмосферы, а G_s – у подстилающей поверхности. До настоящего времени многие закономерности пространственно-временной изменчивости индексов G_a и G_s в ВЗК практически не известны. В связи с этим цель данной работы заключается в изучении межгодовой изменчивости индексов ПЭ и их взаимосвязи с характеристиками тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой в зоне ВЗК.

Материалы и методы

В данной работе использован хорошо известный архив NCEP–DOE Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-II) reanalysis (Reanalysis-2), охватывающий спутниковый период наблюдений с 1979 г. по настоящее время с пространственным разрешением около 1,9° по широте и долготе [6]. Из данного архива выбирались среднемесячные значения характеристик длинноволнового радиационного баланса, влагообмена между океаном и атмосферой (осадки P и испарение E), а также температуры воздуха (атмосферы, T_A) и температуры поверхности океана (ТПО) для открытой водной поверхности за 40-летний период (1979–2018 гг.) для области ВЗК (10°с.ш.–10°ю.ш.). Среднемесячные поля усреднялись по 10-градусным широтным зонам отдельных океанов и для области ВЗК в целом.

Результаты и их обсуждение

В данной работе выполнены расчеты радиационных индексов G_a и G_s , характеризующих парниковый эффект, а также параметров тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой за 40-летний период (1979–2018 гг.) для области ВЗК в целом (10° с.ш.– 10° ю.ш.) и в отдельных океанах. На рис. 1 приводится межгодовой ход зонально-осредненных индексов G_a (1) и G_s (2) в океанической области ВЗК (10° с.ш. – 10° ю.ш.). До 1999 г. отмечалось относительное ослабление индекса G_s , но затем он начал резко расти, причем тренд G_s увеличился почти в 2 раза. Отметим, что рост ПЭ начался на 2 года раньше, чем потепление в ВЗК. Максимум G_s приходится на 2015 г. и соответствует очень сильному Эль-Ниньо. Другие положительные экстремумы также совпадают с Эль-Ниньо, а отрицательные – с Ла-Нинья. Что касается индекса G_a , то он также вначале уменьшается до 1999 г., а затем начинает расти. Эти индексы отличаются друг от друга тем, что если основной тренд G_s за период 1979–2018 гг. является положительным и значимым, то тренд в G_a практически отсутствует, поскольку противоположные тренды за 1979–1999 и 1999–2018 гг. почти компенсируют друг друга. Корреляция между индексами равна $r = 0,68$.

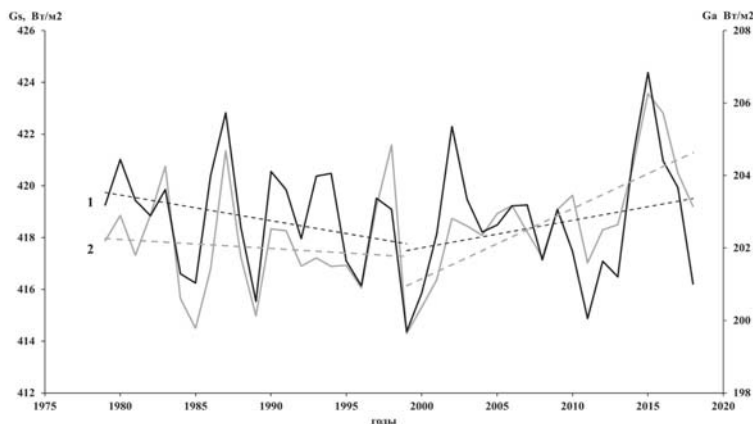


Рис. 1. Межгодовой ход зонально-осредненных индексов G_a (1) и G_s (2) в океанической области ВЗК (10° с.ш. – 10° ю.ш.), в $Вт/м^2$

Принципиальное различие индексов G_a и G_s состоит в том, что если G_a характеризует ПЭ толщи атмосферы и влияет в основном на изменчивость атмосферных процессов, то G_s через ПЭ формирует положительные тренды в характеристиках тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой и одновременно влияет на их межгодовую изменчивость.

Результаты детального статистического анализа компонентов тепло- и влагообмена друг с другом и с индексами G_a и G_s позволили составить концептуальную схему взаимосвязи межгодовой изменчивости гидрометеорологических

параметров в ВЗК (рис. 2). Все стрелки основаны на высокой ($r = 0,75-0,95$) корреляции между этими параметрами.

На рис. 2 нетрудно видеть два блока взаимодействия, которые связаны друг с другом. Центральный элемент в этой схеме — ВА, которое является важным климатообразующим фактором [4]. Оно одновременно влияет на формирование изменчивости G_a , на тренд и изменчивость G_s . Рассмотрим вначале левый блок процессов влагообмена. В результате повышения (понижения) ВА происходит усиление (ослабление) индекса G_a . В результате повышается (понижается) температура тропосферы, усиливается (ослабляется) конвекция и как следствие возрастает (уменьшается) количество выпадающих осадков. Однако мощный тренд в осадках может вызываться только под влиянием испарения. В данном случае в его формировании принимают участие обе широтные зоны, причем зона южной экватора является определяющей.

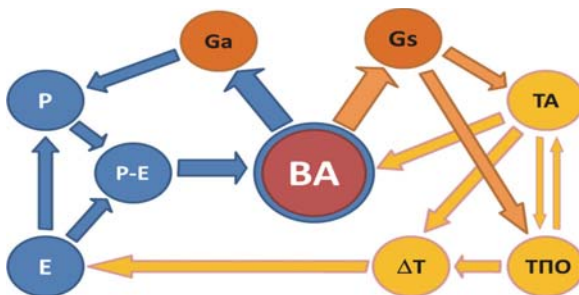


Рис. 2. Концептуальная схема взаимосвязи межгодовых колебаний гидрометеорологических параметров в ВЗК

Другое важное следствие процессов влагообмена состоит в том, что на изменчивость разности $P-E$ доминирующее влияние оказывают осадки. Поэтому тренд и изменчивость $P-E$ в значительной степени влияют на формирование тренда и изменчивости ВА. Далее эта последовательность процессов в блоке процессов влагообмена будет повторяться.

Рассмотрим теперь правый блок процессов теплообмена. Влияние ВА на индекс G_s является доминирующим. В результате ПЭ повышается температура воздуха и воды поверхностного слоя океана. Вследствие положительной обратной связи происходит определенное влияние ТА на ВА, которое затем через ПЭ воздействует обратно на ТА. Итак, ТА и $P-E$ примерно одинаково влияют на изменчивость ВА. Однако тренд в ВА формируется исключительно за счет процессов влагообмена, так как тренды в P и E в разы превышают тренд в ТА. Отметим также, что тренд и межгодовая изменчивость испарения по существу контролируются вертикальным градиентом температуры ΔT в приводном слое вследствие того, что другой важнейший фактор формирования испарения – скорость ветра – имеет малую изменчивость в пассатной зоне океана, а перепад влажности почти функционально зависит от перепада температуры.

Особого внимания в схеме на рис. 2 заслуживают осадки в зоне ВЗК севернее экватора. Здесь они имеют максимальные значения, максимальные положительные тренды, а с учетом огромного количества тепла, выделяемого в атмосферу при конденсации водяного пара, именно осадки определяют интенсивность восходящей ветви ячейки Хэдли. Если ВЗК является локомотивом современных изменений климата [1; 2], то осадки служат «топливом» меридиональной циркуляции атмосферы, причем их влияние не ограничивается ячейкой Хэдли, а распространяется и на ячейку Ферреля. При этом доминирующее влияние на осадки оказывают всего два параметра: ПЭ в тропосфере, определяемый по индексу Ga , и испарение в зоне $0-10^\circ$ ю.ш., которые описывают 87 % дисперсии межгодовой изменчивости осадков в главной зоне ВЗК – севернее экватора. В зоне южнее экватора вклад этих параметров в дисперсию осадков в данной зоне составляет 69 %.

Предложенная на рис. 2 схема нуждается в дополнительной проверке и подтверждении с использованием других данных и методов дистанционного зондирования Земли из космоса. Прежде всего это касается компонентов влагообмена между океаном и атмосферой. Если точность оценок ВА над океаном при помощи спутниковых СВЧ спектрометров-поляриметров является довольно высокой, то ситуация с определением испарения и особенно осадков по данным спутниковых архивов (HOAPS-3, PMWC, MERRA, ERA-40, CFSR и др.) свидетельствует об их весьма низкой точности [3]. Поскольку альтернативы спутниковой информации нет, то совершенствование старых и разработка новых дистанционных методов измерений и расчетов составляющих водного баланса над океаном остается крайне важной актуальной задачей современной гидрометеорологии.

Работа выполнена в рамках государственного контракта FSZU-2020-0009 «Исследование физических, химических и биологических процессов в атмосфере и гидросфере в условиях изменения климата и антропогенных воздействий».

Список литературы

1. Малинин В. Н., Вайновский П. А. Влагообмен между океаном и атмосферой во внутритропической зоне конвергенции // Гидрометеорология и экология. 2021. № 63. С. 255–278.
2. Малинин В. Н., Вайновский П. А. Тренды компонент влагообмена в системе океан–атмосфера в условиях глобального потепления по данным архива Reanalysis-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 3. С. 9–25.
3. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Изменчивость испарения и осадков над океаном по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2016. № 4. С. 23–34.
4. Малинин В. Н., Гордеева С. М., Наумов Л. М. Влагосодержание атмосферы как климатообразующий фактор // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 3. С. 243–251.
5. Boer G. J. Climate change and the regulation of the surface moisture and energy budgets // Climate Dynamics. 1993. Vol. 8, N 5. P. 225–239.
6. NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) / M. Kanamitsu, W. Ebisuzaki, J. Woollen, [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. 2002. Vol. 83, N 11. P. 1631–1644.
7. Raval A., Ramanathan V. Observational determination of the greenhouse effect // Nature. 1989. Vol. 342, N 6251. P. 758–761.

УДК 551.583(282.247.135)

Климатические изменения в бассейне реки Ваги

А. Э. Сумачев (a.sumachev@mail.ru), Л. С. Банщикова
(BanshchikovaLS@yandex.ru)², С. Ю. Почепко (pochepkosofia@gmail.com)¹

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

²Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Проанализированы пространственная и временная изменчивость температуры воздуха в бассейне р. Ваги, которая является крупнейшим левым притоком Северной Двины. Пространственная и временная изменчивость температуры воздуха во многом определяет гидрологический режим рек, сроки установления и разрушения ледовых образований, влияет на режим испарения. Поэтому оценка современного состояния климата является важнейшим этапом любых гидрологических исследований.

Ключевые слова: температура воздуха, климатические изменения, река Вага

Материалы и методы

Пространственно-временная изменчивость температуры воздуха оценена по данным 12 метеорологических станций за период 1950 по 2022 г. В качестве периода для обобщения данных был выбран период с 1991 по 2022 г., так как согласно приказу Росгидромета № 64 от 18.02.2022 с 15 марта 2022 г. в оперативно-производственную практику подведомственных учреждений были внедрены актуализированные климатические нормы, рассчитанные за период с 1991 по 2020 г. [1] Среднегодовая температура воздуха рассматривалась как ансамбль случайных величин (реализаций случайного процесса), образующих случайный процесс. Соответственно математическое ожидание случайного процесса рассчитывалось как функция среднерайонных значений по каждому из сечений (под сечением случайного процесса понимается случайная величина $X(t_i)$, в которую обращается случайный процесс при $t = t_i$, дискретность по времени равна одному году), аналогичным образом рассчитывалось стандартное отклонение случайного процесса, его максимальные и минимальные значения. Для оценки пространственной изменчивости приведен картографический материал. Также были оценена изменчивость среднемесячных температур воздуха по месяцам и сезонам года. Оценка значимости линейного тренда определялась отдельно по каждой из реализаций случайного процесса при уровне значимости 5 % [2]. Для оценки значимости осредненного по району значения линейного тренда осуществлялся одновыборочный тест Стьюдента при уровне значимости 5 %.

Обсуждение результатов

Анализ среднегодовых температур воздуха показал наличие статистически значимых трендов по всем метеорологическим станциям, при этом можно отметить, что данный случайный процесс является неэргодическим и нестационарным по математическому ожиданию, в то же время отмечается стационарность по дисперсии, что свидетельствует о довольно равномерном увеличении температуры воздуха по территории (пространственная изменчивость среднегодовых температур воздуха не изменяется со временем) (рис. 1).

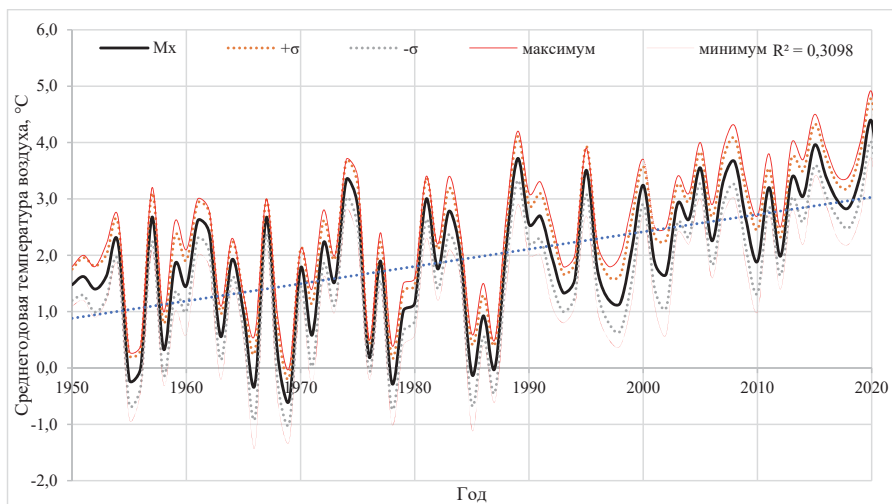


Рис. 1. Реализация математического ожидания случайного процесса (среднее районное значение температуры воздуха), максимальных и минимальных районных среднегодовых температур воздуха

Если рассматривать реализацию математического ожидания (среднее районное значение температуры воздуха) как случайную величину, то можно заключить, что средняя по району температура воздуха имеет статистически значимый линейный тренд (коэффициент корреляции равен 0,56), увеличение температуры воздуха составило 1,2 °С, по критерию Фишера данный ряд сохраняет стационарность (изменчивость среднегодовой температуры воздуха, осредненной по району, уменьшается с течением времени статистически незначимо).

Анализ среднемесячных температур воздуха по различным метеорологическим станциям показал наличие трендов на увеличение. На большинстве метеорологических станций отмечаются значимые коэффициенты корреляции за январь-март, май, июль, сентябрь-октябрь. При этом стоит отметить, что в той или иной степени повышение температуры воздуха наблюдается на всех метеорологических станциях за все месяцы года (табл. 1), проведенный одновыборочный тест Стьюдента, показывает статистически значимое отличие от нуля всех среднерайонных коэффициентов корреляции.

В пространственном отношении среднегодовая и среднесезонная температура воздуха определяется степенью континентальной климата и увеличивается с севера на юг (рис. 2, 3).

Таблица 1

Оценка значимости линейных трендов температуры воздуха
в пределах рассматриваемого района

Метеорологическая станция	Значение коэффициента корреляции линейного тренда	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Ср. год
Двинской Березник	R 1950–2022	0,21	0,21	0,32	0,23	0,33	0,12	0,22	0,06	0,25	0,23	0,18	0,12	0,50
	Значимость R	–	–	+	–	+	–	–	–	+	–	–	–	+
Шенкурск	R 1950–2022	0,22	0,19	0,26	0,16	0,32	0,15	0,27	0,15	0,27	0,27	0,20	0,14	0,51
	Значимость R	–	–	+	–	+	–	+	–	+	+	–	–	+
Шангалы	R 1950–2022	0,28	0,20	0,13	0,30	0,23	0,10	0,20	0,18	0,21	0,27	0,17	0,19	0,53
	Значимость R	+	–	–	+	–	–	–	–	–	+	–	–	+
Няндомы	R 1950–2022	0,25	0,23	0,30	0,20	0,32	0,18	0,31	0,17	0,30	0,26	0,23	0,18	0,57
	Значимость R	+	+	+	–	+	–	+	–	+	+	–	–	+
Конево	R 1950–2022	0,25	0,15	0,10	0,26	0,23	0,21	0,25	0,22	0,24	0,26	0,17	0,25	0,51
	Значимость R	+	–	–	+	–	–	+	–	+	+	–	–	+
Вожега	R 1950–2022	0,24	0,24	0,32	0,20	0,32	0,19	0,32	0,22	0,26	0,24	0,22	0,16	0,57
	Значимость R	+	+	+	–	+	–	+	–	+	+	–	–	+
Великий Устюг	R 1950–2022	0,31	0,28	0,34	0,14	0,32	0,12	0,27	0,16	0,22	0,25	0,22	0,13	0,57
	Значимость R	+	+	+	–	+	–	+	–	–	+	–	–	+
Тотьма	R 1950–2022	0,28	0,27	0,32	0,21	0,38	0,20	0,38	0,27	0,29	0,27	0,26	0,17	0,63
	Значимость R	+	+	+	–	+	–	+	+	+	+	+	–	+
Нюксеница	R 1950–2022	0,27	0,20	0,13	0,24	0,19	0,20	0,21	0,22	0,26	0,34	0,17	0,17	0,54
	Значимость R	+	–	–	+	–	–	–	–	+	+	–	–	+
Вельск	R 1950–2022	0,23	0,23	0,32	0,22	0,36	0,20	0,32	0,21	0,30	0,27	0,21	0,16	0,58
	Значимость R	–	–	+	–	+	–	+	–	+	+	–	–	+
в. Тойма	R 1950–2022	0,23	0,22	0,29	0,18	0,35	0,14	0,25	0,09	0,24	0,28	0,19	0,13	0,52
	Значимость R	–	–	+	–	+	–	+	–	+	+	–	–	+
Котлас	R 1950–2022	0,24	0,24	0,29	0,17	0,34	0,09	0,22	0,10	0,19	0,27	0,21	0,13	0,52
	Значимость R	+	+	+	–	+	–	–	–	–	+	–	–	+

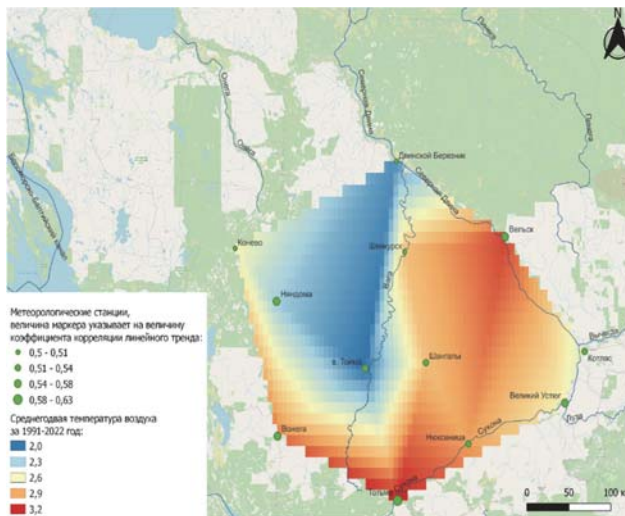


Рис. 2. Пространственная изменчивость среднегодовой температуры воздуха

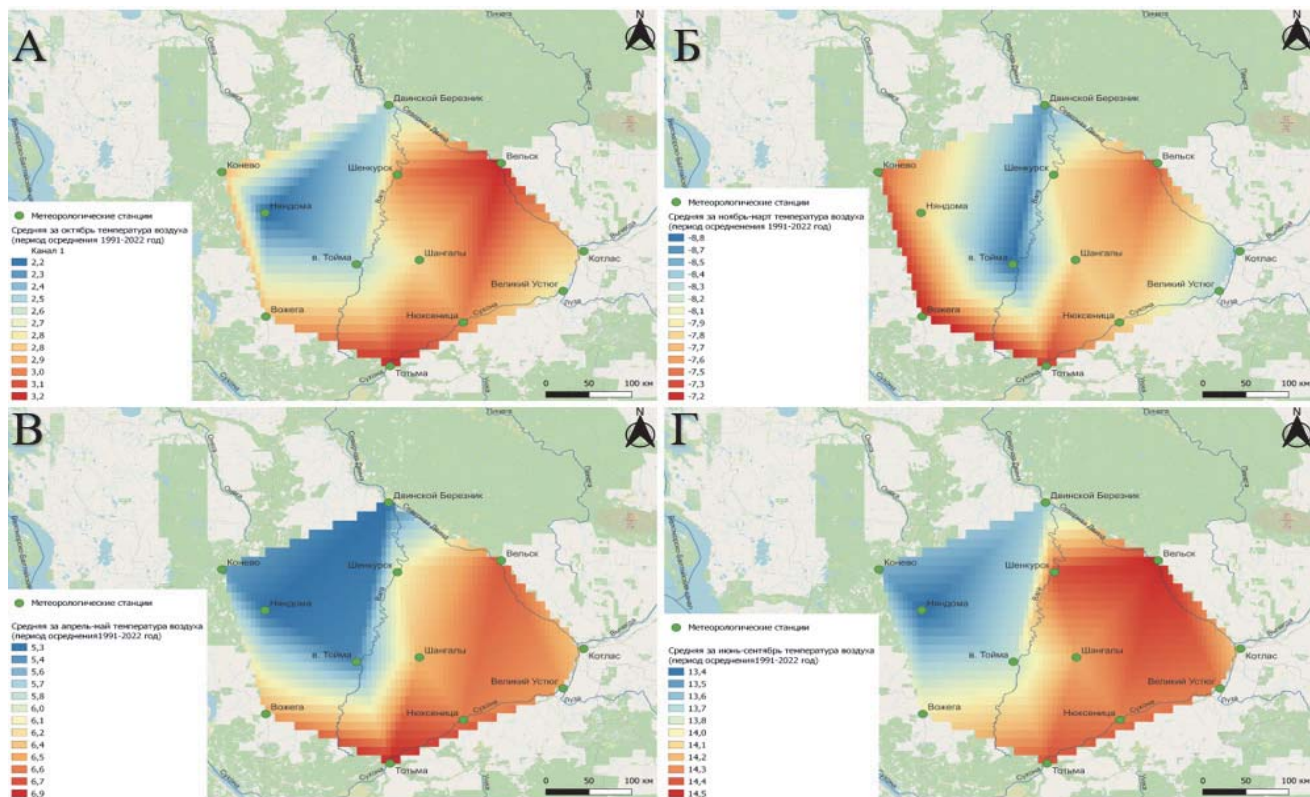


Рис. 3. Пространственная изменчивость температуры воздуха по сезонам года

Таблица 2

Корреляционная матрица среднегодовых температур воздуха на различных метеорологических станциях

Г/м станция	Д. Березник	Шенкурск	Шангалы	Няндомы	Конево	Вожега	В. Устюг	Тотьма	Нюксеница	Вельск	В. Тойма	Котлас
Д. Березник	1,00											
Шенкурск	0,99	1,00										
Шангалы	0,99	0,99	1,00									
Няндомы	0,98	0,98	0,99	1,00								
Конево	0,97	0,97	0,98	0,98	1,00							
Вожега	0,96	0,96	0,98	0,99	0,97	1,00						
В. Устюг	0,97	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95	1,00					
Тотьма	0,96	0,96	0,98	0,98	0,96	0,98	0,98	1,00				
Нюксеница	0,97	0,98	0,99	0,98	0,97	0,98	0,99	0,99	1,00			
Вельск	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	1,00		
в. Тойма	0,99	0,99	0,99	0,97	0,96	0,95	0,98	0,96	0,98	0,98	1,00	
Котлас	0,98	0,99	0,98	0,96	0,95	0,95	0,99	0,96	0,98	0,98	0,99	1,00

Заключение

Выявлено увеличение температуры воздуха на всех метеорологических станциях изучаемого региона, среднее увеличение температуры составляет 1,2 °С, пространственная взаимосвязь среднегодовых температур воздуха характеризуется высокими коэффициентами корреляции, а уравнение линейной регрессии пригодно для приведения рядов наблюдений к многолетнему периоду.

Список литературы

1. О внесении изменений в приказ Росгидромета от 28.10.2010 № 341 «Об утверждении и введении в действие форм ведомственной статистической отчетности и указаний по их заполнению»: приказа Росгидромета № 64 от 18.02.2022, действующий с 15.03.2022. URL: <https://www.aviamettlecom.ru/activity/methodical/prikazy-rasporyazhen/> (дата обращения: 05.07.2022).
2. Сикан А. В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации : учебник. СПб. : Изд-во РГГМУ. 2007. 279 с.



СЕКЦИЯ

**РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ
АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ**

УДК 504.4+551.510.42(571.54)

Вклад лесных пожаров в загрязнение атмосферного воздуха на территории Баргузинского заповедника и Забайкальского национального парка

Д. В. Бадмаев (mister.dashinima@mail.ru), С. Ж. Вологжина (svologzhina@gmail.com)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Статья посвящена изучению динамики лесных пожаров на территории Баргузинского заповедника и Забайкальского национального парка. Проведены расчеты выбросов загрязняющих веществ, поступающих в атмосферный воздух от лесных пожаров.

Ключевые слова: лесные пожары, загрязняющие вещества, динамика, горение древесины, Баргузинский заповедник, Забайкальский национальный парк.

Введение

Лесные пожары являются одной из основных экологических проблем современного мира, приносящие значительный ущерб экосистемам. В результате лесных пожаров на пройденной ими территории уничтожаются лесные насаждения, снижаются защитные и водоохранные свойства леса, сокращается биоразнообразие, теряется плодородность почвы и эрозия, а также наносится существенный вред здоровью населения. А также выбрасывается большое количество продуктов горения – смесь различных газов, соединений углерода, оказывающих значительное влияние на физические и химические процессы в атмосфере.

Проблема лесных пожаров в России и, в частности, в Республике Бурятия имеют сезонный характер. Факторами, способствующими возникновению и распространению лесных пожаров, являются метеорологические условия, с которыми связаны процессы увлажнения и высыхания лесных горючих материалов. Это ветер, влажность, осадки, температура воздуха и облачность.

Основными причинами возникновения лесных пожаров принято считать как естественные факторы, такие как удар молнии, самовозгорание, так и антропогенные факторы – преднамеренные поджоги, отжиг травы, розжиг костров в неположенных местах и т. д.

На исследуемых территориях особый режим использования и охраны, поэтому в пожароопасные сезоны на территории лесов ООПТ основными причинами пожаров являются природные факторы.

Динамика лесных пожаров

В исследовании рассматривается временной период с 2016 по 2021 гг (рис. 1,2). В результате изучения лесопожарных данных на ООПТ можно сделать следующие выводы, что количество и площадь лесных пожаров подвержены сильным колебаниям по годам (11 ед. в 2017 г. и 0 ед. в 2016 и 2021 гг.). Эти колебания вызваны естественным циклическим характером лесных пожаров, обусловленных состоянием лесных горючих материалов, количеством влаги в них и

неблагоприятными метеорологическими условиями, которые способствуют возникновению пожаров. В экстремальных погодных условиях (высокая температура воздуха, отсутствие осадков) лесные пожары бесконтрольно распространяются и размеры его увеличиваются.

В 2016 г. на территории Баргузинского заповедника произошли самые масштабные пожары как по количеству 5 ед., так и по площади сгоревших лесов 6349 га. за весь период наблюдения. Для Забайкальского национального парка пик по количеству 11 ед. пожаров пришелся на 2017 г., а по масштабу 4065,4 га возгорания приходится на 2020 г.

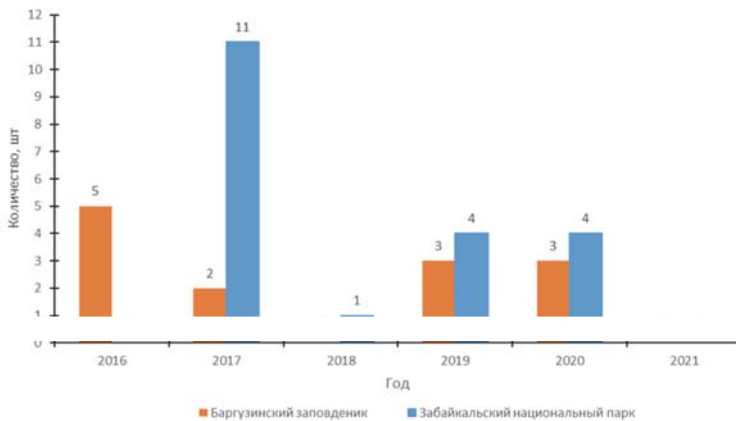


Рис.1. Динамика лесных пожаров на территории Баргузинского заповедника и Забайкальского национального парка с 2016 по 2021 г.

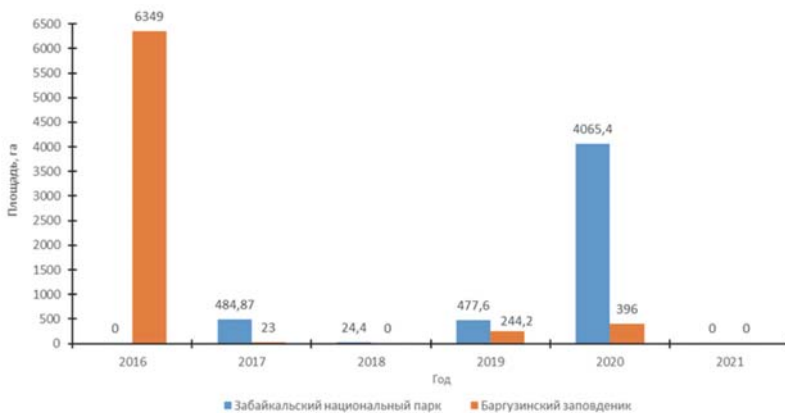


Рис.2. Площадь, пройденая пожаром, на территории Баргузинского заповедника и Забайкальского национального парка с 2016 по 2021 г.

Катастрофические пожары лета 2016 и 2020 гг. объясняются тем, что причиной установления высокого уровня горимости лесов сложилось в результате двух факторов: экстремальных погодных условий (отсутствие дождей и высокая температура воздуха) и понижение водного уровня бассейна оз. Байкал, как следствие этого – отсутствие влаги в почве, в результате – ускоренное высыхание напочвенного покрова и увеличение массы сухих горючих материалов в лесу.

Продолжительность пожароопасного сезона на территориях ООПТ обусловлена природно-климатическими условиями и классами природной пожарной опасности лесов.

Продолжительность пожароопасного сезона для Баргузинского заповедника в 2016 г. составила 111 дней (сезон открыт 13 июня), в 2017 г. – 16 дней (3 августа), в 2018 г. – пожароопасный сезон не был открыт так как возгорания за этот год не были зафиксированы, в 2019 г. – 35 дней (2 августа), в 2020 г. – 17 дней (22 июня).

Продолжительность пожароопасного сезона для Забайкальского национального парка в 2016 г. – пожароопасный сезон не был открыт, так как возгорания за этот год не были зафиксированы, в 2017 г. – 38 дней (31 июля), в 2018 г. – 58 дней (1 июля), в 2019 г. – 58 дней (11 июля), в 2020 г. – 31 дней (24 июня).

В 2021 г. на особо охраняемых природных территориях Баргузинского заповедника и Забайкальского национального парка пожароопасный период не был открыт, так как возгорания за этот год не были зафиксированы.

Всего за период с 2016 по 2021 г. на территориях ООПТ было зарегистрировано 33 очага возгорания, к низовым относятся 21 из них, что составляет 64 %, а к пожарам смешанного типа 12 случаев, что составляет 36 %. Сильнее всего от возгораний низового характера пострадали особо охраняемые природные территории Забайкальского национального парка – 15 возгораний. Пожары смешанного типа чаще отмечались в лесах Баргузинского заповедника – 7 случаев.

Суммарная площадь, пройденная огнем, по всей территории Баргузинского заповедника за 2016 г. составляет 6349 га, что значительно больше, чем в любые другие года: 2017 г. – 23 га, 2018 г. – 244,4 га, 2020 г. – 396 га.

Несмотря на проводимый ежегодно комплекс противопожарных мероприятий по профилактике и предупреждению лесных пожаров, динамика лесных пожаров за 2016–2020 гг. демонстрирует, что лесные пожары продолжают оставаться одной из главных проблем ООПТ.

Результаты исследования

В работе расчеты были проведены по Методике расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров, 2009 г. [1]. Данная методика была составлена и дополнена с учетом и на основе ранее введенной Методики определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров, 1997 г. [2]. Выбор методики обусловлен тем, что она позволяет производить расчеты большого спектра выбросов вредных газообразных и дисперсных веществ в атмосферу при неконтролируемом горении лесных горючих материалов на лесных пожарах различных типов (низовых, верховых и торфяных).

В качестве значений массы древесины и ЛГМ были взяты усредненные значения, применение которых доказано рядом авторов, так, например, в статье «Экологические последствия лесных пожаров на территории Иркутской области», учеными научно обоснованно применение значения 2 кг/м^2 в качестве массы древесины $0,25 \text{ кг/м}^2$ – в качестве массы ЛГМ [3].

Коэффициент полноты сгорания K учитывает, какая часть исходной массы ЛГМ или древесины сгорела при пожаре, для древесины принимается значение $0,3$, для ЛГМ – $0,1$. Из чего следует, что коэффициент недожога равен $0,7$ для древесины и $0,9$ – для ЛГМ [3]. Расчеты выбросов загрязняющих веществ были проведены для двух районов Забайкальского национального парка и для Баргузинского заповедника отдельно, на территории которых были зарегистрированы очаги возгораний в период с 2016 по 2021 г. Результаты проведенных расчетов приведены в табл.

Таблица

Расчет массы токсикантов от лесных пожаров

Общая масса токсиканта, попавшего в атмосферу M_i , кг		Масса токсиканта, попавшего в атмосферу при сгорании ЛГМ $M_i^{\text{ЛГМ}}$, кг		Масса токсиканта, попавшего в атмосферу при сгорании древесины $M_i^{\text{д}}$, кг	
Баргузинский заповедник (13 июня – 2 октября 2016 г., площадь – 6349 га)					
Оксид углерода (CO)	1 928 532,0	Диоксид азота (NO ₂)	5786,0	Акролеин (C ₃ H ₄ O)	5778,0
Диоксид углерода (CO ₂)	1 928 532,1	Диоксид серы (SO ₂)	1428,5	Ацетон (C ₃ H ₆ O)	15406,9
Сажа (C)	157 378,6	Сероводород (H ₂ S)	1428,5	Ацетальдегид (C ₂ H ₄ O)	127107,0
		Формальдегид (HCHO)	1428,5		
		Уксусная кислота (CH ₃ COOH)	1428,5		
Баргузинский заповедник (3 августа – 19 августа 2017 г., площадь – 23 га)					
Оксид углерода (CO)	6986,1	Диоксид азота (NO ₂)	20,9	Акролеин (C ₃ H ₄ O)	21,0
Диоксид углерода (CO ₂)	6986,1	Диоксид серы (SO ₂)	5,175	Ацетон (C ₃ H ₆ O)	55,8
Сажа (C)	569,3	Сероводород (H ₂ S)	5,175	Ацетальдегид (C ₂ H ₄ O)	460,1
		Формальдегид (HCHO)	5,175		
		Уксусная кислота (CH ₃ COOH)	5,175		

Продолжение табл.

Баргузинский заповедник (2 августа – 6 сентября 2019 г., площадь – 244,2 га)					
Оксид углерода (CO)	74177,2	Диоксид азота (NO ₂)	222,5	Акролеин (C ₃ H ₄ O)	222,0
Диоксид углерода (CO ₂)	74177,2	Диоксид серы (SO ₂)	54,9	Ацетон (C ₃ H ₆ O)	592,6
Сажа (C)	6044,4	Сероводород (H ₂ S)	54,9	Ацетальдегид (C ₂ H ₄ O)	4888,9
		Формальдегид (HCHO)	54,9		
		Уксусная кислота (CH ₃ COOH)	54,9		
Баргузинский заповедник (22 июня – 9 июля 2020 г., площадь – 396 га)					
Оксид углерода (CO)	120286,3	Диоксид азота (NO ₂)	360,9	Акролеин (C ₃ H ₄ O)	360,4
Диоксид углерода (CO ₂)	120286,3	Диоксид серы (SO ₂)	89,1	Ацетон (C ₃ H ₆ O)	961,0
Сажа (C)	9801,1	Сероводород (H ₂ S)	89,1	Ацетальдегид (C ₂ H ₄ O)	7927,9
		Формальдегид (HCHO)	89,1		
		Уксусная кислота (CH ₃ COOH)	89,1		
Забайкальский национальный парк (31 июля – 7 сентября 2017 г., площадь – 484,9 га)					
Оксид углерода (CO)	147290,2	Диоксид азота (NO ₂)	441,9	Акролеин (C ₃ H ₄ O)	441,3
Диоксид углерода (CO ₂)	147290,2	Диоксид серы (SO ₂)	109,1	Ацетон (C ₃ H ₆ O)	1176,7
Сажа (C)	12001,0	Сероводород (H ₂ S)	109,1	Ацетальдегид (C ₂ H ₄ O)	9707,7
		Формальдегид (HCHO)	109,1		
		Уксусная кислота (CH ₃ COOH)	109,1		
Забайкальский национальный парк (1 июля – 28 августа 2018 г., площадь – 24,4 га)					
Оксид углерода (CO)	7412,0	Диоксид азота (NO ₂)	22,2	Акролеин (C ₃ H ₄ O)	22,2
Диоксид углерода (CO ₂)	7412,0	Диоксид серы (SO ₂)	5,5	Ацетон (C ₃ H ₆ O)	59,2

Окончание табл.

Сажа (С)	604,4	Сероводород (H ₂ S)	5,5	Ацетальдегид (C ₂ H ₄ O)	488,5
		Формальдегид (HCHO)	5,5		
		Уксусная кислота (CH ₃ COOH)	5,5		
Забайкальский национальный парк (11 июля – 7 сентября 2019 г., площадь – 477,6 га)					
Оксид углерода (CO)	145072,3	Диоксид азота (NO ₂)	435,2	Акролеин (C ₃ H ₄ O)	434,6
Диоксид углерода (CO ₂)	145072,3	Диоксид серы (SO ₂)	107,5	Ацетон (C ₃ H ₆ O)	1159,0
Сажа (С)	11821,1	Сероводород (H ₂ S)	107,5	Ацетальдегид (C ₂ H ₄ O)	9561,6
		Формальдегид (HCHO)	107,5		
		Уксусная кислота (CH ₃ COOH)	107,5		
Забайкальский национальный парк (24 июня – 25 июля 2020 г., площадь – 4065,4,6 га)					
Оксид углерода (CO)	1232146,0	Диоксид азота (NO ₂)	3696,6	Акролеин (C ₃ H ₄ O)	369,1
Диоксид углерода (CO ₂)	1232146,0	Диоксид серы (SO ₂)	912,7	Ацетон (C ₃ H ₆ O)	9843,5
Сажа (С)	100395,4	Сероводород (H ₂ S)	912,7	Ацетальдегид (C ₂ H ₄ O)	81209,1
		Формальдегид (HCHO)	912,7		
		Уксусная кислота (CH ₃ COOH)	912,7		

Примечание: Пустые ячейки в таблице обусловлены различным компонентным составом эмиссий, поступающих в атмосферный воздух при сжигании древесины и ЛГМ. Суммарная масса токсикантов (общая масса токсиканта, попавшего в атмосферу M_i) была рассчитана по следующим веществам: оксид углерода (CO), диоксид углерода (CO₂), сажа (С).

Закключение

Проведенные расчеты позволяют сделать вывод о том, что масса токсикантов, попавших в атмосферу зависит от площади, пройденной пожаром. Можно заметить, что наибольшие значения выбросов, которые выделились при горении древесины и ЛГМ на территориях лесничеств Баргузинского западника и Забайкальского национального парка, пришлось на оксид углерода, диоксид углерода, сажу.

Масса выделившихся загрязняющих веществ при горении древесины, намного больше, чем при горении ЛГМ (в среднем в 11,5 раза). В то же время при горении древесины наибольшим значением массы обладает вещество ацетальдегид, которое относится к I классу опасности.

Список литературы

1. Гармышев В. В., Зырянов В. С., Матюшин В. П. Экологические последствия лесных пожаров на территории Иркутской области. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2009. 145 с.
 2. Булышко М. Ю., Гришин А. М. Методика определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров. М., 1997. 13 с.
 3. Тимофеева С. С., Гармышев В. В. Экологические последствия лесных пожаров на территории Иркутской области // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21, № 3.
-

УДК 551.510.42(571.53)

Сравнительный анализ выбросов парниковых газов при захоронении твердых коммунальных отходов на объектах размещения отходов и при сжигании

А. М. Кумукова (alinakumukova00@gmail.com), А. П. Таюрская (ann.tayurskay21@gmail.com)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Представлена теоретическая и нормативно-правовая база в области учета выбросов парниковых газов (ПГ). Произведен расчет выбросов при захоронении и сжигании твердых коммунальных отходов (ТКО) от полигона ТКО г. Иркутска, эксплуатируемого АО «Спецавтохозяйство». Расчеты выполнены на основании методики, утвержденной Приказом Минприроды РФ № 371 от 7 мая 2022 г. «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов», за период с 2002 по 2022 г. После расчетов проведен сравнительный анализ массы выбросов ПГ при различных видах обращения с ТКО.

Ключевые слова: парниковые газы, твердые коммунальные отходы, полигон ТКО, выбросы парниковых газов, захоронение отходов, сжигание отходов.

Введение

Парниковые газы – газообразные вещества природного или антропогенного происхождения, которые поглощают и переизлучают инфракрасное излучение [5].

По данным докладов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), выбросы парниковых газов являются одной из причин изменения климата Земли.

Одним из источников образования парниковых газов (а именно метана) являются полигоны твердых коммунальных отходов (ТКО). В Российской Федерации ежегодно образуется более 48 млн т ТКО, при этом захоронению подлежит 91 % ТКО.

Согласно Национальному проекту «Экология» к 2030 г. необходимо обеспечить 100 % сортировку ТКО и снижение объемов отходов, направляемых на полигоны в 2 раза.

Альтернативным методом обращения с ТКО является утилизация (сжигание) – процесс, который также сопровождается выбросами парниковых газов. Согласно Федеральному проекту «Комплексная система обращения с твердыми коммунальными отходами» к 2024 г. доля ТКО, направленных на утилизацию, в общем объеме образования должна составить 36 %, к 2023 г. – 33 %. Согласно данным, представленным публично-правовой компанией «Российской экологический оператор» (ППК «РЭО») за 3 квартал 2023 г. доля ТКО, направленных на утилизацию, составила 12,6 %.

Полигон ТКО г. Иркутска АО «Спецавтохозяйство» является единственным объектом размещения отходов в городе Иркутске и Иркутском районе. При этом его эксплуатационный срок ограничен 2025 г., а заполняемость составляет 92 % от проектной мощности.

В 2021 г. разработана Стратегия социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года, годом ранее (2020) Указ Президента РФ «О сокращении выбросов парниковых газов», документы разработаны в ответ на принятие Парижского соглашения.

С 2021 г. на территории Сахалинской области проводится эксперимент по квотированию и сокращению выбросов парниковых газов. К концу 2025 г. Сахалинская область хочет достичь углеродной нейтральности – антропогенные выбросы парниковых газов в регионе должны стать меньше или равны поглотительной способности местных экосистем. В случае расширения эксперимента на территорию Иркутской области, появится необходимость расчета выбросов парниковых газов для всех объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду (в том числе для полигонов ТКО).

Таким образом расчет выбросов парниковых газов при захоронении ТКО на объектах размещения отходов и при сжигании того же количества отходов, а также сравнения полученных массы выбросов на предмет более рационального обращения с отходами с экологической точки зрения является актуальным.

Теоретические основы

К парниковым газам относятся следующие вещества: диоксид углерода (CO_2), метан (CH_4), закись азота (N_2O), трифторид азота (NF_3), гексафторид серы (SF_6), перфторуглероды (ПФУ), гидрофторуглероды (ГФУ) [5].

Для удобства сумма парниковых газов выражается в CO_2 -эквиваленте. Пересчет в CO_2 -эквивалент проводится путем умножения выбросов парникового газа на значение потенциала глобального потепления (например, для метана он составляет 25, а для закиси азота – 298).

В соответствии со своими обязательствами, как страны-участницы Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН), относящейся к Приложению I, в которое входят развитые страны и страны с переходной экономикой,

Российская Федерация ежегодно представляет в секретариат РКИК ООН подробный Доклад, содержащий данные об антропогенных источниках и стоках парниковых газов, детализированные в соответствии с требованиями Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) по секторам: «Энергетика», «Промышленные процессы», «Использование растворителей и другой продукции», «Сельское хозяйство», «Отходы» и «Землепользование, изменение землепользования и лесное хозяйство».

Кроме того, учет выбросов в соответствии с Федеральным законом № 296-ФЗ от 02.07.2021 г. «Об ограничении выбросов парниковых газов», проводят юридические лица и индивидуальные предприниматели, у которых в результате хозяйственной деятельности образуется 50 и более тысяч тонн CO₂-эквивалент в год. Они ежегодно представляют отчеты о выбросах парниковых, которые содержат информацию о массе выбросов парниковых газов, образовавшихся в результате хозяйственной и иной деятельности, за календарный год, а также исходные сведения, на основании которых определена масса этих выбросов.

В целом выбросы от обращения с отходами в Российской Федерации составляют около 5 % от общего количества парниковых газов (2156,2 млн т CO₂-экв. в 2021 г.) [3].

Основным парниковым газом, который образуется при захоронении отходов на полигонах, является метан.

Одним из альтернативных способов обращения с отходами является утилизация отходов – сжигание, связанное с использованием твердых коммунальных отходов в качестве возобновляемого источника энергии (вторичных энергетических ресурсов), и (или) обеззараживание на специализированных установках [6].

В настоящее время в России на установках, производственно-технологических комплексах и мусоросжигательных заводах используют различные технологии термического обезвреживания отходов, в основе которых используются сжигание, пиролиз и газификация.

Существенными экологическими аспектами утилизации и обезвреживания отходов термическими способами являются [1]:

- выбросы в атмосферу, состав и уровень которых существенно зависит от групп видов утилизируемых и обезвреживаемых отходов и их компонентного состава;
- количество и классы опасности отходов, которые образовались в результате утилизации и обезвреживания (термического разложения);
- уровень потребления энергоресурсов, который также в значительной степени зависит от групп видов утилизируемых и обезвреживаемых отходов.

Нормативно-правовая база

Нормативно-правовая база учета выбросов парниковых газов (ПГ) в Российской Федерации основывается на ряде нормативно-правовых актах: Указ Президента № 812 от 26 октября 2023 г. «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации», Указ Президента № 666 от 4 ноября 2020 г. «О сокращении выбросов парниковых газов», Федеральный закон № 296-ФЗ от

02 июля 2021 г. «Об ограничении выбросов парниковых газов», Распоряжения Правительства.

Первая Климатическая доктрина Российской Федерации утверждена Распоряжением Президента РФ № 861-рп от 17 декабря 2009 г. и представляет систему взглядов на цель, принципы, содержание и пути реализации единой государственной политики РФ внутри страны и на международной арене по вопросам, связанным с изменениями и их последствиями.

На данный момент Климатическая доктрина утверждена Указом Президента № 812 от 26 октября 2023 г.

Указ Президента № 666 от 4 ноября 2020 г. «О сокращении выбросов парниковых газов» (Указ) в целях реализации Российской Федерацией Парижского соглашения от 12 декабря 2015 г. постановляет Правительству РФ обеспечить к 2030 г. сокращение выбросов парниковых газов до 70 % относительно уровня 1990 г., разработать с учетом особенностей отраслей экономики Стратегию социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года и обеспечить создание условий для реализации мер по сокращению и предотвращению выбросов парниковых газов, а также по увеличению поглощения таких газов.

В целях создания условий для устойчивого развития и сбалансированного развития экономики Российской Федерации при снижении уровня выбросов ПГ был принят Федеральный закон № 296-ФЗ от 2 июля 2021 г. «Об ограничении выбросов парниковых газов».

Полигон ТКО г. Иркутска

Полигон ТКО г. Иркутска (далее – полигон) эксплуатируется АО «Спецавтохозяйство». Объект внесен в Государственный реестр объектов размещения отходов № 38–00033-3-00758–281114 (приказ о включении № 758 от 28 ноября 2014). АО «Спецавтохозяйство» имеет лицензию на деятельность по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию, размещению отходов I – IV классов опасности № Л020–00113–38/00099780 от 30.01.2018 г. Полигон внесен в реестр объектов негативного воздействия на окружающую среду (НВОС) № 25–0138–001506-П, объект имеет I категорию, уровень надзора – федеральный [4; 7].

Полигон расположен по адресу: г. Иркутск, 5 км Александровского тракта, верховье пади Сумской. Территория городского полигона ТКО занимает общую площадь 41,8767 га и расположена в Иркутском административном районе, к северу от г. Иркутска. Захоронение отходов на участке, занимаемом полигоном, началось в 1963 г. Свидетельство о государственной регистрации права на право собственности на землю выдано 14 января 2011 г. Управлением Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии по Иркутской области с целью организации полигона по захоронению коммунальных отходов с общей площадью 41,8767 га. Проектный объем составляет 40 млн м³, на данный момент заполняемость составляет 92 % [8; 9].

Полигон АО «Спецавтохозяйство» г. Иркутска – единственный городской полигон твердых коммунальных отходов, принимающий 100 % от общей массы образующихся отходов в городе Иркутск и Иркутского района (включающий 21 муниципалитет) [9].

Материалы и методы

Расчеты произведены на основании методики, утвержденной Приказом Минприроды РФ № 371 от 7 мая 2022 г. «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» (Методика).

Наиболее ранние данные о количестве захораниваемых отходов (2000–2009 гг.) взяты в диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук Заборцевой Т. И. «Средозащитная инфраструктура в территориальной организации Байкальского региона» (диссертация Заборцевой Т. И.). Масса размещаемых отходов за 2010–2013 гг. отражена в инвестиционной программа АО «Спецавтохозяйство» г. Иркутска «Развитие системы утилизации (захоронения) твердых коммунальных отходов города Иркутска» на 2013–2016 гг. Данные о массе размещаемых ТКО на полигоне за 2014–2022 гг. были предоставлены АО «Спецавтохозяйство».

Расчет выполнен с 2002 по 2022 г. (21 год), так как согласно Методике, для получения приемлемых по точности результатов необходимо использовать исторические данные об удалении отходов за период, насчитывающий от 3 до 5 «периодов полураспада».

Период полураспада зависит от среднегодовой температуры и соотношения среднегодовой нормы осадков к потенциальной эвапотранспирации. Среднегодовая температура для г. Иркутск составляет +1,425 °С, среднегодовая норма осадков – 477 мм [2]. Потенциальная эвапотранспирация для Байкальского региона имеет значение 472,11 мм/год [10]. Согласно данным показателям г. Иркутск расположен в климатической умеренной зоне влажной подзоне, т. е. период полураспада для ТКО равен 7 лет.

Данные о компонентном составе ТКО с 2002 по 2006 г. использованы согласно Методике, с 2007 г. состав отхода принят на основании исследований, приведенных в диссертации Заборцевой Т. И.

Значение доли способного к разложению органического углерода в многокомпонентных отходах использовано для сухих отходов, тип объекта размещения – управляемый анаэробный (отходы поступают на специальные площадки, на которых в той или иной мере имеются контролируемая «продувка» отходов и контролируемая защита от возгорания и при этом осуществляется их механическая спрессовка).

Результаты расчетов

Расчет выбросов парниковых газов при захоронении ТКО на объекте размещения отходов (полигон г. Иркутска) произведен согласно Методике, результаты представлены в табл. 1.

Масса выбросов метана за период 2002–2022 гг. составила 19328,330 тыс. т CO₂-экв. Масса выбросов напрямую зависит от массы размещаемых отходов, причем наибольший прирост массы выбросов наблюдается на следующий год после захоронения наибольшей массы отходов за рассматриваемый период. Наибольший прирост массы выбросов наблюдается в 2019 г. – 118,455 тыс. т CO₂-экв, что сопоставимо с наибольшей массой захороненных отходов в 2018 г.

Также на массу выбросов влияет процентное соотношение компонентов в отходах. Источником метана являются биоразлагаемые фракции отходов (содержащие наибольшую долю способного к разложению органического углерода), поэтому при неизменной массе захораниваемых отходов, но увеличении процента содержания таких компонентов как бумага, древесина, пищевые отходы и текстиль масса выбросов метана возрастает.

Таблица 1
Результаты расчетов парниковых газов при захоронении ТКО

Год	Выбросы CH ₄ , тыс. т	Выбросы, тыс. тCO ₂ -экв
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
2002	0,000	0,000
2003	2,689	67,217
2004	5,512	137,796
2005	8,875	221,880
2006	13,282	332,061
2007	16,612	415,309
2008	20,270	506,760
2009	24,375	609,363
2010	28,700	717,511
2011	32,897	822,432
2012	37,116	927,892
2013	41,348	1033,710
2014	45,603	1140,066
2015	50,017	1250,425
2016	52,731	1318,284
2017	56,157	1403,927
2018	60,026	1500,652
2019	64,764	1619,107
2020	68,030	1700,757
2021	70,367	1759,178
2022	73,760	1844,003
Всего	773,133	19328,330

Результаты расчета выбросов парниковых газов при сжигании ТКО для различных технологий представлен в табл. 2.

Инсинерация – термический метод обезвреживания отходов с использованием большой печи для сжигания отходов – инсинератора. Поскольку процесс утилизации происходит в специализированном оборудовании, это позволяет добиться максимальной производительности.

Инсинерация может осуществляться в печах постоянного и полупостоянного режима или в печах периодического действия.

Таблица 2

Результаты расчетов парниковых газов при сжигании ТКО

Год	Открытое сжигание			Печи постоянного и полупостоянного режима			Печи периодического действия		
	CO ₂ , тыс. т	N ₂ O, тыс. т	тыс. т CO ₂ -эquiv	CO ₂ , тыс. т	N ₂ O, тыс. т	тыс. т CO ₂ -эquiv	CO ₂ , тыс. т	N ₂ O, тыс. т	тыс. т CO ₂ -эquiv
2002	20,490	0,020	25,960	35,320	0,010	37,980	35,320	0,010	37,980
2003	21,510	0,020	27,960	37,090	0,010	39,980	37,090	0,010	39,980
2004	31,750	0,030	40,940	54,750	0,010	57,980	54,750	0,010	57,980
2005	46,090	0,040	57,920	79,470	0,010	81,980	79,470	0,020	84,960
2006	34,830	0,030	43,940	60,050	0,010	62,980	60,050	0,010	62,980
2007	42,000	0,040	53,920	72,410	0,010	74,980	72,410	0,020	77,960
2008	47,120	0,040	58,920	81,240	0,010	83,980	81,240	0,020	86,960
2009	49,660	0,050	64,900	85,630	0,020	91,960	85,630	0,020	91,960
2010	48,180	0,050	62,900	83,070	0,020	88,960	83,070	0,020	88,960
2011	48,430	0,050	62,900	83,500	0,020	88,960	83,500	0,020	88,960
2012	48,590	0,050	63,900	83,780	0,020	89,960	83,780	0,020	89,960
2013	48,841	0,046	62,559	84,210	0,020	89,960	84,210	0,020	89,960
2014	50,680	0,050	65,900	87,380	0,020	89,960	87,380	0,020	92,960
2015	31,160	0,030	39,940	53,730	0,010	56,980	53,730	0,010	56,980
2016	39,330	0,040	50,920	67,810	0,010	70,980	67,810	0,010	70,980
2017	44,420	0,040	55,920	76,580	0,010	79,980	76,580	0,020	82,960
2018	54,400	0,050	68,900	93,790	0,020	99,960	93,790	0,020	99,960
2019	37,500	0,040	48,920	64,650	0,010	67,980	64,650	0,010	67,980
2020	26,830	0,030	35,940	46,260	0,010	48,980	46,260	0,010	48,980
2021	38,950	0,040	50,920	67,160	0,010	69,980	67,160	0,010	69,980
2022	43,250	0,040	54,920	74,570	0,010	77,980	74,570	0,020	80,960
Всего	854,011	0,826	1098,999	1472,450	0,280	1552,440	1472,450	0,330	1570,340

Открытое сжигание – это старый способ утилизации твердых бытовых отходов, который постепенно выводится из эксплуатации. Открытое сжигание ТКО является потенциальным неточечным источником выбросов.

При сжигании отходов наибольший вклад в загрязнении атмосферного воздуха вносит углекислый газ (метана выделяется в несколько раз меньше).

Наименьшее количество парниковых газов образуется при сжигании открытым способом – 1098,999 тыс. т CO₂-эquiv (в 1,4 раза меньше, чем при других технологиях сжигания).

Расчеты показали, что при сжигании всех отходов, которые были захоронены на полигоне ТКО г. Иркутска в период с 2002 по 2022 г., выделилось бы от 1098,999 до 1570,340 тыс. тCO₂-эquiv парниковых газов (в зависимости от выбранного метода сжигания).

При сжигании отходов, большая часть содержащегося в них углерода окисляется до CO₂. Незначительная часть С может окислиться не полностью в связи с недостатками процесса сжигания, в результате часть его не сгорает или частично окисляется до золы.

Предполагается, что у мусоросжигательных печей эффективность близка к 100 %, в то время как эффективность открытого сжигания значительно ниже. Поэтому при открытом сжигании образуется меньше CO₂, чем при инсинерации.

При этом N_2O наоборот образуется больше при открытом сжигании, так как при инсинерации возможно применение очистки. При необходимости, коэффициенты выбросов N_2O получаются из измерений выбросов. Коэффициенты выбросов N_2O отражают технологию очистки выбросов и отличаются в зависимости от предприятия и химического состава сжигаемых отходов.

Динамика выбросов ПГ по годам непосредственно коррелирует с массой отходов (чем больше отходов, тем больше и выбросы ПГ).

Выводы

Согласно произведенным расчетам, масса выбросов парниковых газов за период 2002–2022 гг. при захоронении отходов на полигоне ТКО г. Иркутска составила 19328,330 тыс. т CO_2 -экв, что в 12 раз больше, чем при сжигании аналогичной массы отходов в мусоросжигательных печах, и в 17,6 раз больше, чем при открытом сжигании.

При горении в основном образуются диоксид углерода, вода и зола. Сера и азот, содержащиеся в отходах, образуют при сжигании различные оксиды, а хлор восстанавливается до HCl . Помимо газообразных продуктов при сжигании отходов образуются и твердые частицы – металлы, стекло, шлаки и др., а также вещества первого класса опасности, например, бенз(а)пирен.

Список литературы

1. ИТС 9–2020 Утилизация и обезвреживание отходов термическим способом. М.: Бюро НДТ, 2020. 208 с.
2. Климат Иркутска. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/30710.htm> (дата обращения: 03.11.2023).
3. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2022 гг. М., 2023. Ч. 1. 497 с.
4. О включении объектов размещения отходов в государственный реестр объектов размещения отходов: приказ Федеральной службы по надзору в сфере природопользования от 28.11.2014 № 758 // КонсультантПлюс : справ. поисковая система.
5. Об ограничении выбросов парниковых газов : федер. закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ // КонсультантПлюс : справ. поисковая система.
6. Об отходах производства и потребления : федер. закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ // КонсультантПлюс : справ. поисковая система.
7. Полигон ТКО г. Иркутска. URL: https://uonvos.rpn.gov.ru/rpn/ptouonvos/onv_registry/card/121105/review (дата обращения: 15.11.2023).
8. Об утверждении инвестиционной программы муниципального унитарного предприятия «Спецавтохозяйство» г. Иркутска «Развитие объектов и системы захоронения твердых коммунальных отходов города Иркутска на 2013–2021 годы»: решение Думы г. Иркутска от 27.06.2013 № 005–20–480796/3.
9. Территориальная схема обращения с отходами в Иркутской области, 2023 год. URL: <https://cloud.mail.ru/public/HJvP/KNjs8схуq> (дата обращения: 15.11.2023).
10. Malinin V, Gordeeva S, Mitina J. Assessment of Interannual Variability of Moistening of Siberian Territory According to Observational Data // Water. 2021. Vol.13, N 16. Art. 2200.

УДК 556.121(575.1)

Атмосферные осадки как приходная часть водного баланса среднего Зеравшана

В. А. Мирзоев (vagif1976@mail.ru)^{1,2}, Е. В. Гайдукова (oderiut@mail.ru)¹

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург;

²Областное управление по гидрометеорологии, г. Самарканд

Аннотация. Водные ресурсы играют фундаментальную роль в жизни человечества и экологическом равновесии. В частности, р. Зеравшан, одна из крупнейших в Центральной Азии, имеет огромное значение для региона. Она обеспечивает пресной водой множество городов, а также сельское хозяйство и промышленность. Однако водный ресурс р. Зеравшан зависит от различных факторов, и одним из ключевых являются атмосферные осадки. Река Зеравшан и ее бассейн охватывают территории Таджикистана и Узбекистана, а также некоторых других соседних стран в Центральной Азии. Цель исследования заключается в подробном изучении режима выпадения атмосферных осадков в бассейне р. Зеравшан (за период с 2000 по 2020 г.), так как именно осадки выступают приходной частью в уравнении водного баланса с любой временной дискретизацией. Уравнение водного баланса позволяет анализировать процессы формирования стока и испарения на речных водосборах.

Ключевые слова: режим осадков, бассейн реки Зеравшан, уравнение водного баланса, Узбекистан.

Введение

В бассейне р. Зеравшан основной сток формируется на территории Таджикистана и практически полностью поступает в Узбекистан в районе Рават–Ходжиинской плотины. В бассейне р. Зеравшан на территории республики Узбекистан выделяется два гидрологических района, сравнительно многоводный юго-восточный угол (северные склоны отрогов Зеравшанского хребта) и маловидные бассейны рек хребтов Нуратау, Актау и Каратау (реки правого берега Зеравшана) (рис. 1).



Рис. 1. Физико-географическая карта среднего Зеравшана

По характеру внутригодового распределения стока все реки этого бассейна относятся к рекам со снегово-дождевым типом питания. Кроме того, характерной особенностью рек бассейна является прохождение дождевых паводков в январе и декабре. Половодья от таяния снегов и выпадения дождей проходит в

марте–мае, на фоне которых могут проходить сели. По этой причине суточные гидрографы стока года имеют многопиковый вид с периодом межени с июня по ноябрь.

В течение всего года атмосферные осадки играют важную роль в формировании речного стока, влияя на изменение внутригодового его распределения [1].

Цель исследования заключается в подробном изучении режима выпадения атмосферных осадков в бассейне р. Зерафшан (за период с 2000 по 2020 г.), так как именно осадки выступают приходной частью в уравнении водного баланса с любой временной дискретизацией. Уравнение водного баланса позволяет не только анализировать процессы формирования стока и испарения на речных водосборах, но при определенных условиях становится уравнением с прогностическими свойствами [5].

В исследовании использовались данные Управления гидрометеорологической службы Узбекистана, информация по наблюдениям на метеостанциях в бассейне р. Зерафшан [6].

Описание режима выпадения атмосферных осадков в бассейне р. Зерафшан

Атмосферные осадки, представляющие приходную часть водного баланса, в зависимости от характера их выпадения делят на четыре вида: 1) обложные, выпадающие из фронтальных слоисто-дождевых облаков; 2) ливневые, выпадающие из кучево-дождевых облаков; 3) обложные, переходящие в ливневые, и наоборот, выпадающие из слоисто-дождевых и высоко-слоистых с замаскированными кучево-дождевыми облаками (при прохождении такой облачной системы отмечается непрерывный переход обложных осадков в ливневые, и наоборот); 4) обложные и ливневые, выпадающие раздельно из слоисто-дождевых и высоко-слоистых и кучево-дождевых облаков, связанных с различными синоптическими образованиями.

На среднем Зеравшане с октября по март преобладают обложные осадки. Наибольшая их повторяемость приходится на декабрь – январь (92–93 %). Довольно часто они отмечаются в начале весны (март) и в конце осени (ноябрь). Их повторяемость составляет 78 и 84 % соответственно. В летний период осадки обложного характера отмечаются редко. В июле их повторяемость составляет только 8 %. В этот период преобладают осадки ливневого характера (85–92 %). В зимние месяцы (декабрь – январь) ливневые осадки отмечаются в 7–8 % случаев.

Осадки, выпадающие в ночные и дневные часы, почти не различаются по видам. Некоторое увеличение обложных осадков в дневные часы отмечается в мае – июне (42–46 %), а ливневых – в июле – августе (61–70 %). Обложные и ливневые осадки на данной территории характеризуются преимущественно небольшой продолжительностью (6 ч и менее). Их повторяемость составляет 62,6 и 84,7 % соответственно. В отдельные годы продолжительность обложных осадков может достигать 60 ч и более, ливневых 12–18 ч.

Средняя годовая суммарная продолжительность осадков (независимо от их вида) составляет около 490 ч. Наибольшая их продолжительность отмечается в зимние и весенние месяцы, максимум приходится на март (97 ч). В отдельные годы продолжительность осадков может значительно возрастать по сравнению с многолетней нормой, так, например, в 2002 г. суммарная продолжительность осадков составила 741 ч.

Осадки данного региона характеризуются небольшой интенсивностью. Их количество в течение года изменяется от 0,01 до 0,03 мм/мин. В отдельные годы интенсивность осадков может увеличиваться. В весенние месяцы и летом, когда чаще наблюдаются осадки ливневого характера, интенсивность их может достигать 0,13–0,21 мм/мин.

В течение всего года за исключением января, преобладают жидкие осадки. В среднем за год их выпадает 66 %. В зимний период жидкие осадки составляют 39–42 % всех остальных видов. В январе чаще всего (41 %) отмечаются смешанные осадки. Для годового хода осадков характерно их преобладание в зимне-весенний период, максимум приходится на апрель (143 мм), минимум – на июнь – сентябрь (0,0 мм). В холодное полугодие (ноябрь–март) выпадает осадков в 2 раза больше, чем в теплое (апрель–октябрь). Среднее годовое количество осадков равно 334 мм.

Годовые и месячные количества осадков подвержены значительным колебаниям из года в год, например, в 2002 г. выпало за год 564 мм осадков при норме 334 мм. Значительные отклонения от нормы наблюдались в зимние и весенние месяцы. Отдельные годы характеризуются большой засушливостью. Так, в 2001 г. выпало за год только 158 мм осадков, а в январе 2014 г. всего 1,3 мм. Диапазон колебаний между наибольшими и наименьшими средними значениями осадков в зимние месяцы достигает 63–107 мм, весной 89–133 мм. В табл. 1 представлены экстремальные значения количества осадков.

Таблица 1

Количество осадков R (мм) период с 2000 по 2020 г.

Месяцы	Показатель	R, мм	R _{max} , мм	Год	R _{min} , мм	Год
I		35,5	84,9	2004	1,3	2014
II		48,2	115	2015	16,4	2004
III		50,6	136	2013	23,8	2006
IV		57,5	142	2002	2,2	2001
V		25,9	69,9	2016	0,0	2000
VI		6,3	17,5	2016	0,0	2001
VII		1,6	13,3	2004	0,0	2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2012, 2014
VIII		1,4	15,4	2005	0,0	2003, 2004, 2007, 2015, 2016
IX		1,7	8,2	2006	0,0	2001, 2003, 2004, 2013, 2016
X		16,5	41,5	2015	0,7	2002
XI		4,6	119	2004	13,4	2010
XII		43,1	94,9	2002	0,3	2010
XI–III		223	409	2004	166	2008
IV–X		111	192	2007	72,4	2011
I–XII		334	565	2002	158	2001

Суточное количество осадков в годовом ходе изменяется от 1,4 мм в августе до 20,4 мм в марте. Суточный максимум осадков достигал 45 мм 19 апреля 2002 г. Особых различий в распределении значительных осадков по видам в дневные и ночные часы не обнаруживается. В таблице 2 приведен годовой ход числа дней с различным количеством осадков (от 0,1 до 30 мм и более). Анализ данных показывает, что в течение года чаще отмечаются осадки менее 1 мм. Их повторяемость в среднем за год составляет 81 %. Число дней с осадками по мере увеличения градаций уменьшается. Осадки более 30 мм отмечаются не ежегодно (в среднем три раза в 10 лет).

Таблица 2

Информация о количестве осадков и их интенсивности
(метеостанция Самарканд, 2000–2020 гг.)

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Число дней с осадками определенного количества												
0,0–1,0 мм	55	24	25	32	41	13	10	11	14	34	34	46
1,0–10,0 мм	37	27	40	27	12	3	4	5	2	25	24	29
10,0–20,0 мм	6	5	17	3	1					2	9	7
20,0–30,0 мм			2	2								
30,0–40,0 мм			1	2								

Если за 12 ч и менее при дожде выпадает 9 мм, а при снеге 5 мм осадков, то такие осадки считаются значительными, а если за такое же время при дожде выпадает 30 мм, а при снеге 20 мм, то такие осадки называются сильными. К сильным осадкам относятся и ливневые дожди, если количество выпавших осадков за 1 ч и менее превышает 30 мм. Значительные и сильные осадки представляют собой опасные явления погоды, причиняющие ущерб различным отраслям народного хозяйства.

Годовой ход количества осадков по градациям аналогичен годовому ходу средних месячных сумм осадков. В течение года осадки выпадают неравномерно. Периоды с осадками чередуются с длительными периодами без дождя.

Особенности атмосферной циркуляции таковы, что летний период и начало осени характеризуются длительным бездождем. Бездождевой период характерен продолжением между последним весенним и первым осенним дождем. Средняя продолжительность бездождевого периода составляет 145 дней. Наибольшая продолжительность достигала 219 дней (с 9 мая по 13 сентября 2001 г.). Весной и осенью перерывы между отдельными дождями составляют 21–26 дней соответственно.

Заключение

В статье была представлена важная роль атмосферных осадков в водном балансе р. Зеравшан. Они обеспечивают водность реки, поддерживают экосистемы и удовлетворяют потребности людей. Понимание этой роли является ключевым элементом управления водными ресурсами в регионе.

В статье также отмечено влияние антропогенного воздействия на атмосферные осадки в бассейне р. Зеравшан и его последствия. Это включает в себя

изменения в климате, а также антропогенное загрязнение, которые могут оказывать влияние на качество и количество атмосферных осадков [2; 3; 4]. Управление атмосферными осадками и водным балансом р. Зеравшан является неотъемлемой частью обеспечения устойчивости использования водных ресурсов в этом регионе.

Следует отметить значение сотрудничества между странами, расположенными в бассейне р. Зеравшан, для совместного управления водными ресурсами. Устойчивое управление водными ресурсами требует согласованных действий и стратегий для обеспечения устойчивости региона [5]. В целом статья подчеркивает важность понимания роли атмосферных осадков в водном балансе р. Зеравшан и предостерегает о влиянии антропогенного воздействия. Она также призывает к совместным усилиям в устойчивом управлении водными ресурсами для обеспечения будущей устойчивости и благополучия региона бассейна р. Зеравшан.

Список литературы

1. *Абдуллаев Х., Равшанов Н., Салимов М.* Анализ изменения осадков и рек в бассейне Зеравшан // Гидрологические исследования. 2008. № 32 (4). С. 462–474.
2. *Бобоев А., Иманкулов А.* Изменения климата и их влияние на атмосферные осадки в бассейне Зеравшан // Геоэкология и устойчивое развитие. 2016. № 12 (2). С. 121–132.
3. *Мамадишьева Д., Содикова Н., Ахмедов Т.* Антропогенное воздействие на качество атмосферных осадков в регионе бассейна Зеравшан // Экологическая безопасность и устойчивое развитие. 2020. № 8 (1). С. 45–56.
4. *Мирзоев А. И., Мирзоев В. А.* Изменение климата в Республике Узбекистан за последние 100 лет // Узбекистон географиянинг долбзарб муоммолари. Самарканд : Тип. СамГУ, 2009. № 191.
5. *Шарипова Г., Садиков Х., Исмаилов У.* Управление водным балансом реки Зеравшан: вызовы и перспективы // Водные ресурсы и устойчивое развитие. 2019. № 15 (3). С. 321–334.
6. UZHYDROMET. URL: <https://data.meteo.uz/> (дата обращения: 30.10.2023).

УДК 551.510.42(571.53)

Анализ количественных выбросов в городах – участниках федерального проекта «Чистый воздух» (Иркутская область)

А. П. Таюрская (ann.tayurskay21@gmail.com), А. М. Кумукова (alinakumukova00@gmail.com)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Представлена общая информация о федеральном проекте «Чистый воздух», который является частью национального проекта «Экология» и рассчитан на период до 2024 г. Количественные выбросы рассмотрены от предприятий, расположенных на территории городов – участников федерального проекта в Иркутской области (сбор информации проводился в период до 01.10.2023). Наибольшее количество загрязняющих веществ поступает в атмосферу в г. Ангарске, наименьшее – в г. Зиме. Проведен сравнительный анализ выбросов в зависимости от категорий объектов негативного воздействия на окружающую среду. Наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха в крупных городах-участниках Иркутской области вносят объекты I категории. Также проанализировано распределение выбросов от различных видов деятельности предприятий и учреждений. Наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха вносит производство электроэнергетики.

Ключевые слова: федеральный проект «Чистый воздух», снижение выбросов загрязняющих веществ, загрязнение атмосферного воздуха.

Национальный проект «Экология» – один из национальных проектов Российской Федерации, паспорт которого рассчитан на период с 2019 по 2024 г.

В 2021 г. в составе национального проекта «Экология» осуществлялась реализация мероприятий девяти федеральных проектов (далее – ФП), одним из которых является «Чистый воздух».

ФП «Чистый воздух» направлен на достижение следующих показателей:

– количество выданных комплексных экологических разрешений всем объектам, оказывающим значительное негативное воздействие на атмосферный воздух и реализующим программы повышения экологической эффективности с применением наилучших доступных технологий для снижения выбросов в крупных промышленных центрах Российской Федерации, включая города Братск, Красноярск, Липецк, Магнитогорск, Медногорск, Нижний Тагил, Новокузнецк, Норильск, Омск, Челябинск, Череповец, и Читы (25 ед.);

– количество объектов, оказывающих негативное воздействие на атмосферный воздух, прошедших модернизацию, в том числе и с использованием наилучших доступных технологий и/или с использованием инструментов зеленого финансирования в крупных промышленных центрах Российской Федерации, включая города Братск, Красноярск, Липецк, Магнитогорск, Медногорск, Нижний Тагил, Новокузнецк, Норильск, Омск, Челябинск, Череповец, и Читы (20 ед.);

– снижение совокупного объема выбросов на 20 %;

– количество городов с высоким и очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха в городах-участниках проекта (0 ед.);

– снижение совокупного объема выбросов опасных загрязняющих веществ в городах-участниках проекта на 20 %;
– численность населения, качество жизни которого улучшится в связи с сокращением объема вредных выбросов в крупных промышленных центрах Российской Федерации (4,34 млн человек) [1].

До 2023 г. городом – участником ФП из Иркутской области был только Братск.

С 1 сентября 2023 г. к федеральному проекту «Чистый воздух» подключились еще 29 новых городов с высоким и очень высоким уровнем загрязнения (в Иркутской области: Ангарск, Зима, Иркутск, Свирск, Усолье-Сибирское, Черемхово, Шелехов). Для новых участников федерального проекта установлена цель – снижение выбросов опасных загрязняющих веществ вдвое к 2030 г.

Достичь таких результатов планируется за счет модернизации промышленных предприятий и действующих котельных, перевода отопления в частных домовладениях с угля на более экологичное топливо, запуска общественного транспорта на электричестве и газомоторном топливе.

В каждом городе будут проведены сводные расчёты загрязнений и утверждён комплексный план по снижению выбросов в атмосферу. То есть для каждого города необходимо будет предусмотреть отдельные мероприятия, а для каждого загрязнителя – строгую ответственность за соблюдение экологических норм [3].

Ситуация в Иркутской области

В 2022 г. уровни загрязнения атмосферного воздуха в городах-участниках Иркутской области определен как очень высокий – в Братске, Зиме, Свирске, Усолье-Сибирском, Черемхово, Шелехове, как высокий – в Ангарске, Иркутске [2].

Согласно данным реестра объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду (далее – ОНВОС), количество ОНВОС в городах-участниках Иркутской области составляет 981. Их суммарные выбросы составляют более 480 072 т/год. В таблице представлено распределение количества ОНВОС, источников и суммарных выбросов по городам.

Таблица

Данные по городам

Город	Количество ОНВОС	Количество источников	Суммарные выбросы, т/год	Суммарные выбросы объектов 1 категории НВОС, т/год
Ангарск	199	4813	209870	204 988
Братск	58	1677	110843	97 440
Зима	53	422	1445	-
Иркутск	462	3802	81087	54219
Свирск	20	169	7108	-
Усолье-Сибирское	74	344	23401	18937
Черемхово	75	423	2808	4
Шелехов	40	811	43510	34 171
Всего	981	12461	480 072	409 759

Наибольшее количество загрязняющих веществ поступает в атмосферу в Ангарске – около 45 % от выбросов городов-участников. Процентное соотношение массы выбросов по городам представлено на рис. 1.

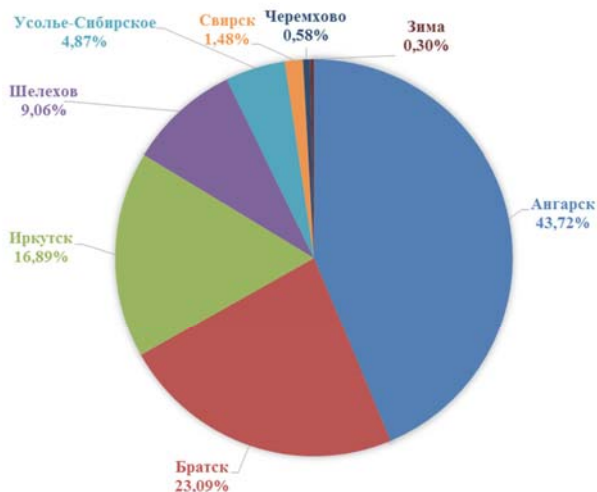


Рис. 1. Распределение массы выбросов по городам-участникам проекта «Чистый воздух»

Существенный вклад в загрязнение атмосферного воздуха в крупных городах вносят объекты первой категории НВОС (рис. 2).

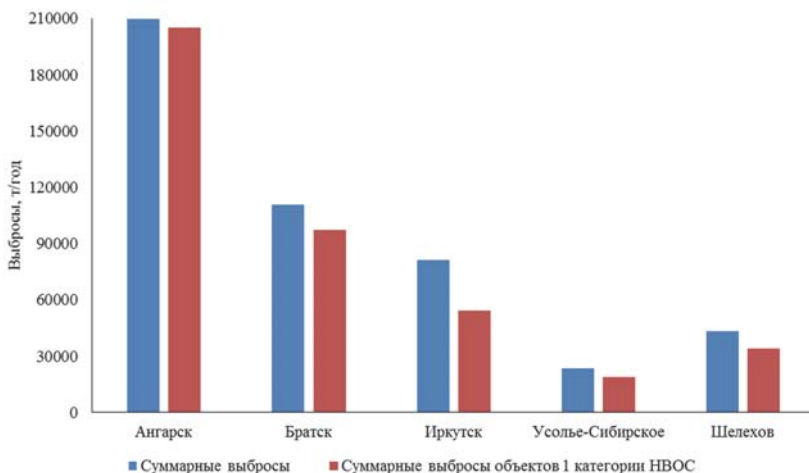


Рис. 2. Соотношение суммарных выбросов и выбросов от объектов 1-й категории НВОС

В г. Ангарске около 98 % выбросов приходится на объекты первой категории НВОС, в Братске – 87 %, в Усолье-Сибирском – 81 %, в Шелехове – 78 % и Иркутске – 67 %. В Зиме и Свирске объекты первой категории НВОС отсутствуют.

На рис. 3 представлено процентное распределение массы выбросов по видам деятельности организаций, эксплуатирующих данные объекты.

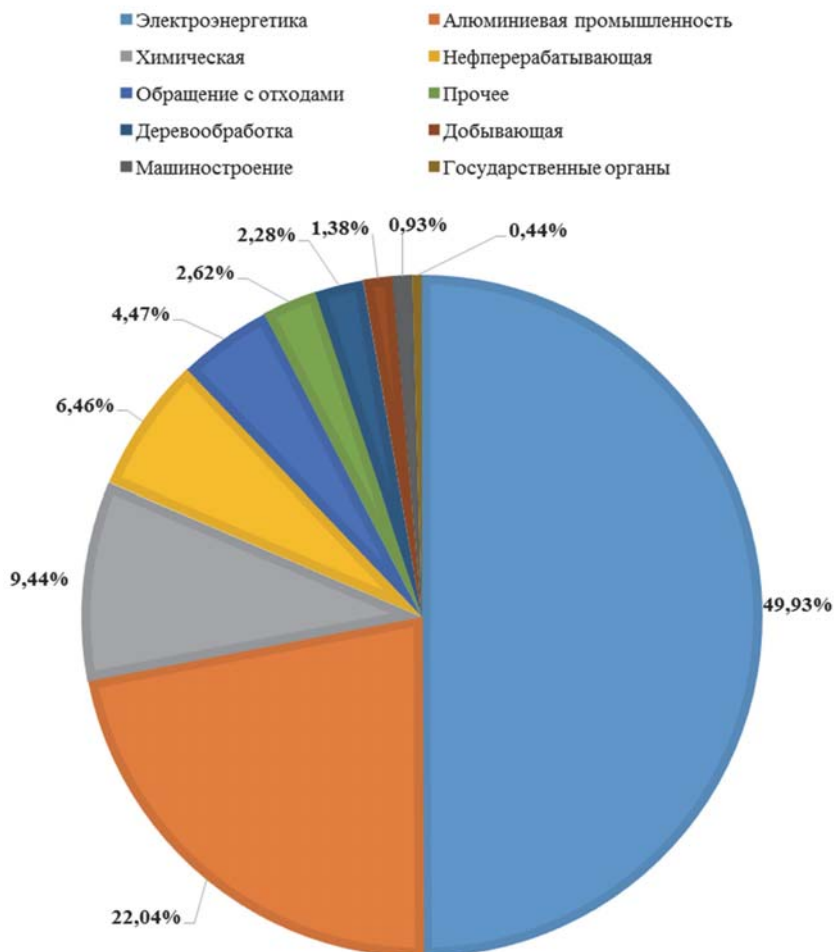


Рис. 3. Распределение массы выбросов по отраслям деятельности

Большая часть выбросов приходится на сектор производства электроэнергетики, в нее входят следующие крупные предприятия Иркутской области: ООО «Байкальская энергетическая компания» (Ново-Иркутская ТЭЦ, ТЭЦ-9 и ТЭЦ-10 в г. Ангарск), АО «БайкалЭнерго». На втором месте по массе выбросов расположена алюминиевая промышленность, которая представлена Публичным акционерным обществом «Русал Братский алюминиевый завод» в городах Братск и Шелехов. Химическая промышленность региона представлена АО «Ангарский завод полимеров», ООО «Ангарский азотно-туковый завод». В прочее входят следующие виды деятельности: транспорт, водоснабжение и водоотведение, топливная энергетика, строительство, животноводство, пищевая промышленность, услуги и др.

Так как для новых участников федерального проекта установлена цель – снижение выбросов опасных загрязняющих веществ вдвое к 2030 г., это означает, что совокупные выбросы в Иркутске, Ангарске, Свирске, Зиме, Шелехово, Усоле-Сибирском, Черемхово на 1 октября 2023 г. должны уменьшиться примерно на 184 615 т в год. А в Братске к 2024 г. запланировано снижение выбросов на 20 %, т. е. уменьшение на 22 168 т в год.

Список литературы

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2022 году». Иркутск : ООО «Максима», 2023. 285 с.
2. Информация о состоянии загрязнения окружающей среды. URL: <https://www.irmeteo.ru/index.php?id=5> (дата обращения: 01.10.2023).
3. Минприроды РФ. URL: https://www.mnr.gov.ru/press/75-let-pobedy/zakonov_mnogo_priroda_odna_s_1_sentyabrya_vstupili_v_silu_bolshe_30_novell_ekologicheskogo_regulirov/ (дата обращения: 01.10.2023).



СЕКЦИЯ

**ОПАСНЫЕ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ
ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ**



УДК 551.583(612)

Динамика средиземноморского циклона «Даниэль» в период катастрофического наводнения в Ливии

И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru), К. А. Лощенко (loshchenko@bk.ru),
С. Ж. Воложжина (svologzhina@gmail.com), М. М. Кузнецов

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Выполнен синоптический и метеорологический анализ условий развития средиземноморского циклона «Даниэль», который сопровождался выпадением экстремального количества атмосферных осадков в Ливии в сентябре 2023 г. и имел разрушительные последствия. Адвективно-динамические и вихревые факторы циклогенеза были проанализированы по данным приземных и высотных карт погоды Гидрометцентра России, изменения метеорологических параметров в циклоне на разных стадиях его жизненного цикла рассмотрены по результатам численной модели GFS. По данным спутникового мониторинга выделены особенности облачного покрова, которые сопоставлены с количественными показателями влагосодержания облаков. Основное внимание уделялось сопоставлению метеорологических характеристик с изменением глубины циклона и вариациями метеорологических параметров у поверхности Земли и ветровых потоков на уровне изобарической поверхности АТ-500 гПа, которая характеризует направленность господствующих потоков в средней тропосфере и позволяет оценить сдвиговую составляющую скорости ветра в слое активного облакообразования.

Ключевые слова: средиземноморский циклон, климат, аномалии, температура, влагосодержание, кинетическая энергия, адвекция, скорость ветра, направление ветра.

Введение

По данным Росгидромета, наводнениям подвержены около 500 тыс. км², наводнениям с катастрофическими последствиями приблизительно 150 тыс. км², где расположены порядка 300 городов, десятки тысяч населенных пунктов, большое количество хозяйственных объектов, более 7 млн га сельхозугодий [1].

Наводнения являются не только следствием естественных причин, но и разнообразной хозяйственной деятельности, что требует постоянного мониторинга [4]. Среди естественных факторов существенный вклад в формирование благоприятных условий для летних паводков и наводнений вносят синоптические и крупномасштабные циркуляционные процессы. Интенсивность наводнений и связанные с ними последствия напрямую зависят от влагосодержания атмосферы, которое определяет характер и продолжительность выпадения атмосферных осадков с учетом особенностей региональных и крупномасштабных форм атмосферной циркуляции [2]. Например, в центральных районах Ирана в 25 % случаев причиной наводнений являются обильные осадки, которые связывают с проявлением в Тихом океане Эль-Ниньо и Ла-Нинья, в остальных случаях с вовлечением большого количества водяного пара при прохождении средиземноморских циклонов [3].

Одним из таких средиземноморских циклонов был циклон «Даниэль», который 10 сентября 2023 г. обрушился на Ливию. От удара стихии пострадали в основном прибрежные города Дерна, Джабаль аль-Ахдар, Суса и Бенгази.

В Дерне были разрушены две плотины. Одно из самых пугающих последствий в Сусе – загрязнение воды и окружающей среды. В этой связи возник интерес к изучению погодных и циркуляционных факторов развития циклона на фоне наблюдаемых изменений климата.

Результаты исследования

Как показал анализ приземных и высотных синоптических карт Гидрометцентра России, сформировавшись в виде депрессии циклон «Даниэль» 4 сентября 2023 г. затронул Грецию, Болгарию и Турцию, вызвав там обширные наводнения. На восточную часть Ливии циклон Даниэль сместился 10 сентября, где оказал влияние на погодные условия в основном прибрежных городов. Во втором по величине после Триполи городе Ливии Бенгази во время выхода циклона при месячной норме осадков для сентября 3 мм выпало 54 мм, т. е. в 18 раз больше средних многолетних значений. Как видно из рис. 1 максимум осадков пришелся на 9 сентября (15 мм) и 10 сентября (30 мм) на фоне устойчивых отрицательных температурных аномалий, т. е. на фоне вторжения холодных воздушных масс.

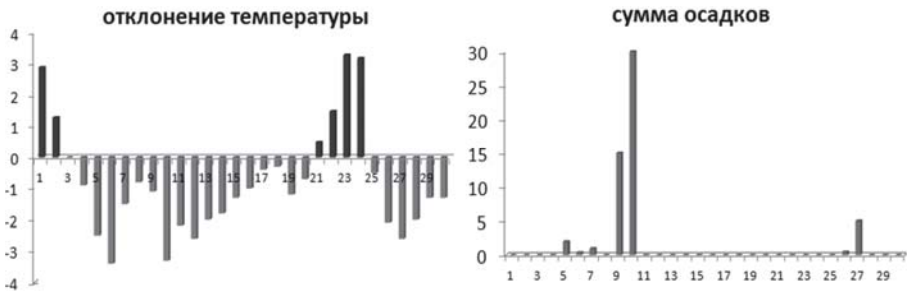


Рис. 1. Графики отклонений температуры воздуха у поверхности Земли и количества выпавших осадков в Бенгазе в сентябре 2023 г. (по данным <http://www.pogodaiklimat.ru>)

Интересно, что на картах погоды этот циклон оформился в виде замкнутых изобар только 11 сентября. На высоте изобарической поверхности АТ-500 гПа (5 км) формирование циклона было связано с развитием ложбины углубляющегося холодного циклонического вихря над Гренландией, 5 сентября 2023 г. над Средиземным морем сформировался самостоятельный высотный циклон, в который с юга втягивался теплый воздух Северной Африки, а с севера холодный воздух, поступающий со Скандинавии (рис. 2). Продолжительное стационарирование циклона было вызвано тем, что на западе и севере от него происходило развитие высотного гребня, а на востоке над европейской частью территории России стационарировал циклон. Более детальный анализ показал, что средиземноморский циклон «Даниэль» можно считать отсеченным циклоном при развитии теплого высотного блокирующего гребня над Западной Европой по типу «омега-блокинг».

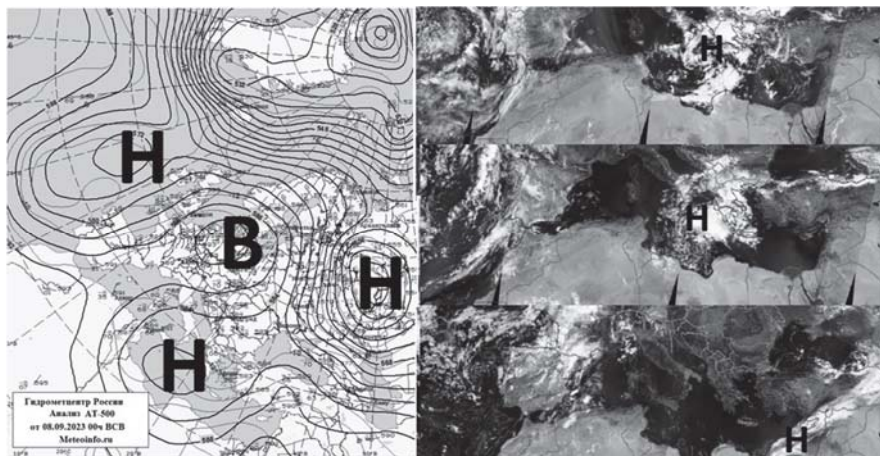


Рис. 2. Карта АТ-500 гПа 08.09.2023 г. и снимки облачности в период развития циклона «Даниэль» с 4 по 13 сентября 2023 г.

Динамика развития облачности в средиземноморском циклоне отчетливо видна на спутниковом снимке облачности (см. рис. 2). 5 сентября была хорошо различима кучево-образная облачность в кильватере циклона, 7 сентября сформировалась плотная облачность в центре циклона, 10 сентября хорошо прослеживаются «выметы перистообразных облаков», указывающие на регенерацию циклона. Далее происходит развитие облачности в меридиональном направлении (с юго-запада на северо-восток) вдоль передней части высотной фронтальной зоны с последующим объединением с облачностью прикаспийского циклона.

Во второй части работы была проанализирована динамика развития циклона Даниэль по результатам численной модели GFS за период с 4 по 11 сентября 2023 г. (рис. 3). Циклон сформировался над Ионическим морем (35°с.ш., 29°в.д.). Далее он имел южную составляющую, смещаясь на юго-запад, затем на юго-восток в пределах Средиземного моря, на материке более выраженную восточную составляющую. В период своего существования центр циклона сместился примерно на 12 градусов к югу в широтном направлении и на 12 градусов на восток в долготной составляющей, преодолев расстояние порядка 1332 км. Глубина циклона или минимальное давление в его центре варьировало от 1006 гПа – в период его образования 4 сентября до 996 гПа – на момент выпадения максимального количества осадков в Ливии 10 сентября. Таким образом, в период своего жизненного цикла циклон углубился на 10 гПа, причем наиболее быстрое падение атмосферного давления происходило 8–11 сентября.

Углубление циклона сопровождалось увеличением кинетической энергии, что отчетливо видно в усилении скорости ветра от 2 км/ч 4 сентября до 83 км/ч 10 сентября, когда был установлен новый рекорд сумм выпавших осадков в Ливии. За сутки их там выпало 414 мм. Одним из основных факторов, определившим рекордное количество выпавших осадков, вызвавших катастрофическое

наводнение в Ливии, можно считать формирование и смещение циклона над прогретой поверхностью Средиземного моря с аномалиями температуры поверхности моря до $+2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, что определяло высокие значения доступной потенциальной энергии конвективной (2767 Дж/кг) на момент его образования. Повышенное тепло- и влагосодержание отражалось в благоприятных условиях для развития облачности, влагосодержание которой росло по мере углубления циклона и на момент выпадения максимума осадков 10 и 11 сентября составило $3,3\text{ кг/м}^2$. На высоте ведущего потока на уровне изобарической поверхности АТ-500 гПа (5 км) преобладали ветры северо-западного направления, усиливающиеся на момент выпадения интенсивных осадков, что наглядно отражает вклад адвекции холода в углублении циклона. На высотах средней тропосферы скорости ветра на момент образования циклона были на $30\text{--}70\text{ км/ч}$ выше, чем у поверхности Земли, в дальнейшем скорости ветра у поверхности Земли оказались в среднем на 30 км/ч ниже. В заключительной стадии развития циклона они вновь на высоте были примерно на 20 км/ч больше, чем у поверхности Земли.

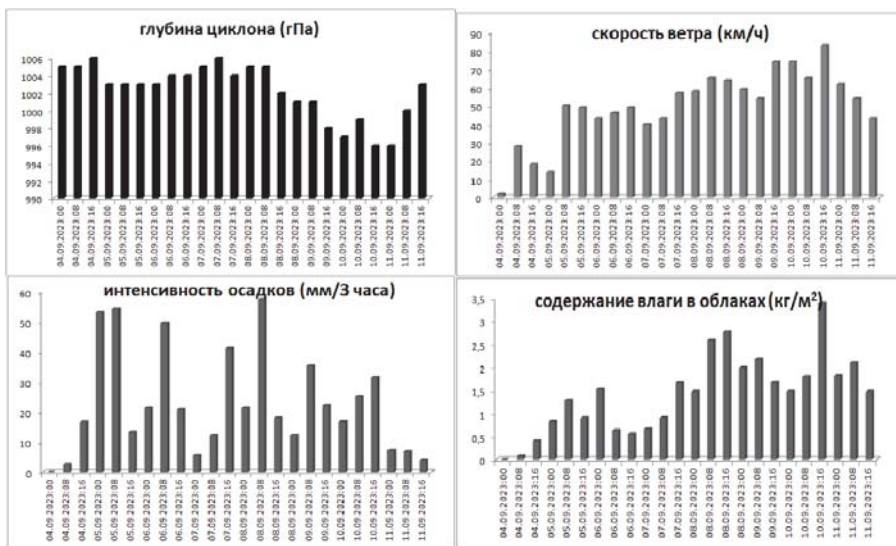


Рис. 3. Метеорологические характеристики циклона «Даниэль» с 4 по 13 сентября 2023 г.

Заключение

Проведенное исследование показало, что причиной наводнений, связанных с прохождением средиземноморского циклона «Даниэль» в сентябре 2023 г., было сочетание благоприятных климатических и циркуляционных факторов. Они проявлялись в наличии необходимых условий для углубления циклона при сочетании повышенного тепло- и влагосодержания Средиземного моря в условиях развития процесса блокирования с формированием отсеченного циклона с

активной адвекцией холода при усилении меридиональных потоков на высотах. Углубление циклона сопровождалось усилением ветра и увеличением интенсивности атмосферных осадков, суммы которых максимальных значений достигли 10 и 11 сентября при увеличении бароклинности атмосферы при выходе циклона на территорию суши. Учитывая современные тенденции повышения температур и усиления меридиональности потоков на высотах, вероятность продолжительных и интенсивных осадков может возрастать, особенно над прогретой поверхностью океанов и морей, где дополнительный вклад в процессы циклогенеза вносят фазовые переходы воды в атмосфере с возможным развитием конвекции по взрывному типу.

Список литературы

1. Мингалеев С. Г. Человеческий фактор в природных чрезвычайных ситуациях // Природопользование: от истории к современности. Куражковские чтения : материалы I Междунар. науч.-практ. конф. / сост. А. Н. Бармин. Астрахань, 2022. С. 101–108.
2. Koutsoyiannis D. Hydrology and change // Hydrological Sciences Journal. 2013. Vol. 58, N 6. P. 1177–1197. DOI: 10.1080/02626667.2013.804626
3. Javadinejad S. Causes and consequences of floods: flash floods, urban floods, river floods and coastal floods // Resour. Environ Inf Eng. 2022. Vol. 4, N 1. P. 173–183.
4. Social Vulnerability and the Natural / S. Zahran, D. C. Brody, G. W. Peacock [et al.] // Built Environment: A Model of Flood Casualties in Texas. 2008. Vol. 32, N 4. P. 537–560.

УДК 551.583(571.11/.5)

Динамика штормового южного циклона над Сибирью в ноябре 2023 года

И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru), К. А. Лощенко (loshchenko@bk.ru),
С. Ж. Вологжина (svologzhina@gmail.com), В. Л. Макухин (aerosol@lin.irk.com)
Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Статья посвящена изучению синоптических и метеорологических условий динамики южного циклона, сформировавшегося над Каспием и обусловившего ветер ураганной силы при его смещении через территорию Сибири в ноябре 2023 г. Построена траектория смещения центра циклона, проанализировано изменение глубины циклона во взаимосвязи с количественными значениями температурных и барических градиентов на разных уровнях тропосферы, определяющих состояние бароклинности атмосферы и ее влияния на динамику циклона на разных стадиях его развития. Выполнен метеорологический анализ условий усиления ветра, как по данным наземных станций, так и радиозондирования атмосферы, что позволило выявить вклад вихревой составляющей и струйных течений в средней и верхней тропосфере. Сопоставлены снимки облачного покрова в циклоне с приземными картами погоды.

Ключевые слова: средиземноморский циклон, глубина циклона, траектория, облечение, инверсия, скорость ветра, направление ветра, струйные течения.

Введение

Среди опасных явлений погоды ветер занимает одну из лидирующих позиций по количеству случаев на территории России и негативным последствиям, связанным с ним. Под сильным ветром понимают ветер со скоростью, превышающей 15 м/с, который учитывается при проведении строительных работ, движении транспорта, в энергетике и других сферах деятельности человека. В стандартный перечень опасных метеорологических явлений входит понятие «очень сильный ветер». Это сильный штормовой ветер разрушительной силы, когда средняя скорость ветра ≥ 20 м/с или максимальная скорость ветра (порыв) ≥ 25 м/с. При таком ветре возможны значительные разрушения строений, деревья вырываются с корнем. При ветре ураганной силы порывы превышают 32,7 м/с. На территории южной таежной зоны Западной Сибири за период с 2005 по 2015 г. на основе данных 23 метеостанций наибольшая ветровая активность приходится на весну (май). Осенью сильные штормовые ветры имеет значительно меньшую повторяемость с увеличением числа случаев в ноябре [4].

Штормовые ветры на территории России, как правило, связаны с прохождением штормовых циклонов, скорость ветра в которых достигает 15 м/с и более. Такие циклоны обычно развиваются в бароклинных атмосферных волнах длиной порядка тысячи километров и более, где большие горизонтальные температурные градиенты обусловлены тесным взаимодействием разнородных воздушных масс. С потоками, ориентированными с юга, осуществляется приток влажного и теплого воздуха, тогда как с севера идет поступление сухого и холодного воздуха. В условиях бароклинической неустойчивости к образованию штормового циклона могут привести, например, завихренность в свободной атмосфере (следствие существовавшего фронтального циклона), мезомасштабная фронтальная или ветровая волна, мезофронт (на границе «суша-море», на границе ледового покрова и т. п.).

Интенсивность штормового циклона может быть выражена через глубину циклона или минимальное значение атмосферного давления в его центре, через скорость приземного ветра, интенсивность и продолжительность атмосферных осадков, наличие ливней, гроз, метелей и других опасных явлений погоды. По данным [1] вклад средиземноморских циклонов в число умеренных штормов на европейской территории России в среднем за год составляет около 15 %, а в количество жестоких штормов – около 38 %. При этом именно в группе южных штормов доля жестоких штормов со скоростью более 24,5 м/с достигает 75 %. В летний сезон наблюдается увеличение числа южных жестоких штормов, выходящих на территорию России и сопровождающихся экстремально низким давлением.

Как показывают исследования последних лет, количество штормовых циклонов, особенно над Северной Атлантикой и Балтикой, растет от года к году [5]. В этой связи изучение характеристик штормовых циклонов и, по возможности, прогнозирование, представляют одну из важнейших задач современной метеорологии. Появление в последние годы метеорологических спутников, оснащенных активными и пассивными микроволновыми приборами, обладающих более

высоким разрешением и широкой полосой обзора расширило возможности получения информации о штормовых циклонах [2]. Штормовые циклоны отчетливо проявляются на снимках видимого и инфракрасного диапазонов (спектральные радиометры ODIS на спутниках Terra и Aqua, радиометры AVHRR на серии спутников NOAA). Однако, несмотря на увеличивающуюся доступность и частоту таких изображений, они отражают только структуру верхнего слоя облачности, поэтому при использовании требуют привлечения дополнительных данных [6]. Среди типичных проявлений штормовых циклонов в структуре облачного покрова выделяются такие сигнатуры как облачная запятая, спиралевидные структуры, мгновенные окклюзии, сигнатуры в форме лебедя, бароклинные волны и др. Кроме того, штормовые и мезомасштабные циклоны имеют четко выраженную вихревую сигнатуру в поле атмосферного водяного пара [3].

В ночь с 18 на 19 ноября 2023 г. через территорию Сибири смещался южный штормовой циклон. Резкие перепады температур от рекордных 20 °С до -3 °С сопровождалась порывами ураганного ветра, достигающими 38 м/с, из-за порывистого ветра произошло отключение электроэнергии, что стало причиной задержки десятков поездов в Сибири. Наряду с ветром ураганной силы наблюдались отложения мокрого снега диаметром до 30 мм, гололед, низовые метели.

Так как одним из необходимых условий возникновения штормовых циклонов является динамическая неустойчивость, а циклогенез является процессом, охватывающим практически всю тропосферу, поэтому в данной работе при расчете динамической неустойчивости количественно оценивалась бароклинность наиболее активной части тропосферы, т. е. в слое от 850 до 300 гПа. Для оценки фронтогенеза рассчитывались горизонтальные градиенты температуры воздуха и атмосферного давления на уровне изобарических поверхностей АТ-850 гПа, АТ-700 гПа, АТ-500 гПа и АТ-300 гПа. Изучение штормовых циклонов предполагает, прежде всего, выделение каким-либо методом траекторий циклонов. Для этой цели по данным приземных синоптических карт Гидрометцентра России (<https://meteoinfo.ru/>) определялись координаты центра циклона, его глубина и количество замкнутых изобар. По данным радиозондирования атмосферы за 00 и 12 ВСВ (<https://flymeteo.org>) проанализированы температурно-влажностные характеристики воздушной массы, наличие задерживающих слоев, их мощность и интенсивность, вертикальное распределение характеристик ветра, наличие струйных течений в средней и верхней атмосфере, зон обледенения и болтанки. По спутниковым данным Сибирского центра НИЦ «Планета» (<https://rcpod.ru>) проведено дешифрирование полей облачности на разных стадиях развития циклона.

Результаты исследования

На приземной синоптической карте штормовой циклон глубиной 1009,9 гПа образовался как волновое возмущение 16 ноября 2023 г. в 06 ВСВ над южной оконечностью Каспийского моря в ложбине циклона с центром над Норильском. Над Каспийским морем циклон наблюдался практически сутки до 17 ноября 00 ВСВ, где углубился на 4 гПа, но, был очерчен только одной замкнутой изобарой. По результатам численной модели GFS значения потенциальной

энергии конвективной неустойчивости в циклоне составляли порядка 393 Дж/кг. В дальнейшем центр циклона стал активно смещаться в направлении с юго-запада на северо-восток под передней частью динамически значимой высотной фронтальной зоны, горизонтальные градиенты давления в зоне которой составляли 34 дкм/1000 км на уровне изобарической поверхности АТ-500 гПа. По мере смещения циклона происходило его углубление до 979,2 гПа 19 ноября в 12 ВСВ, когда центр циклона находился над северными районами Иркутской области, а циклон был очерчен 5-ю замкнутыми изобарами.

Несмотря на то что циклон находился в стадии максимального развития, он оставался низким термически асимметричным барическим образованием, прослеживался до высоты АТ-850 гПа (1,5 км), где его глубина составляла 116 дкм. В тыловую часть циклона осуществлялась адвекция арктического воздуха с полуострова Таймыр, а в переднюю часть циклона поступал теплый воздух с южных районов Прибайкалья и северных районов Монголии, температурные градиенты достигали 18 °С/1000 км. На вышележащих изобарических поверхностях циклону соответствовала передняя часть динамически значимой высотной фронтальной зоны с горизонтальными градиентами температур 18 °С/1000 км на уровне изобарической поверхности АТ-700 гПа (3 км), 14 °С/1000 км на АТ-500 гПа (3 км) и 8 °С/1000 км на АТ-300 гПа (9 км). Горизонтальные градиенты давления на высотах 3,5 и 9 км составляли соответственно 31, 44 и 57 дкм/1000 км. Таким образом, в период максимального развития циклона влияние термической составляющей цикло- и фронтогенеза с высотой уменьшалось, достигая максимальных значений в нижней тропосфере, тогда как влияние барической составляющей с высотой, наоборот, росло.

По мере дальнейшего смещения центра циклона над территорией Якутии он заполнялся холодным воздухом, давление в его центре повышалось, и 20 ноября в 12 ВСВ циклон влился в тихоокеанскую депрессию. Если проанализировать изменение температурных и барических градиентов в циклоне на разных уровнях тропосферы, то горизонтальные градиенты температуры воздуха наибольших значений (23 °С/1000 км) достигли на высоте АТ-850 гПа 19 ноября в 12 ВСВ, где в дальнейшем они уменьшались, на вышележащих уровнях тропосферы они сохраняли максимальные значения до 20 ноября в 00 ВСВ, оставаясь динамически значимыми. Горизонтальные градиенты давления в средней и верхней тропосфере максимальных значений достигли 19 ноября в 00 ВСВ и 12 ВСВ, когда на территории Западной Сибири и Красноярского края скорость ветра достигла ураганных значений.

Циклон смещался почти по прямой траектории в направлении полюса холода – Оймякон в Якутии, преодолев за 108 часов расстояние около 5841 км со средней скоростью 54 км/ч (рис. 1). Большую площадь, занятую сильным ветром, и большую продолжительность сильного ветра на ряде метеорологических станций Сибири можно объяснить блокированием циклона на западе и востоке антициклонами, что также можно рассматривать как дополнительный фактор усиления ветра в зоне взаимодействия двух барических систем – циклона и антициклона.

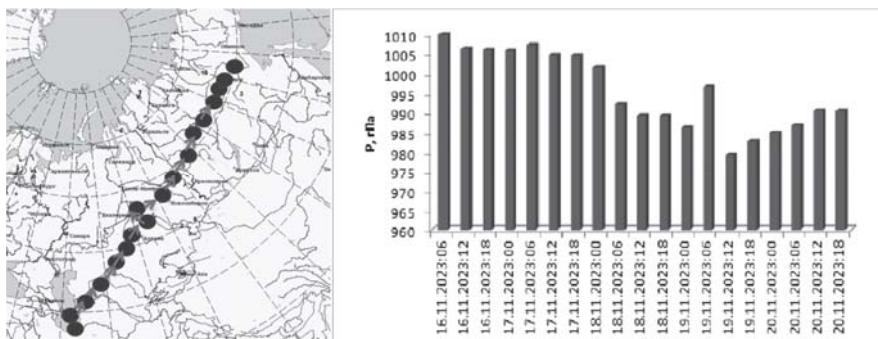


Рис. 1. Траектория смещения штормового циклона и изменение его глубины с 16 по 20 ноября 2023 г.

В системе циклона проходило два основных холодных атмосферных фронта и вторичный холодный фронт, с которым была связана вытянутая в направлении фронта конвективная облачная система с обширной зоной ливневых осадков и штормового ветра. Обширная зона облачности и атмосферных осадков также наблюдалась в центральной части циклона.

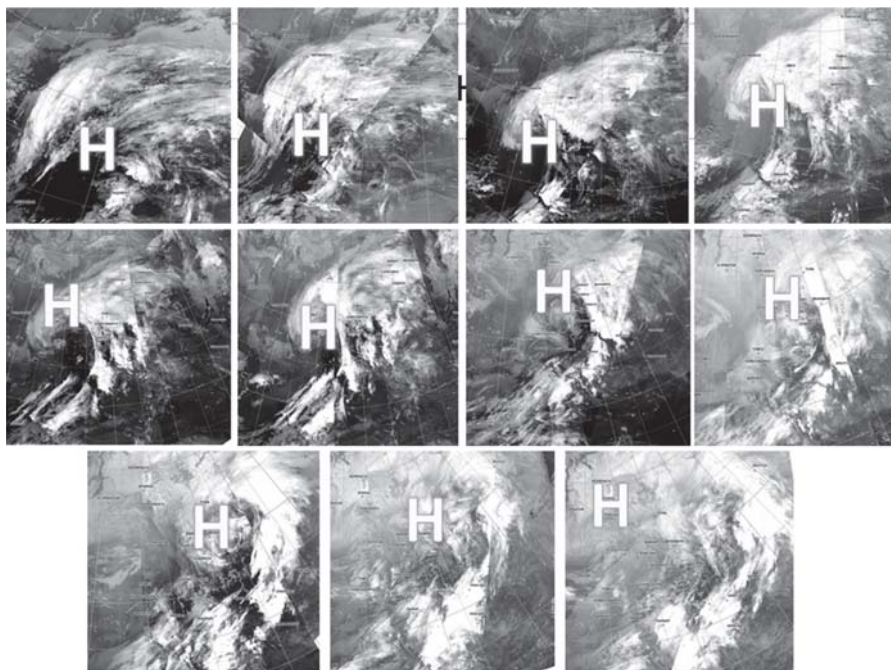


Рис. 2. Снимки облачности в циклоне с 17 по 19 ноября 2023 г. по данным Сибирского центра НИ «Планета»

Проведем сравнительный анализ метеорологических условий усиления ветра на станциях при прохождении холодных фронтов штормового циклона. В Астане усиление северо-западного ветра наблюдалось с 09 ВСВ 18 ноября до 00 ВСВ 19 ноября с порывами до 17 м/с и сопровождалось поземком, выпадением ливневого снега, понижением температуры воздуха на 10,6 °С и повышением атмосферного давления на 22,5 гПа. На юге Урала (Оренбург) усиление северо-западного ветра наблюдалось с 06 до 18 ВСВ 18 ноября и сопровождалось ливневым снегом на фоне понижения температуры на 10 °С и повышения атмосферного давления на 11,6 гПа. В Новосибирске с прохождением циклона было связано усиление юго-западного и западного ветра до 18 м/с с отложением мокрого снега диаметром 2 мм, понижением температуры воздуха на 14,8 °С и повышением атмосферного давления на 33,5 гПа. В Новокузнецке порывы юго-западного ветра в дневные часы 19 ноября достигали ураганной силы 35 м/с (126 км/ч), температура воздуха за период усиления ветра понизилась на 13,6 °С, атмосферное давление повысилось на 18 гПа. По результатам численной модели GFS мгновенная плотность энергии ветра составляла 6 кВт/м². В Красноярске отмечалось усиление юго-западного ветра до 25 м/с с 18 ВСВ 18 ноября до 18 ВСВ 19 ноября, которое сопровождалось слабым ливневым снегом и происходило при понижении температуры воздуха на 11,4 °С и повышении атмосферного давления на 19,4 гПа. При прохождении холодного фронта через западные районы Иркутской области (Тайшет) порывы западного и северо-западного ветра достигали 24 м/с, сопровождались метелью и слабым ливневым снегом на фоне понижения температуры воздуха на 18,8 °С и повышения давления на 29,3 гПа. На севере Иркутской области (ст. Ербогачен) усиление северо-западного ветра отмечалось с 00 до 09 ВСВ 20 ноября, но, порывы ветра не превышали 12 м/с на фоне понижения температуры воздуха на 5,1 °С и повышения давления на 20,3 гПа. Таким образом, прохождение холодного атмосферного фронта циклона на территории Сибири сопровождалось в основном усилением ветра до градаций сильного (≥ 15 м/с), реже сильного штормового ветра (24,5–28,4 м/с). В Горном Алтае и на юго-востоке Западной Сибири, где циклон был в стадии максимального развития, скорости ветра достигали ураганной силы (≥ 33 м/с), что привело к человеческим жертвам.

По данным аэрологического зондирования станции Атарай, расположенной на побережье Каспийского моря, 17 ноября в 00 ВСВ – на момент, когда циклон начал свое смещение по территории Казахстана, во влажной атмосфере получали развитие облака верхнего, среднего и нижнего ярусов, уровень конденсации находился на высоте 169 м, в облаках отмечали умеренное обледенение. В нижнем 1,5-километровом слое наблюдалась приземная инверсия температур интенсивностью 4,8 °С и мощностью 493 м, выше слою приподнятой инверсии и изотермии, отмечалось вихревое вращение ветра. Уровень тропопаузы находился на высоте 11 699 м и имел температуру –63,3°С, отмечались верхнетропосферные струйные течения с увеличением скорости юго-западного ветра до 166 км/ч. По данным ст. Курган на момент прохождения циклона 18 ноября и

усиления северо-западного ветра до 14 м/с во влажной атмосфере с уровня конденсации, расположенного на высоте 220 м, получали развитие слоисто-дождевые облака, где отмечалось умеренное обледенение. В нижнем 3-км слое наблюдались вертикальные сдвиги ветра, на высоте 5654 м отмечалось среднетропосферное струйное течение с усилением юго-западного ветра до 191 км/ч, на вышележащих уровнях скорости ветра возрастали, достигая максимального значения 202 км/ч на уровне 10 600 м. По данным аэрологической станции Омск на момент прохождения циклона происходило усиление северного ветра до 17 м/с, во влажном воздухе с уровня конденсации, находящегося на высоте 290 м, получали развитие облака нижнего и среднего ярусов, на уровне изобарической поверхности АТ-850 гПа отмечался слой приподнятой инверсии температур интенсивностью 1,9 °С и мощностью 555 м, в облаках умеренное обледенение. Уровень тропопаузы с температурой –63,1 °С находился на высоте 11 км, в нижнем 1,5-километровом слое отмечалось вихревое вращение ветра, на высоте около 3 км проходила мезоструя со скоростью юго-западного ветра 94 км/ч, на вышележащих уровнях – струйные течения со скоростью, достигающей 151 км/ч на высоте 10 600 м. На территории Западной Сибири по данным ст. Новосибирск на момент усиления ветра 19 ноября атмосфера в нижних слоях была стратифицирована влажнонеустойчиво, отмечались слоисто-дождевые облака с нижней границей 450 м, в облаках умеренное обледенение, уровень тропопаузы находился на высоте 9 км с температурой на нижней границе –51,9 °С, на высоте изобарической поверхности АТ-700 гПа проходила мезоструя со скоростью юго-западного ветра 94 км/ч, а на вышележащих уровнях наблюдались струйные течения с максимальной скоростью 184 км/ч на уровне 10 400 м. При прохождении циклона через территорию Красноярского края по данным ст. Емельяново во всей толще тропосферы отмечалась влажная воздушная масса, в нижнем 1,5-километровом слое приподнятая инверсия температур интенсивностью 0,6 °С и мощностью 365 м, наблюдалась вихревая составляющая ветра. Начиная с высоты АТ-500 гПа проходили струйные течения западного и северо-западного направлений с максимальной скоростью 169 км/ч, в кучево-дождевых облаках отмечалось умеренное обледенение и слабая болтанка. Уровень тропопаузы был расположен на высоте 10 170 м, где температура воздуха составляла –63 °С, второй уровень тропопаузы отмечался на высоте 11 520 м с температурой –70,5 °С. При прохождении циклона через западные районы Иркутской области 19 ноября на ст. Нижнеудинск отмечались перистые и слоисто-кучевые облака, на высоте 3700 м был расположен слой приподнятой инверсии температур интенсивностью 0,4 °С и мощностью 284 м, уровень тропопаузы на высоте 11 530 м с температурой на нижней границе –58,7 °С, на высоте 2839 м отмечалось среднетропосферное струйное течение со скоростью западного ветра 90 км/ч, с последующим усилением скорости ветра с высотой, которая достигла максимальных значений 205 км/ч на высоте 10 900 м. Таким образом, прохождение штормового циклона по территории Западной и Восточной Сибири сопровождалось развитием облачности во влажной воздушной массе с возможным обледенением. В нижней тропосфере отмечались слои приподнятой инверсии температур, указывающие на

прохождение атмосферного фронта. В нижней тропосфере отмечалось вихревое вращение, в средней и верхней тропосфере струйные течения, уровень тропопаузы был на высотах 9–11 км, что указывало на значительный прогрев атмосферы для данного времени года.

Заключение

Анализируя крупномасштабные факторы усиления ветра до ураганной силы при смещении штормового циклона над территорией Сибири, можно выделить следующие особенности. Причиной сильного и продолжительного ветра можно назвать влияние длительное время стационарирующего во второй декаде ноября теплого высотного гребня над Сибирью с выносом теплых и богатых по абсолютному влагосодержанию воздушных масс с побережья Черного и Каспийского моря при усилении потоков с Атлантики, что сопровождалось усилением процессов подвижного циклогенеза над Евразией. Причиной же развития подвижного циклогенеза можно назвать усиление меридиональности потоков на высотах, которое сопровождалось углублением циркумполярного вихря с интенсивной адвекцией холода южнее 55° с. ш., что привело к образованию южных циклонов на территории Черного и Каспийского морей. Циклон, образовавшийся над теплой поверхностью моря, длительное время смещался по прогретому континенту при сохранении больших температурных контрастов в нижней тропосфере, и высоких барических градиентов в средней и верхней тропосфере, определяющих как высокие скорости смещения циклона по территории Сибири, так и большие скорости ветра в самом циклоне. При сближении арктической и полярной ветви верхнетропосферных струйных течений и мезоструй в средней тропосфере осуществлялся обмен кинетической энергией с нижележащими слоями атмосферы, что позволило сохранять высокие запасы энергии в период жизненного цикла циклона.

Список литературы

1. *Вязилова Н. А., Вязилов А. Е.* О климатологии штормовых циклонов, выходящих на европейскую территорию России из различных районов генезиса : тр. ВНИИГМИ-МЦД. 2020. № 186. С. 90–100.
2. *Гурвич И. А., Митник Л. М., Митник М. Л.* Мезомасштабный циклогенез над дальневосточными морями: исследование на основе микроволновых радиометрических и радиолокационных измерений // Исследование Земли из космоса. 2008. № 5. С. 58–78.
3. *Заболотских Е. В., Бобылев Л. П., Дикинис А. В.* Использование данных реанализа и спутниковых измерений для оценки количественных характеристик штормовых мезоциклонов // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 22. С. 157–170.
4. *Мельник М. А., Мельник С. А.* Сильный ветер как опасный фактор для лесопользования в южно-таежной зоне Западной Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Т. 3, № 3. С. 105–109.
5. *Bracegirdle T. J., Gray S. L.* An objective climatology the dynamical forcing of polar lows in the Nordic seas // Int. J. Clim. 2008. Vol. 28. P. 1900–1919.
6. *Rasmussen E., Turner J.* Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. Cambridge University Press, 2008. 612 p.

УДК 551.55(571.53)

Анализ изменчивости очень сильного и ураганного ветра на территории Иркутской области

Е. В. Лукьянова (luckyanova98765@mail.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Ветровой режим относится к важному климатическому ресурсу. Одной из причин, побудившей к исследованию ветрового режима, послужила тенденция к увеличению скорости ветра, которая проявляется с 2010 г. В статье проведен анализ изменчивости очень сильного и ураганного ветра на территории Иркутской области, изучены особенности ветрового режима Иркутской области. Рассмотрено изменение повторяемости очень сильного и ураганного ветра, а также максимального порыва ветра за период с 2016 по 2022 г. Выявлено, что Иркутская область подвержена влиянию очень сильного и ураганного ветра в различные сезоны года. За период 2016–2022 гг. было выявлено несколько случаев с ОЯ с очень сильным ветром. Максимальный порыв ветра на станциях Иркутской области варьирует от 22 до 26 м/с.

Ключевые слова: сильный ветер, Иркутская область, скорость ветра, максимальный порыв.

Наибольшую угрозу для любой территории представляют опасные явления погоды (ОЯ). Опасными называют явления, которые по своей интенсивности развития, продолжительности и моменту возникновения могут представлять угрозу жизни или здоровью человека и животных, а также принести ущерб экономической, сельскохозяйственной и другим отраслям [1]. Опасные и экстремальные метеорологические явления наблюдаются повсеместно.

Согласно перечню ОЯ [2] к ним относятся «сильная жара/мороз», «сильный ливень», «сильная метель» и пр., а также большое разнообразие явлений и их комплексов, связанных с ветром, в том числе «шквал», «смерч», «очень сильный ветер», «сильная пыльная буря», «град с ветром и грозой». Это одна из причин, по которой ветер как одна из наиболее изменчивых метеорологических величин, представляет большой научных и практический интерес для изучения. Еще одной причиной, побудившей к исследованию ветрового режима, послужила тенденция к увеличению скорости ветра, проявившаяся с 2010-х гг.

Ветровой режим или режим ветра относится к важному климатическому ресурсу. Он отражает характер барического поля и сильно зависит от местных условий. На территории Иркутской области направление преобладающего ветра и его повторяемость изменяются в больших пределах, так как зависят от особенностей орографического строения местности, защищенности площадок метеорологических станций [3].

Цель данного исследования состояла в анализе изменчивости очень сильного и ураганного ветра на территории Иркутской области.

Исходным материалом послужили данные наблюдений за характеристиками ветра на метеорологических станциях Братск, Ербогачён, Исток Ангары, Киренск, Мама, Нерой, Новочунка, Тьрка, Усть-Илимск, Усть-Кут, Кутулик. Выбор этих станций обусловлен их равномерным распределением по территории

Иркутской области. Изменение средних из максимальных скоростей ветра показано на примере периода с 2016 по 2022 г.

Изменение очень сильного и ураганного ветров представляет существенную угрозу для любой территории. Для того, что избежать угрозу жизни или здоровья человека, а также уменьшить риски для различных секторов экономики (строительной, сельскохозяйственной и др.), необходимо изучить изменчивость, повторяемость ветрового режима.

Проанализировав средние из максимальной скорости ветра, наблюдаемых на метеостанции Ербогачён за рассматриваемый период, можно отметить, что максимум отмечается в 2017 г. В этот год среднее значение из максимальных порывов составило 14 м/с. Минимум приходится на 2016 г., среднегодовая максимальная скорость ветра составляет 12 м/с. Наблюдается тенденция к незначительному уменьшению скорости максимальных порывов ветра. Сильные порывы ветра проходятся на весну, в апреле и мае порывы ветра составляют 20 м/с. Наименьшие значения скорости ветра отмечаются в феврале (7 м/с). В основном значения средних из максимальных скоростей ветра в течение года колеблется пределах 12–14 м/с. В летний период ветры ослабевают, и даже максимальные порывы ветра не превышают 13 м/с.

На метеорологической станции Мама наибольшие скорости отмечались также в 2017 г., при этом среднее значение из максимальных скоростей ветра равно 17 м/с, а наименьшие в 2022 г. В последующие годы это значение стало уменьшаться, достигнув вторичного максимума в 2019 г. В последние годы прослеживается тенденция к уменьшению скоростей ветра. Сильный ветер, как правило, наблюдается в весенний сезон. К примеру, в апреле фиксировались скорости ветра 29 м/с (рис. 1). Минимальная скорость ветра отмечается, наоборот, в осенний период, а также на конец зимы – в октябре и в марте, скорость ветра составляет 11 м/с. На метеостанции Мама, за рассматриваемый период, отмечался очень сильный ветер в апреле 2017 г. с максимальной скоростью ветра 29 м/с.

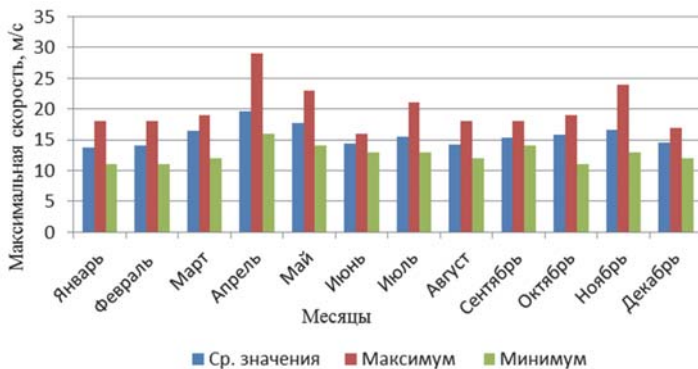


Рис. 1. Годовое изменение максимальных скоростей ветра на метеостанции Мама

Рассмотрим среднюю из максимальной скорости ветра на метеостанции Усть-Илимск. Наибольшие скорости наблюдались в 2019 г. (17 м/с), а наименьшие в 2016 г. были на 2 м/с меньше максимального значения. С 2016 по 2019 г. скорость ветра постепенно возрастала, затем наблюдается падение. Но уже в 2021 и 2022 гг. прослеживается небольшое повышение скорости ветра. Наибольшая скорость ветра отмечается весной – апрель, май до 23 м/с. Вторичный, менее выраженный, максимум ветра наблюдается в конце осени (октябрь). Средние из максимальных скоростей ветра в феврале составляют 14 м/с, что является наименьшим значением в году.

Для исследования изменчивости ветрового режима на метеостанции Киренск рассмотрим максимальные значения ветра. Наименьшее значение максимальной скорости ветра отмечалось в 2018 г. Оно составило 14 м/с. Значительные порывы ветра наблюдались в 2022 г. (до 16 м/с). Максимальная скорость ветра испытывает колебания от года к году не более 2 м/с. Проанализируем изменение скорости ветра в течение года на метеостанции Киренск. По графику видно (рис. 2), максимум отмечается в июле, со скоростью ветра 34 м/с (опасная скорость ветра). Минимум фиксировался несколько раз за год, в основном в осенний-зимний периоды, когда максимальная скорость ветра уменьшалась 10 м/с. Таким образом, за период 2016–2022 гг. на метеостанции Киренск отмечался три случая ОЯ с очень сильным ветром в апреле 2017 г. и в мае 2020 г.. Сильный ветер дул со скоростью 25 м/с. Самое мощное опасное явление по очень сильному ветру наблюдалось в 2022 г., скорость ветра при этом составляла 34 м/с.

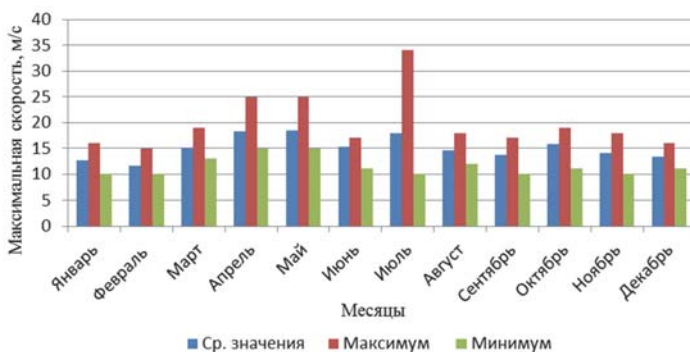


Рис. 2. Годовое изменение максимальных скоростей ветра на метеостанции Киренск

На станции Усть-Кут амплитуда максимальной скорости ветра равна 2 м/с, с наибольшим значением в 2019 г. (15 м/с), а наименьшим в 2017 г. (12 м/с). По изменению максимальной скорости ветра в течении года минимальная скорость ветра наблюдается в феврале – 9 м/с, максимальная отмечается в апреле, максимальный порыв ветра составляет 22 м/с. В среднем на станции Усть-Кут максимальный порыв ветра колеблется в пределах от 13 до 14 м/с.

Проанализировав средние из максимальной скорости ветра на станции Братск, отмечено, что наименьшее значение из максимальных скоростей ветра наблюдалось в 2018 г., что составляет 14 м/с, максимальные порывы ветра наблюдались в 2020 г. – 15 м/с. Следует обратить внимание, что в отличие от других станций, на станции Братск максимальные порывы ветра год от года растут. Очень ветреным в Братске является апрель. В этот месяц максимальные порывы увеличиваются до 22 м/с. Зимой значения максимальной скорости ветра наименьшие, а максимальная скорость ветра не превышает 9 м/с. За исследуемый период 2016–2022 гг. на станции Братск отмечался только один случай опасного явления – очень сильный ветер. Он был зафиксирован в апреле 2020 г., максимальный порыв ветра при этом был 22 м/с (рис. 3).

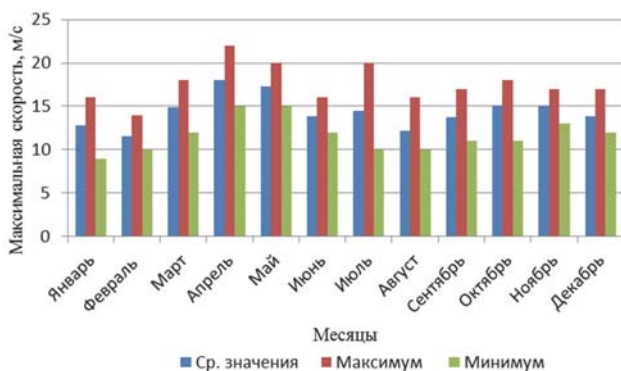


Рис. 3. Годовое изменение максимальных скоростей ветра на метеостанции Братск

Распределение средней из максимальных скоростей ветра на метеостанции Новочунка, характеризуется повышением скорости ветра, достигнув максимальных значений в 2021 г. Наибольшее среднее из максимальных скоростей ветра составляет 17 м/с. Амплитуда рассматриваемой величины составляет 4 м/с. Проанализировав годовое изменение максимальной скорости ветра, было отмечено: наибольшие значения максимальных скоростей ветра отмечаются в августе, октябре и ноябре с порывами до 23 м/с. В январе максимальный порыв ветра не превышал 9 м/с. На станции Новочунка отмечалось три случая повышения скорости ветра до «очень сильного ветра» (рис. 4). Критерия ОЯ достигли в августе (2020 г.), октябре (2019 г.) и ноябре (2017 г.).

Средняя из максимальных скоростей ветра на метеостанции Нерой увеличивается до 2020 г. (20 м/с). Далее рассматриваемые скорости уменьшаются, достигнув 8 м/с. Наибольшие за год порывы наблюдаются в весенний период – март, апрель, май. В эти месяцы максимальный порыв ветра составлял 18 м/с. Значительное уменьшение максимальных скоростей отмечается зимой. В зимние месяцы порывы на 6–8 м/с меньше летних значений.

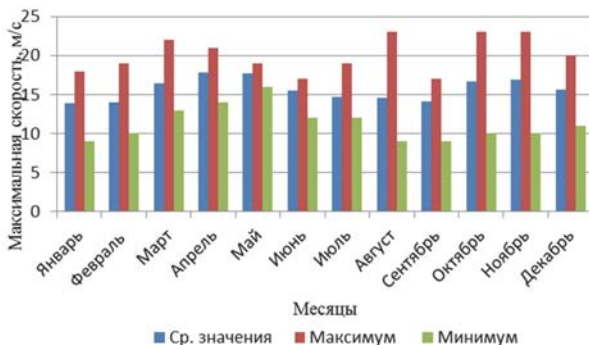


Рис. 4. Годовое изменение максимальных скоростей ветра на метеостанции Новочунка

За рассмотренный период амплитуда максимальной скорости ветра на станции Тырка составила 3 м/с. Наибольшее значение из максимальных скоростей ветра было в 2019 г. (14 м/с). В последние годы значение максимальной скорости уменьшилось до 11 м/с. Изменение максимальной скорости ветра в течение года проходит на очень ветреный осенний период. В октябре наблюдаются максимальные порывы до 24 м/с. Таким образом, на метеостанции Тырка за период 2016–2022 гг. отмечался очень сильный ветер в октябре 2019 г., максимальный порыв ветра равен 24 м/с.

В среднем за рассматриваемый период максимальная скорость ветра на метеостанции Кутулик равна 18 м/с. Однако после 2020 г. средняя из максимальных скоростей ветра уменьшилась на 2 м/с. Проанализировав изменение максимальной скорости ветра по месяцам, отмечается наибольшие значения в апреле и июле (порывы ветра 26 м/с). Наименьшие значения исследуемой величины наблюдались в конце года – ноябре и декабре, когда порывы ветра не превышали 12 м/с. На станции Кутулик отмечалось два случая опасного явления с очень сильным ветром. ОЯ наблюдалось в апреле 2016 г. и июле 2020 г., в эти годы порывы ветра достигали 26 м/с.

На метеостанции Исток Ангары для максимальной скорости ветра характерны колебания от 21 до 24 м/с. Более значительные порывы ветра наблюдались в последние годы. До 2020 г. средняя из максимальных скоростей ветра составляла 22 м/с, а после увеличилась на 1–2 м/с. Максимум отмечается в мае с максимальным порывом ветра до 35 м/с, минимум отмечается в июне, при средней из максимальных скоростей ветра 15 м/с. Поскольку метеостанция Исток Ангары относится к оз. Байкал, критерии ОЯ другие. За рассматриваемый период 2016–2020 гг. наблюдался только один случай «очень сильного ветра» в мае 2016 г. с максимальным порывом 35 м/с.

Проанализировав в данной работе изменчивость очень сильного и ураганного ветра на территории Иркутской области можно сделать основные выводы.

1. Территория Иркутской области подвержена влиянию очень сильного ветра в различные сезоны года. За рассматриваемый период 2016–2022 гг. было

выявлено несколько случаев с ОЯ с очень сильным ветром. Максимальный порыв в среднем варьирует от 22 до 26 м/с.

2. Наибольшая повторяемость ОЯ, из рассматриваемых станций, наблюдалась на станциях Киренск и Новочунка, где было зафиксировано по три таких случая.

3. На станциях Иркутской области повышение скорости ветра наблюдается в весенний период года. Исключение составляют станции Тырка, Новочунка, где усиление скорости ветра отмечается в осенний период и Киренск, где повышение скорости ветра отмечается летом (в июле).

Список литературы

1. Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 205 с.
2. Руководящий документ 52.04.563. «Инструкция по подготовке и передаче штормовых сообщений наблюдательными подразделениями». СПб.: Росгидромет, 2013. 53 с.
3. Ветровой режим на территории Иркутской области (Атлас 2004 г.) // Иркипедия – портал Иркутской области. URL: irkipedia.ru (дата обращения: 10.11.2023).

УДК 551.506.3:551.583.1(470.57)

Изменения температурно-влажностного режима и опасных метеорологических явлений теплого периода на территории Республики Башкортостан

Э. З. Нурмухаметова (elmira18.01.02@gmail.com)¹, Р. Г. Камалова (galim-rita@yandex.ru)^{1,2}, Е. А. Богдан (eavolkova@bk.ru)^{1,2}

¹Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа

²Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

Аннотация. Региональным откликом на глобальное потепление климата является пространственно-временное изменение в режимах температуры и увлажнения. В настоящем исследовании представлен анализ изменений в режиме температуры и атмосферных осадков теплого периода в Республике Башкортостан с выявлением характерных опасных явлений. Для выявления климатических изменений температурно-влажностного режима рассматривались разные периоды: основной (1966–2021 гг.) и периоды, рекомендованные ВМО. Проанализированы статистические характеристики температуры и атмосферных осадков теплого периода, получено распределение числа случаев сильной жары, аномально-жаркой погоды, очень сильного дождя, продолжительного сильного дождя. В ходе исследования установлено, что годовая сумма осадков имеет тенденцию к росту, а сумма осадков тёплого периода – к уменьшению, что связано с увеличением температуры воздуха. Выявлено, что наибольшее число случаев сильной жары наблюдалось в августе. Анализ случаев опасных явлений, связанных с осадками, показал, что в горной части Башкортостана их формируется больше.

Ключевые слова: изменение климата, температурный режим, режим атмосферных осадков, сильная жара, аномально-жаркая погода, сильный дождь, продолжительный сильный дождь.

На фоне происходящего глобального потепления изменения климата отмечаются как в целом в Республике Башкортостан (РБ), так и в смежных субъектах РФ и мира [1; 2; 5; 10; 13–15]. В [15] представлено, что глобальные климатические изменения влияют на региональные изменения режима температуры и атмосферных осадков.

Усиливающийся интерес к вопросам исследований изменений климата регионов имеет большое прикладное значение. В частности, актуальными становятся исследования, касающиеся режима экстремальных проявлений погоды. Особенно важен данный отклик для населения, экономической и транспортной инфраструктуры в связи с увеличением частоты опасных гидрометеорологических процессов [1; 6; 9; 10; 13; 15].

Температурный режим

Одним из основных метеорологических величин является температура воздуха. Она постоянно меняется в пространстве и во времени. Из-за циркуляционного фактора, приводящего к адвекции тепла или холода, возникают ее нерегулярные (апериодические) изменения [2].

Самым жарким месяц в году на территории РБ является июль (+18,7°C). Самый холодный месяц теплого периода (ТП) – апрель (+4,4°C). Ход средних месячных температур воздуха показан на рис. 1.

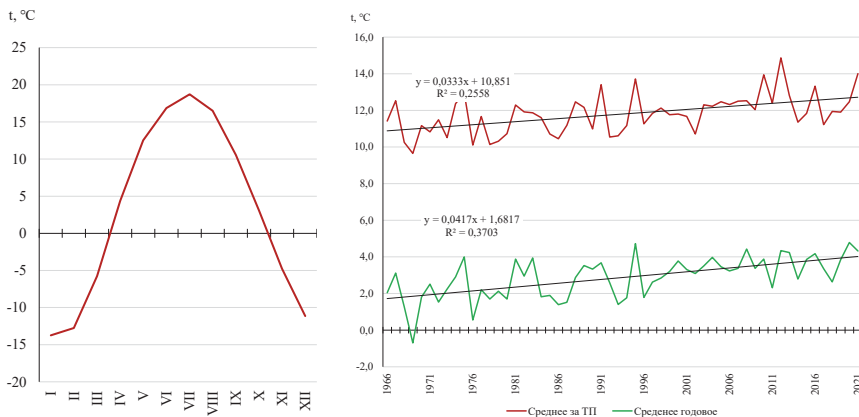


Рис. 1. Сезонный ход температуры (слева) и межгодовая изменчивость температуры (справа) за период 1966–2021 гг. на территории РБ (составлено по данным ВНИИГМИ-МЦД)

В межгодовом ходе температура воздуха имеет тенденцию к росту со скоростью 0,4°C/10 лет в период 1966–2021 гг., в летний сезон она чуть меньше – 0,3°C/10 лет (рис. 1).

На таком фоне роста температуры учащаются такие опасные метеорологические явления как сильная жара и аномально жаркая погода.

В критерий *сильная жара* попадают случаи в период с мая по август со значениями максимальной температуры воздуха +38 °C [8]. По срочным данным

из архива ВНИИГМИ-МЦД по имеющимся метеостанциям (МС) в пределах РБ были отобраны случаи по указанным критериям температуры с мая по август.

За период регулярных наблюдений наиболее высокие температуры воздуха на большинстве метеостанций республики фиксировались в августе 2021 г., июле 1952 г., августе 2010 г. Значение абсолютного максимума составило +40,5 °С (зафиксирован на МС Стерлитамак 29 июля 1952 г.). Всего в РБ зафиксировано 27 случаев сильной жары, одно из которых проходило при выпадении осадков. Из всех случаев наибольшую долю занимают случаи в августе (56 %), затем в июле (33 %) и июне (11 %). В мае сильной жары не выявлено.

В большинстве случаев сильная жара достигает критерия опасного явления при продолжительных периодах (более 5–7 сут.) антициклональной погоды. В таких ситуациях аномально высокая температура воздуха наблюдается на фоне дефицита осадков. Обычными последствиями продолжительных и интенсивных летних волн тепла являются развитие почвенной и атмосферной засухи, неконтролируемое распространение лесных пожаров, маловодье на реках [9]. Как показано в [9], на территории РБ случаи сильной жары связаны с блокирующими процессами в тропосфере, когда центр антициклона или ось гребня расположены над Средним Поволжьем, Уралом или Южным Зауральем. В результате создаются условия для адвекции тропического воздуха в Предуралье по его западной или северной периферии. Кратковременное повышение температуры до +35...+36 °С возможно также в теплых секторах южных циклонов, при адвекции тропической воздушной массы.

В критерий *аномально-жаркой погоды* попадает период с апреля по сентябрь, в течение которого 5 дней и более значение среднесуточной температуры воздуха выше климатической нормы на 10 °С и более [8]. В начале анализа были определены «температурные пороги» для каждого месяца и МС относительно климатической нормы с 1961–1990 гг. (критерии расписаны в табл. 1). По срочным данным архива ВНИИГМИ-МЦД были выявлены случаи с указанными температурами выше нормы по суточным данным в период апрель–сентябрь с продолжительностью от 5 сут.

На территории РБ максимальное число случаев аномально-жаркой погоды наблюдалось в 1967, 1975, 1977, 1982 и 2012 гг. Наибольшее число случаев аномально-жаркой погоды встречается в апреле (85 %), затем в августе (6 %), в мае (5 %), в июне и июле по 2 %. В сентябре критерия это опасное явление не выявлено. В апреле наибольшее количество случаев связано с приходом потепления, вызванного стационарированием блокирующего антициклона. Также по продолжительности аномально-жаркой погоды в данном месяце установлены наибольшие значения по продолжительности (варьируется от 5 до 20 суток). В июле и июне наименьшее количество данных случаев связано с очень высокими значениями норм температуры.

Таблица 1

Месячные климатические нормы за период 1961–1990 гг. [3]
и соответствующие критерии аномально-жаркой погоды для рассматриваемых метеостанций

Метеостанция	Месяц					
	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Янаул	3,0	11,5	17,0	18,7	16,1	10,1
	13,0	21,5	27,0	28,7	26,1	20,1
Дуван	2,8	10,6	15,3	17,0	14,8	9,3
	12,8	20,6	25,3	27,0	24,8	19,3
Зилаир	3,0	11,5	15,6	17,5	15,6	9,6
	13,0	21,5	25,6	27,5	25,6	19,6
Кушнаренково	4,4	13,3	17,9	19,3	16,9	11,2
	14,4	23,3	27,9	29,3	26,9	21,2
Аксаково	3,3	12,0	16,6	18,1	16,4	10,5
	13,3	22,0	26,6	28,1	26,4	20,5
Уфа-Дема	3,2	12,5	17,7	19,0	17,0	10,9
	13,2	22,5	27,7	29,0	27,7	20,9
Стерлитамак	5,0	13,5	18,2	19,6	17,4	11,5
	15,0	23,5	28,2	29,6	27,4	21,5
Тукан	2,7	10,4	14,7	16,2	14,1	8,6
	12,7	20,4	24,7	26,2	24,1	18,6

Примечание: критерий отбора по опасному явлению выделены цветом.

Режим осадков

РБ является сложным регионом с точки зрения орографии, поэтому на всей территории количество осадков распределено неравномерно (рис. 3). В республике годовые суммы осадков увеличиваются с юга на север, также наблюдается их увеличение в пределах Южного Урала [2]. Из рассматриваемых метеостанций наибольшее в РБ годовое количество осадков выпадает на МС Тукан (681 мм), наименьшее – на МС Кушнаренково (488 мм) при среднем их количестве 547 мм.

Средняя сумма осадков теплого периода в РБ составляет 362 мм (67 % от годовой суммы). Наименьшая сумма осадков характерна для МС Кушнаренково (323 мм). Самое большое количество осадков в теплый период выпадает на МС Тукан (469 мм). Внутригодовой максимум осадков приходится на июль (63 мм).

На территории республики осредненный тренд годовой суммы осадков является положительным (1,98 мм/10 лет), т. е. сумма осадков в период 1966–2021 гг. увеличивается. При этом тренд в теплом периоде отрицательный (–4,8/10 лет) Карта распределения осадков с показателями трендов по месяцам представлена на рис. 3.

В периоды выпадения интенсивных осадков могут формироваться такие опасные метеорологические явления, как очень сильный дождь и продолжительный сильный дождь.

В критерий *очень сильного дождя* попадают значительные жидкие или смешанные осадки с количеством не менее 50 мм (в ливнеопасных горных районах – 30 мм) за период времени не более 12 ч [8].

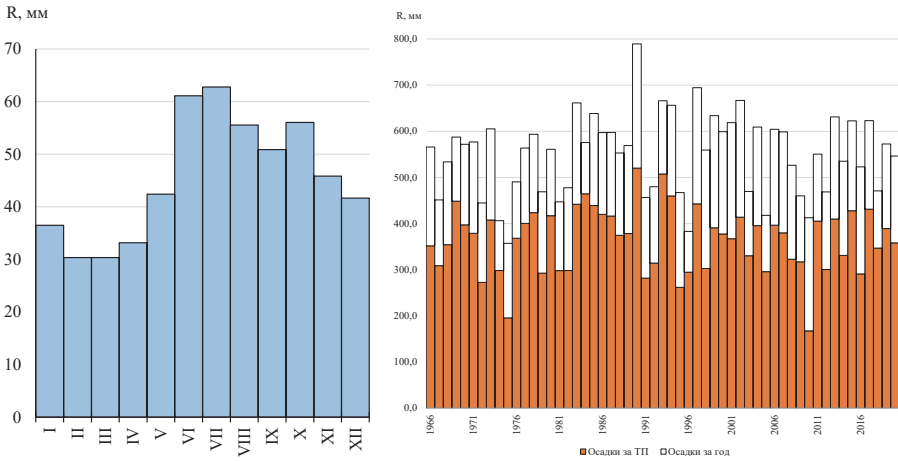


Рис. 2. Сезонный ход осадков (слева) и межгодовая изменчивость осадков (справа) за период 1966–2021 гг. на территории РБ (составлено по данным ВНИИГМИ-МЦД)

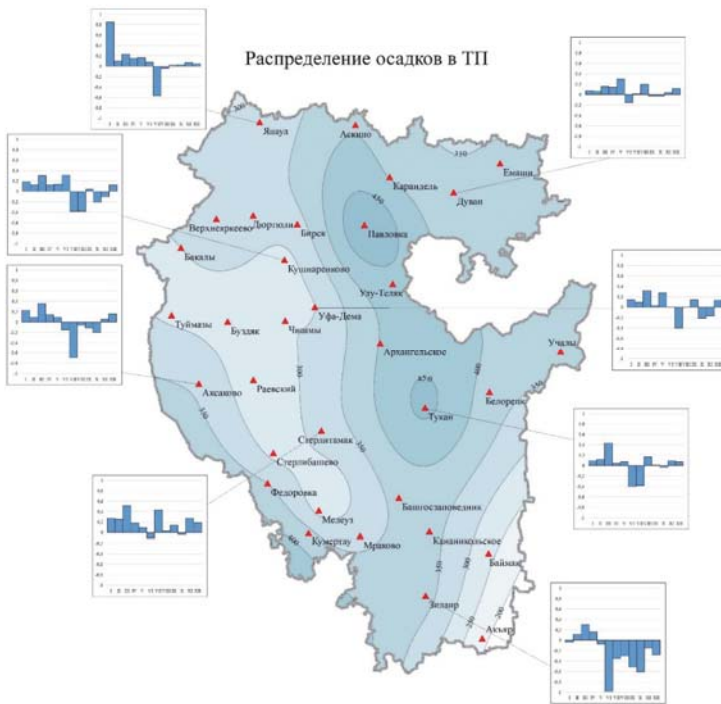


Рис. 3. Карта распределения осадков в теплый период с показателями КНЛТ

По срочным данным из архива ВНИИГМИ-МЦД были посчитаны суммы осадков за 12 ч и отобраны случаи более 30 мм для горной части республики и 50 мм для Предуралья.

В годовом ходе повторяемость очень сильных дождей чрезвычайно выделяются летние месяцы, в переходные сезоны этот показатель снижается более чем в 10 раз в связи с недостаточным влагосодержанием воздушных масс (рис. 4).

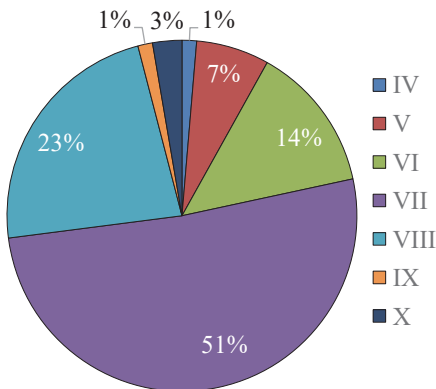


Рис. 4. Процентное соотношение очень сильных осадков по месяцам года на территории РБ в период 1966–2021 гг. (составлено по данным ВНИИГМИ-МЦД)

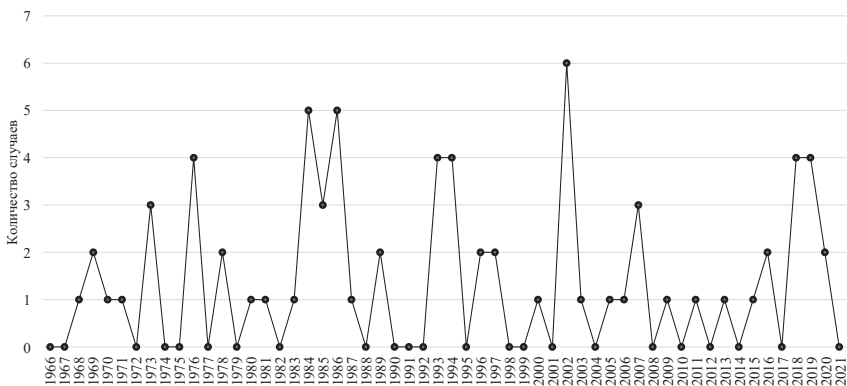


Рис. 5. Количество случаев очень сильных дождей на территории РБ в период 1966–2021 гг. (составлено по данным ВНИИГМИ-МЦД)

Максимальное число случаев сильных дождей наблюдалось в 1984, 2002 гг. За весь период значимый тренд по повторяемости сильных осадков не прослеживается.

В горных районах сильные осадки особо опасны, так как в результате стока со склонов они могут стать причиной быстро развивающихся дождевых паводков на реках, а также привести к интенсивной эрозии почв и даже к селям. Согласно критериям опасного явления очень сильный дождь [8] для МС Тукан и Дуван принят равным 30 мм/12 ч, а для остальной территории РБ – 50 мм/12 ч. По этой причине наибольшее количество случаев сильных осадков проявляется именно на ливнеопасных станциях и постах, т. е. на территории Южного Урала.

Осадки представляют собой одно из самых изменчивых во времени и пространстве метеорологических явлений. На характер их распределения оказывают влияние высота местности, изрезанность рельефа, вид подстилающей поверхности, тип растительного покрова, при этом наиболее значительное – рельеф. Горы усиливают восходящие движения воздуха, активизируют атмосферные фронты и циклоны, поэтому осадков в горах выпадает существенно больше, чем на окружающих их равнинных территориях. Так, в горной местности происходит наложение на горизонтальное распределение осадков по территории (определяемое общим фоном климатического режима, широтной и меридиональной протяженностью) вертикального распределения (определяемого высотой места и орographicкими особенностями) [4].

В критерий *продолжительный сильный дождь* попадают осадки с короткими перерывами (не более 1 ч) с количеством выпавших осадков не менее 100 мм (в ливнеопасных горных районах – 60 мм) за период времени более 12 ч, но менее 48 ч [8]. По срочным данным архива ВНИИГМИ-МЦД были посчитаны суммы осадков за 48 часов и отобраны случаи более 60 мм и 100 мм для горных и равнинных территорий соответственно. Для выявления таких случаев были отобраны дожди с суммой осадков ≥ 100 мм/12–48 ч (равнинные территории) или ≥ 60 мм/12–48 ч (горные территории). Из всех метеостанций (8 МС) данное явление было выявлено только на МС Дуван, Тукан и Зилаир.

На территории Южного Урала выявлено наибольшее число случаев. На МС Тукан их насчитывается 7 (табл. 2). На МС Зилаир зафиксирован всего один: 9–11 августа 1984 г. (112,3 мм). В горных районах число случаев этого явления значительно больше в связи с меньшей суммой осадков в критериях.

Таблица 2

Случаи продолжительных сильных дождей в период 1966–2021 гг. на территории РБ
(составлено по данным ВНИИГМИ-МЦД)

Дуван		Тукан	
29–31 мая 1973 г.	69,9 мм	25–27 июля 1985 г.	60,1 мм
27–29 июля 1976 г.	67,4 мм	29 июня – 1 июля 1986 г.	60,2 мм
10–12 августа 1984 г.	60,2 мм	7–9 июля 1994 г.	64,6 мм
25–27 июля 1986 г.	74,5 мм	10–12 июня 2002 г.	68,3 мм
9–11 июля 1989 г.	86,7 мм	14–16 мая 2007 г.	61,5 мм
11–13 июля 1996 г.	60 мм	1–3 июля 2019 г.	66,6 мм
9–11 октября 1997 г.	62 мм	7–9 августа 2020 г.	71,1 мм
27–29 июля 2006 г.	60,9 мм	Зилаир	
1–3 июля 2019 г.	65,4 мм	9–11 августа 1984 г.	112,3 мм

На МС Тукан из семи зафиксированных случаев большинство приходится на 2000-е гг., что говорит об учащении данного явления. По сравнению с МС Тукан в Дуване зафиксирован рекорд в 86,7 мм осадков. Большинство случаев приходится в 1980-е гг.

Синоптические условия, в которых на территории Предуралья выпадают сильные дожди, достаточно разнообразны. Отмечается преобладающая роль южных и юго-западных циклонов в формировании сильных осадков на Урале. Южные циклоны характеризуются значительным влагосодержанием воздушных масс, большими температурными контрастами, интенсивными восходящими движениями. В зависимости от положения высотной фронтальной зоны, траектории южных циклонов могут существенно различаться. По происхождению выделяют средиземноморские, черноморские, северо-каспийские, южно-каспийские и аральские циклоны. Наиболее часто выход южных циклонов на Урал происходит с февраля по апрель и осенью, однако возможны они и летом. С ними связаны сильные дожди как обложного, так и конвективного характера. Несколько реже сильные осадки наблюдаются при выходах западных и ныряющих циклонов. Для летнего периода наиболее характерны сильные ливни, выпадающие на малоподвижных фронтах с волновыми возмущениями, а также в заполняющихся высотных циклонах. На них приходится более трети всех случаев сильных дождей конвективного характера [9].

Заключение

Таким образом, результаты представленной исследовательской работы показывают, что в условиях глобального потепления климата наблюдаются изменения в режиме температуры и осадков теплого периода на территории Республики Башкортостан.

По результатам настоящего исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. Наблюдается тенденция увеличения как средней годовой температуры воздуха ($0,4^{\circ}\text{C}/10$ лет) на территории РБ, так и температуры воздуха теплого периода ($0,3^{\circ}\text{C}/10$ лет) в период 1966–2021 гг.

2. По критерию сильная жара на территории республики зафиксировано 27 случаев, больше половины которых приходится на август. Рекорд зафиксирован на метеостанции Стерлитамак ($+40,5^{\circ}\text{C}$).

3. Аномально-жаркая погода практически полностью приходится на апрель. Самыми аномальными годами стали 1967, 1975, 1977, 1982 и 2012 гг.

4. Доля осадков в теплый период года значительно больше, чем в холодный. Каждое десятилетие количество осадков в теплый период уменьшается на 4,8 мм, а у годовой суммы происходит рост на 2 мм/10 лет.

5. При сравнении результатов обнаружено, что наибольшее число случаев сильных дождей зафиксировано в горных районах. Это связано с меньшей величиной критерия опасного явления, потому что на склонах может произойти размыв почв, который приведет в дальнейшем селям и оползням. Большая часть таких осадков приходится на июль.

6. Продолжительные сильные дожди выявлены только на метеостанциях Дуван, Тукан и Зилаир. Наибольшее число этого явления наблюдается в Дуване. Значения некоторых случаев превышает 100 мм за двое суток.

Таким образом, выявлено увеличение случаев очень сильных дождей, продолжительных сильных дождей, сильной жары и аномально жаркой погоды.

На фоне потепления климата учащаются явления, как сильная жара и аномально-жаркая погода. Из-за увеличения температуры воздуха увеличивается испарение с поверхности земли и воды, что ведет в дальнейшем к увеличению экстремальных атмосферных осадков.

Авторами планируется продолжить настоящее исследование с включением неблагоприятных условий погоды, а также обработка и анализ данных наблюдений в холодный период.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки Республики Башкортостан НОЦ-РМГ-2023 «Создание методологических основ оценки баланса парниковых газов и определения потенциала депонирования углерода в экосистемах».

Список литературы

1. ВМО 2021. Атлас смертности и экономических потерь в результате экстремальных метеорологических, климатических и гидрологических явлений (1970–2019 гг.). URL: <https://public.wmo.int/ru/> (дата обращения: 12.12.2023).
2. Галимова Р. Г. Анализ изменений температурно-влажностного режима на территории Республики Башкортостан в современный период // Вестник Удмуртского университета. Т. 30. Вып. 1. 2020. С. 83–93.
3. Галимова Р. Г. Климат Республики Башкортостан. Уфа : РИЦ БашГУ, 2017. 96 с.
4. Калинин Н. А., Фрик Л. В., Смирнова А. А. Исследование влияния рельефа Пермского края на распределение полей осадков // Географический вестник. Вып. 2. 2008. С. 187–195.
5. Камалова Р. Г., Исмагилова А. И., Нурмухаметова Э. З. Климатическая характеристика холодного периода в городе Уфа // Вестник Удмуртского университета. Т. 31. Вып. 4. 2021. С. 443–454.
6. Михайлов Л. А., Соломин В. П. Чрезвычайные ситуации природного, техногенного и социального характера и защита от них. СПб. : Питер, 2008. 235 с.
7. Официальный сайт Гидрометцентра России. URL: <https://meteoinfo.ru/hazards-definitions?ysclid=lbv567pxhm614478953> (дата обращения: 12.12.2023).
8. Перечень и критерии опасных явления и комплекс неблагоприятных явлений на территории Республики Башкортостан. URL: <http://www.meteorb.ru/perechen-i-kriterii-opasnykh-yavleniy-i-kompleksov-neblagopriyatnykh-yavleniy-po-territorii-respubliki-bashkortostan> (дата обращения: 12.12.2023).
9. Пьянков С. В., Шихов А. Н. Опасные гидрометеорологические явления: режим, мониторинг, прогноз. Пермь : Раритет-Пермь, 2014. С. 294.
10. Росгидромет. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории РФ. 2022. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/> (дата обращения: 12.12.2023).
11. Специализированные массивы: Всероссийский // Научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. URL: <http://mete.ru/data> (дата обращения: 12.12.2023).
12. Специализированные массивы // Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (дата обращения: 12.12.2023).
13. Центральный банк РФ. Климатические риски в меняющихся экономических условиях. URL: <https://cbr.ru/> (дата обращения: 12.12.2023).
14. IPCC: Climate Change 2021. The Physical Science Basis. URL: <https://www.ipcc.ch> (дата обращения: 12.12.2023).
15. IPCC: Sixth Assessment Report. URL: <https://www.ipcc.ch> (дата обращения: 12.12.2023).

УДК 551.582(470.32)

Засухи и суховеи в Центрально-Черноземном экономическом районе и их влияние на урожайность озимой пшеницы

И. А. Смирнов (ivan-2-2-99@yandex.ru), Е. А. Дронова (edronova@rgau-msha.ru)

*Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева,
г. Москва*

Аннотация. Продолжая исследования, направленные на оценку влияния повторяемости и интенсивности опасных агрометеорологических явлений на динамику продуктивности сельского хозяйства в областях, входящих в состав Центрально-Черноземного экономического района Российской Федерации, нами была рассмотрена частота возникновения атмосферных, почвенных засух и суховеев в период весенне-летней вегетации озимой пшеницы в этих областях. Для этого были использованы метеорологические данные 10 метеостанций в рассматриваемом регионе за 45-летний период с 1978 по 2022 г. и утвержденные руководством Росгидромета критерии опасных агрометеорологических явлений. Было также оценено совпадение наблюдения засух и суховеев во времени и их связь с динамикой урожайности озимой пшеницы в исследуемом регионе. Установлено, что за рассматриваемый период 50, 57, 55, 50 и 50 % атмосферных засух и 52, 53, 50, 50 и 44 % суховеев были зафиксированы в годы со снижением средней урожайности озимой пшеницы в Белгородской, Курской, Воронежской, Липецкой и Тамбовской областях соответственно.

Ключевые слова: озимая пшеница, урожайность, продуктивность, засуха, суховеи, ЦЧЭР.

Актуальность

Данная статья является идейным продолжением нашего предыдущего исследования, в котором мы оценили частоту возникновения и совпадение во времени суховеев, атмосферных и почвенных засух по данным метеостанций пяти областей (Белгородской, Курской, Воронежской, Липецкой и Тамбовской), входящих в состав Центрально-Черноземного экономического района (ЦЧЭР), за многолетний период с 1978 по 2022 г. Результаты этого исследования будут представлены на всероссийской научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня основания кафедры метеорологии и климатологии РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, в декабре 2023 г.

Но помимо непосредственной оценки повторяемости опасных агрометеорологических явлений (ОАЯ) стоит также уделить особое внимание и их влиянию на продуктивность сельскохозяйственных культур, в том числе и на урожайность озимой пшеницы в ЦЧЭР – одного из главных и наиболее благоприятных регионов для возделывания данной сельскохозяйственной культуры в России [7].

Ранее мы провели такого рода исследование, в ходе которого была оценена частота возникновения ОАЯ весенне-летнего периода вегетации в годы со снижением урожайности озимой пшеницы на примере Белгородской области [5]. Однако в том исследовании мы учитывали ОАЯ, отмечавшиеся только в годы с падением продуктивности рассматриваемой культуры.

Здесь же мы приводим результаты исследования, в ходе которого была оценена частота возникновения суховеев, атмосферных и почвенных засух в весенне-летний период вегетации озимой пшеницы в пяти областях, входящих в состав ЦЧЭР, за многолетний период с 1978 по 2022 г., а также их связь с динамикой среднеобластной урожайности рассматриваемой сельскохозяйственной культуры.

Объекты и методы исследования

В рамках исследования нами были использованы многолетние данные о температуре и влажности воздуха, осадках, запасах продуктивной влаги в почве, скорости ветра, полученные на метеостанциях – Готня, Валуйки, Богородицкое-Фенино – на западе, юго-востоке и севере Белгородской области соответственно, Каменная Степь и Воронеж – центр и север Воронежской, Конь-Колодезь – юг Липецкой, Поныри, Курск, Рылск – север, центр и запад Курской, Тамбов – центр Тамбовской [6].

Данные о урожайности озимой пшеницы за рассматриваемый период, взятые как средние по области из статистических источников [1–3; 7].

Для выявления условий, способствующих возникновению суховеев, атмосферных и почвенных засух, нами были использованы официальные критерии, разработанные ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии» и утвержденные руководством Росгидромета [4].

Согласно этим критериям, типовыми условиями, при которых отмечается возникновение атмосферной засухи, далее по тексту – АЗ, являются отмечающиеся на протяжении не менее 30 дней подряд максимальные суточные температуры воздуха от 25 °С и больше (при этом в отдельные дни, не более 25 %, они могут быть меньше этого предела) при отсутствии осадков превышающих 5 мм за сутки. Помимо этого, в использованном нормативном документе, кроме типовой продолжительности условий для возникновения АЗ от 30 дней, дополнительно приводятся пределы наблюдения этих критериев в срок от 20 до 30 дней. Такие случаи также были нами рассмотрены [4]. В таких ситуациях условия не достигали полноценной засухи из-за снижения максимальной суточной температуры ниже 25 °С в течении двух и более дней подряд или выпадения осадков свыше 5 мм.

Почвенная засуха, далее по тексту – ПЗ, наблюдается, когда запас продуктивной влаги в слое почвы 0 – 20 см составляет менее 10 мм в течении трех декад подряд или же при запасе продуктивной влаги в слое 0 – 100 см менее 50 мм на протяжении двух декад подряд [4]. В отличии от АЗ и суховеев, условия возникновения ПЗ было оценить затруднительно, так как мы были ограничены нехваткой большого объема необходимыми данными, в итоге оценка частоты ПЗ была проведена лишь для периода с 2001 по 2020 г.

Согласно принятым критериям, суховеем считается ветер со скоростью 7 м/с и более при температуре свыше 25 °С и относительной влажности воздуха не более 30 %, отмечавшийся на протяжении 5 дней подряд и более хотя бы один из сроков наблюдений [4].

Обсуждение результатов

Для наглядности общее число метеорологических условий, соответствующих возникновению суховеев и атмосферных засух, по данным метеостанций ЦЧЭР в годы с ростом или снижением урожайности среднеобластной урожайности озимой пшеницы представлены в табл.

Таблица

Общее число метеорологических условий, соответствующих возникновению суховеев и атмосферных засух по данным метеостанций ЦЧЭР за период с 1978 по 2022 г., отмечавшихся в годы с ростом или снижением урожайности озимой пшеницы

Метеостанция	Атмосферные засухи		Суховеи	
	Рост урожайности	Снижение урожайности	Рост урожайности	Снижение урожайности
Богородицкое-Фенино	2	4	5	5
Валуйки	6	4	9	10
Готня	2	2	2	2
Курск	0	1	3	3
Поныри	1	1	1	3
Рыльск	2	2	3	2
Воронеж	6	6	5	6
Каменная Степь	4	6	0	3
Конь-Колодезь	5	5	9	9
Тамбов	7	7	10	8

Начнем анализ с Белгородской области. Так как уборка озимой пшеницы в областях ЦЧЭР производится во второй – третьей декаде июля, то при подобном анализе мы не будем учитывать АЗ и суховеи, полностью или большей частью наблюдавшиеся после средней, по данным о фазах развития, полученным в отделе агрометеорологических прогнозов Гидрометцентра, за период с 2001 по 2020 г. даты уборки урожая данной сельскохозяйственной культуры. В случае Белгородской области она приходится на 21 июля.

Всего за рассматриваемый многолетний период полноценная АЗ отмечалась хотя бы по одной метеостанции Белгородской области 4 раза в годы с ростом урожайности озимой пшеницы по отношению к предыдущему году (2001, 2014, 2016, 2019 гг.) и 1 раз с ее снижением (2010 г.). Стоит отметить, что в 2019 г. полноценная АЗ отмечалась на станции Валуйки с 28 мая по 28 июня, тем самым охватывая столь важный для формирования урожая период колошения – цветения – молочной спелости. Условия, способствующие возникновению АЗ, длительностью от 20 до 30 дней отмечались хотя бы по одной из станций при снижении урожайности 9 раз за 6 лет (1981, 1988, 1991, 1999, 2010, 2021 гг.), а при росте 6 раз за 5 лет (2001, 2011, 2019, 2020, 2022 гг.). В годы с ПЗ (2002, 2006, 2018 гг.) продуктивность снижалась.

Всего с 1978 по 2022 г. во время весенне-летней вегетации озимой пшеницы на метеостанциях Белгородской области были отмечены 33 суховея, из них 16 пришлись на 6 лет с ростом урожайности (1983, 1985, 1996, 2005, 2014, 2022 гг.) и 17 на 9 лет с ее снижением (1979, 1984, 1995, 1999, 2002, 2010, 2015, 2018, 2021 гг.). Совпадение потенциальных условий для АЗ и суховеев хотя бы по одной станции было отмечено трижды, 2 раза в 2010 г., когда были серьезные

потери урожая, и 1 раз в июле 2022 г., когда наоборот был побит областной рекорд продуктивности.

Теперь аналогично рассмотрим Курскую область, исключая из анализа засухи и суховеи полностью или большей частью наблюдавшиеся после средней даты уборки урожая – 26 июля.

Всего в весенне-летний период вегетации за рассматриваемые годы полноценная АЗ наблюдалась по 1 разу по метеостанции Рыльск в 2010 г. и Поньри в 1999 г., когда было снижение урожайности озимой пшеницы. Рост ее продуктивности при полноценной АЗ отмечен не был. Можно было бы выделить разве что засуху в 2014 г., но ее большая часть пришлась на третью декаду июля – первые две декады августа. Условия для потенциальной засухи на протяжении от 20 до 30 дней наблюдались хотя бы по одной метеостанции в 2002 и 2019 гг., когда отмечался рост урожайности озимой пшеницы, и в 1999 и 2010 гг., когда наблюдалось ее снижение. ПЗ отмечена на одной из станций в 2015 г., что потенциально могло привести к наблюдавшемуся падению продуктивности пшеницы.

Суховеи в период весенне-летней вегетации озимой пшеницы в Курской области были отмечены на метеостанциях Поньри, Рыльск, Курск суммарно 15 раз, из них по 8 наблюдались в 4 годах со снижением урожайности пшеницы (1979, 2010, 2015, 2018 гг.) и 7 в 4 годах с ее ростом (1996, 2007, 2013, 2014 гг.). Совпадения этих суховеев и условий для возникновения АЗ были отмечены лишь раз на станции Курск в 2010 г.

Перейдем к оценке потенциальное влияние засух и суховеев на урожайность озимой пшеницы в Воронежской области. Среднеобластная дата уборки урожая этой сельскохозяйственной культуры в данном субъекте России в XXI в. приходится на 20 июля.

Сразу отметим что все полноценные АЗ, отмеченные по данным двух метеостанций Воронежской области, кроме засухи 2017 г., пришлись на весенне-летний период вегетации озимой пшеницы, тем самым вероятно оказав влияние на снижение ее урожайности в 1995, 2010 и 2021 гг. В последних двух случаях полноценная АЗ наблюдалась с начала июля, а в первом с 20 мая вплоть до середины августа. В 1999 и 2014 гг., когда был зафиксирован рост продуктивности озимой пшеницы, полноценная АЗ отмечалась с первой декады июня до середины июля и с начала июля соответственно. Потенциальные условия для возникновения АЗ сроком от 20 до 30 дней были также отмечены хотя бы по одной из двух метеостанций 8 раз за 6 лет со снижением урожайности озимой пшеницы и 7 раз за 5 лет с ее ростом. ПЗ были отмечены в годы со снижением продуктивности рассматриваемой культуры – 2009 и 2018 гг.

Суховеи за этот период суммарно на двух метеостанциях были отмечены 30 раз (11 – Воронеж и 19 – Каменная степь). По 15 раз они были отмечены за 8 лет со снижением (1979, 1984, 1998, 2002, 2003, 2010, 2015 и 2021 гг.) и с ростом (1985, 1986, 1996, 2007, 2013, 2014, 2020 и 2022 гг.) урожайности озимой пшеницы. Два суховея в 2014 г. и еще один в 1986 г., когда отмечался рост продуктивности пшеницы, совпали с условиями для потенциального возникновения АЗ. В 1984, 2002 и 2010 гг. также были отмечены совпадения суховеев с АЗ, в

том числе с одной полноценной, что могло способствовать наблюдавшемуся снижению продуктивности озимой пшеницы.

Аналогично рассмотрим результаты анализа, полученные для Липецкой области. Отметим, что необходимые для подобной оценки метеоданные для рассматриваемой области имеются только по одной метеостанции, что также характерно и для Тамбовской. Средняя дата уборки озимой пшеницы в Липецкой области приходится на 26 июля.

По данным метеостанции Конь-Колодезь полноценные АЗ были отмечены с 1978 по 2022 г. 3 раза в период весенне-летней вегетации, а именно в июле 2010, 2021 и 2014 гг. В двух первых случаях фиксировалось снижение среднеобластной урожайности озимой пшеницы, а во втором напротив – рост. Также было отмечено 7 случаев, когда условия для возникновения АЗ наблюдались от 20 до 30 дней. Будучи зафиксированными в 1984 и дважды в 1995 г., они потенциально могли привести к наблюдавшемуся падению продуктивности пшеницы, в частности и потому что они приходились на май – июнь. А остальные 4 раза были отмечены в годы с ростом урожайности рассматриваемой культуры (2002, 2008, 2011, 2013 гг.). ПЗ была зафиксирована по данной метеостанции лишь раз в июне 2018 г., по итогам которого наблюдалось снижение урожайности озимой пшеницы.

Суховеи при таком анализе зафиксированы 18 раз, из них по 9 за 7 лет со снижением продуктивности озимой пшеницы (1979, 1981, 1984, 1998, 2010, 2018, 2019 гг.) и за 6 лет с ее ростом (1985, 1996, 2007, 2011, 2013 гг.). В 4 случаях суховеи совпали с условиями для потенциального возникновения засухи, по 2 раза в годы с падением (1984 и 2010 гг.) и ростом (2011 и 2014 г.) продуктивности пшеницы. В 2010 и 2014 гг. такое совпадение было с полноценной АЗ.

Напоследок аналогично рассмотрим Тамбовскую область, где среднеобластная дата уборки урожая озимой пшеницы приходится на 27 июля.

За рассматриваемый период АЗ во время весенне-летней вегетации отмечены по метеостанции Тамбов 4 раза. По два раза они отмечены в годы с ростом (2014 г.) и снижением (2010, 2018 гг.) урожайности озимой пшеницы. Потенциальные АЗ сроком от 20 до 30 дней наблюдались 10 раз, по 5 аналогично при увеличении (1988, 2001, 2008, 2013, 2022 гг.) и падении (1981, 1991, 1998, 2012, 2021 гг.) продуктивности пшеницы. ПЗ была отмечена по данным метеостанции Тамбов в июне 2010 и 2019, в обоих случаях потенциально оказав влияние на наблюдаемое снижение урожайности в эти годы. Примечательно также то, что ПЗ в июне 2010 г. в Тамбове была единственной из всех рассмотренных в этой статье, которая частично наблюдалась одновременно с АЗ.

При таком подходе в Тамбовской области были отмечены 18 случаев суховеев, по 9 раз они отмечались в годы со снижением продуктивности озимой пшеницы (1979, 1984, 2002, 2010, 2018, 2019 гг.) и с ее ростом (1985, 1986, 1988, 2007, 2013, 2014 гг.). Причем в 2014 г. было зафиксировано сразу 4 суховея, в том числе в мае. Суховеи в сочетании с условиями для возникновения АЗ были отмечены 5 раз, во всех 5 случаях АЗ были полноценными. Из них 4 пришлось как раз на 2014 г., в котором наблюдался рост урожайности пшеницы, и 1 раз такое совпадение было отмечено в 2018 г. при ее снижении.

Выводы

Мы оценили частоту возникновения суховеев, а также атмосферных и части почвенных засух в период весенне-летней вегетации озимой пшеницы в областях, входящих в состав ЦЧЭР, за период с 1978 по 2022 г., также рассмотрев их совпадения во времени. Что не менее важно, мы проанализировали связь этих опасных агрометеорологических явлений с динамикой урожайности озимой пшеницы в рассматриваемом регионе.

Заметим, что большая часть засух, в том числе наблюдающихся совместно с суховеями, приходится на XXI в., а особенно на период начиная с 2010 г. Чаше, чем в других областях, условия характерные для возникновения АЗ отмечались в Тамбовской и Воронежской областях, реже – в Курской. Условия свойственные суховеям реже отмечались также в Курской области, а чаще и продолжительней они наблюдались – в Липецкой, Воронежской и Тамбовской областях.

Подводя общий итог можно отметить, что в общем за 45 выбранных для оценки лет 50 %, 57 %, 55 %, 50 % и 50 % атмосферных засух и 52 %, 53 %, 50 %, 50 % и 44 % суховеев были зафиксированы в годы со снижением средней урожайности озимой пшеницы в Белгородской, Курской, Воронежской, Липецкой и Тамбовской областях соответственно. За период с 2001 по 2020 г. было отмечено 3, 2, 2, 1, 1 случая с условиями характерными для возникновения почвенной засухи в Белгородской, Тамбовской, Воронежской, Липецкой и Курской областях соответственно. Все они наблюдались в годы со снижением урожайности озимой пшеницы, но лишь один раз в июне 2010 г. в Тамбовской области они были отмечены одновременно с атмосферной засухой.

Кроме того отметим, что для более наглядной и точной оценки влияния рассмотренных опасных явлений на продуктивность сельскохозяйственных культур все-таки стоит использовать метеорологические данные и сведения об урожайности, полученные на одной и той же локальной территории/метеостанции, а не из разных источников, что зачастую проблематично, или же дополнительно применять другие критерии для оценки возникновения таких ОАЯ, например выявлять засуху используя показатель ГТК.

Список литературы

1. Динамика урожайности сельскохозяйственных культур в РСФСР / А. И. Манелля, Н. Н. Нагнибедова, А. А. Френкель, Л. И. Ващуков. М. : Статистика, 1972. 190 с.
2. Манелля А. И., Гончарова М. В., Трегубов В. А. Развитие рынка зерна в России за 1990–1999 годы. М. : Центр экон. конъюнктуры при Правительстве Российской Федерации, 2000.
3. Манелля А.И., Мельникова Т. В., Гончарова М. В. и др. Развитие рынка зерна в России. (Тенденции производства зерна в Российской Федерации за 1970–1996 годы. М. : Центр экон. конъюнктуры при Правительстве Российской Федерации, 1997.
4. Рекомендации Р 52.33.877–2019. Оценка опасных агрометеорологических явлений. Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД, 2019. 32 с.
5. Смирнов И. А. Возникновение опасных агрометеорологических явлений в годы со снижением урожайности озимой пшеницы на примере Белгородской области // Материалы международной научной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 180-летию со дня рождения К. А. Тимирязева, 2023.
6. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России: Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549 / О. Н. Булыгина, В. М. Веселов, В. Н. Разуваев, Т. М. Александрова. URL: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных> (дата обращения: 15.05.2023).
7. Бюллетени о состоянии сельского хозяйства // Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13277> (дата обращения: 05.05.2023.)



СЕКЦИЯ

**СОВРЕМЕННЫЕ
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ**



УДК 556.5.01

Краткий анализ применения возможностей искусственного интеллекта в гидрологии Российской Федерации

А. А. Наумова (koshevaya81@mail.ru)

Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, г. Москва

Аннотация. Возможности искусственного интеллекта, основанные на использовании глубоких нейронных сетей, широко используемое для обработки статистических данных в различных отраслях промышленности, в гидрологии находится на стадии развития, и применение этого подхода ограничено из-за низкой интерпретируемости глубоких нейронных сетей. Тем не менее, использование большого объема данных для обучения глубоких нейронных сетей может повысить их обобщающую способность. В настоящее время доступно много открытых гидрологических и метеорологических данных, которые можно использовать для обучения нейронных сетей. В статье даётся краткий обзор истории подхода обработки статистических данных с использованием глубоких нейронных сетей. Анализируются сведения о применении этого подхода в отдельных отраслях и научных направлениях. Оцениваются потенциальные возможности и перспективы применительно к анализу гидрологических данных. Однако, несмотря на растущий интерес к глубокому обучению в гидрологии, точные результаты его применения пока неясны.

Ключевые слова: гидрология, глубокие нейронные сети, глубокое обучение, моделирование

Глубокие нейронные сети стали популярными в различных областях, включая компьютерное зрение, обработку естественного языка, медицину и финансы. Они также применяются в промышленности и показывают выдающиеся результаты в распознавании образов, машинном переводе и распознавании речи. В науке о Земле они используются для распознавания типов облаков, определения типа почвенного покрова по данным ДЗЗ, обнаружения изменений в землепользовании и прогнозирования осадков. В гидрологии они используются для извлечения релевантной информации из данных дистанционного зондирования, моделирования динамики гидрологических величин, моделирования управления водными ресурсами и временных распределений гидрологических величин.

Однако так было не всегда. История развития и применения искусственных нейронных сетей полна взлетов и падений, больших надежд и разочарований. Одним из самых известных ранних трудов в области нейросетей является работа Уоррена Мак-Калеха и Уолтера Питтса «A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity», опубликованная в 1943 г., в которой была представлена модель искусственных нейронов, являющаяся прародителем современных нейронных сетей. Кроме того, в 1958 г. Фрэнк Розенблатт представил модель перцептрона, первой нейронной сети для обучения с учителем. Эти работы стали базой для развития нейросетей впоследствии.

Мак-Калех изучал способы, которыми нейроны в мозге обмениваются информацией, и пытался воссоздать этот процесс в компьютерных моделях. Он также предложил концепцию «логического вычисления» в нейросетях, которая считается предшественником современного машинного обучения.

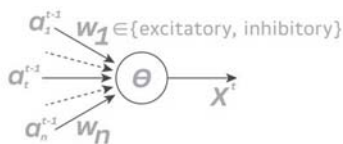


Рис. 1. Нейрон Мак-Каллоха и Питтса

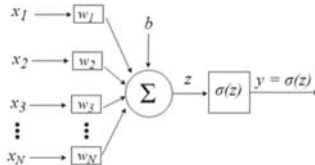


Рис. 2. Перцептрон Ф. Розенблатта

Спустя 80 лет после публикации Мак-Каллоха и Питтса, концепция искусственных нейросетей не претерпела почти никаких изменений.

До конца 1960-х гг. исследования в области искусственных нейронных сетей находились в стадии активного развития. Одним из ключевых моментов этого периода стала статья Розенблатта (1958), в которой он предложил решение задачи бинарной классификации на основе линейного перцептрона и ввел понятие «обучения» нейронной сети. Однако после выхода книги Мински и Пейперта «Перцептроны» в 1969 г., интерес к нейронным сетям временно снизился. В СССР одним из самых преданных сторонников подхода, предложенного Розенблаттом, был Алексей Григорьевич Ивахненко. Его научный интерес к самоорганизующимся системам проявился еще в 1950-е гг., и в 1959 г. он успешно создал и протестировал свою собственную версию перцептрона – машину «Альфа». Важным достижением Ивахненко стало создание и развитие метода группового учета аргументов (МГУА), одного из первых в истории алгоритмов глубокого обучения. Уже в начале 1970-х гг. Ивахненко и его коллеги смогли обучать восьмислойные нейронные сети.

Первая нейронная сеть в России, известная как «Анализатор Ищенко – Шестопалова», была разработана и создана в 1960-х гг. Иваном Михайловичем Ищенко и Юрием Михайловичем Шестопаловым в Институте точной механики и вычислительной техники (ныне Институт управления им. В. А. Трапезникова РАН) в Москве. Эта нейронная сеть была предназначена для решения задач классификации и распознавания образов и успешно справлялась с задачами, которые не могли быть решены традиционными методами компьютерной обработки данных. С тех пор в России было создано множество других нейросетей, и сегодня страна является одним из лидеров в области искусственного интеллекта и нейронных сетей. Многие из этих нейросетей активно используются в различных областях, включая медицину, финансы, транспорт, образование и телекоммуникационный рынок.

Вторая волна интереса к нейронным сетям связана с классическими работами Румельхарта, Хинтона и Уильямса [1].

А. А. Веденов, А. А. Еглов и Е. Б. Левченко в середине 1990-х гг. занимались уже архитектурными моделями и реализацией нейронных ансамблей. Нейронная сеть – модель вычислений, которая относится к классу «коннекцио-

нистских моделей» [2]. Нейроны – это бистабильные устройства, которые способны выполнить простые вычисления (сложение с накоплением и нелинейная функция), так они писали в своем труде.

Однако вскоре наступило разочарование. Это произошло из-за ограниченных вычислительных ресурсов и объемов данных для обучения нейронных сетей. В результате более простые и менее требовательные алгоритмы машинного обучения, такие как деревья решений или машины опорных векторов, стали применяться вместо нейронных сетей. Этот период недовольства продолжался около 20 лет и привел к современной революции глубокого обучения [3]. С середины 2000-х годов начался новый период изучения искусственных нейронных сетей. Улучшение вычислительных ресурсов и появление больших объемов данных сделали возможным разработку и обучение глубоких нейронных сетей. Эта область исследований получила название глубокого обучения. В 2012 г. была разработана глубокая сверточная нейронная сеть AlexNet [4], которая установила новый рекорд по эффективности распознавания различных классов объектов на конкурсе ImageNet [5]. Три года спустя глубокая нейронная сеть ResNet-152 показала эффективность распознавания на ImageNet, превосходящую точность распознавания изображений, которую достигает человек [6].

В России, количество запросов по нейронным сетям началось чуть с опозданием, относительно всего мира. Интерес к ним резко вырос, начиная только с 2022 г. (рис. 3, 4).

Российский ученый-компьютерщик, ныне доцент кафедры компьютерных наук в Университет Принстона Ольга Русаковская с коллегами добились больших успехов в распознавании изображений на наборе данных ImageNet, что послужило источником современной шумихи вокруг использования глубоких нейронных сетей [6], что также находит свое подтверждение в динамике запросов к поисковой системе Google.

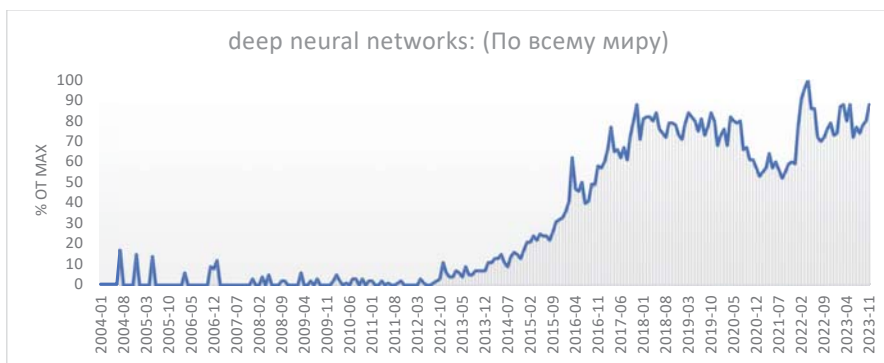


Рис. 3. Популярность запроса «Глубокие нейронные Сети» в поисковой системе Google по данным сервиса Google Trends 2004–2023 гг. (в % от max) (Trends.google.com, 2023–11)



Рис.4. Популярность запроса «Глубокие нейронные Сети» в России поисковой системе Google по данным сервиса Google Trends 2004–2023 (Trends.google.com, 2023–11)

В табл. представлены данные по регионам России о количестве запросов.

Таблица

Запросы по регионам России, % от макс. (01.01.2004 – 21.11.2023)

Регионы	%
Томская область	100
Город Москва	97
Город Санкт-Петербург	82
Новосибирская область	75
Московская область	75
Владимирская область	61
Нижегородская область	60
Пензенская область	56
Ярославская область	56
Калужская область	54
Воронежская область	54
Республика Татарстан	51
Рязанская область	50

Глубокие нейронные сети нашли свое применение для решения гидрологических задач с еще большим опозданием, чем в науках о Земле в целом (рис. 5) [7; 8]. Так, в своем обзоре Шен (2018) выделяет три области, в которых глубокие нейронные сети продемонстрировали свою высокую эффективность: 1) извлечение релевантной гидрологической информации из данных дистанционного зондирования [9], 2) моделирование динамики гидрологических величин [10], 3) моделирование и генерация сложных пространственных и временных распределений гидрологических величин [11; 12]. Таким образом, в настоящее время мы наблюдаем лавинообразный рост интереса гидрологического сообщества к глубоким нейронным сетям [7]. Этот факт подтверждается и данными о количестве опубликованных научных работ в России в области исследования водных ресурсов, которые представлены в научной электронной библиотеке Elibrary (рис. 6).



Рис. 5. Популярность запроса «Глубокие нейронные Сети в «науки о Земле» по регионам России поисковой системе Google по данным сервиса Google Trends (Trends.google.com, 2023–11)

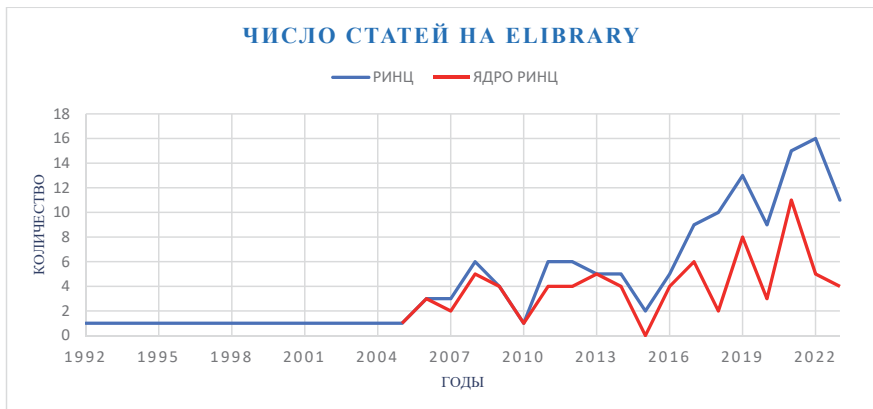


Рис. 6. Общее количество опубликованных научных работ в электронной научной библиотеке Elibrary «Глубокие нейронные сети в гидрологии», входящих в область исследований «Водные ресурсы»

Большинство научных работ, опубликованных в период с 1992 по 2023 г., связаны с различными организациями и университетами, включая Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Институт водных проблем РАН, Российский государственный аграрный университет-Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева и Московский государственный строительный университет (национальный исследовательский университет). В 2022 г. количество научных работ, посвященных применению глубоких нейронных сетей в гидрологии, увеличилось в 16 раз по сравнению с 2004 г. Это впечатляющее уве-

личение количества публикаций свидетельствует о растущем интересе к применению глубокого обучения в этой области. Ожидается, что в ближайшие годы количество научных работ, связанных с применением глубоких нейронных сетей в гидрологии, будет продолжать расти в геометрической прогрессии.

Таким образом, любая нейронная сеть является универсальным аппроксиматором – моделью, которая функционально связывает целевую переменную с пространством ее признаков. Такой тривиальный математический подход к определению нейронной сети открывает неограниченные возможности модификации любых природных (и не только) процессов: для этого необходимо иметь набор данных описывающих поведение целевой переменной в зависимости от пространства ее признаков, и вычислительное время для эмпирического выбора подходящей архитектуры нейронной сети.

К сожалению, учитывая начальную стадию развития глубокого обучения в гидрологии, в настоящее время нельзя с уверенностью сказать, что глубокие нейронные сети превосходят классические подходы к моделированию по эффективности.

Использование как можно большего количества данных для обучения глубоких нейронных сетей позволяет повысить их обобщающую способность и, как следствие, эффективность. Однако возникает вопрос – какой объем данных можно считать достаточно большим для успешного обучения глубокой нейронной сети и существуют ли такие наборы данных в гидрологии?

На сегодняшний день доступно огромное количество открытых гидрологических и метеорологических данных, которые можно использовать для обучения глубоких нейронных сетей. Сюда входят численные климатические реанализы, численные модели погоды, дистанционное зондирование и автоматизированные системы мониторинга окружающей среды. Благодаря этому, гидрология готова к расширению применения глубокого обучения.

Глубокие нейронные сети являются универсальными и эффективными моделями нового поколения, которые могут быть использованы для использования потенциала существующих «больших» экологических данных. Однако из-за низкой интерпретируемости глубоких нейронных сетей, их применение в критических областях, таких как прогнозирование опасных природных явлений, может быть ограничено. В этих областях доверие к системе моделирования, основанное на прозрачности и детерминированности ее симуляций, играет решающую роль.

Прогноз развития технологии глубокого обучения в гидрологии был представлен Айзелем Георгием Владимировичем 2021 г. Согласно этому прогнозу, пик завышенных ожиданий вокруг глубоких нейронных сетей в гидрологии придется на период с 2025 по 2035 г. [9] Простота доступа к большим данным в области гидрологии и смежных дисциплин, а также доступность вычислительных ресурсов делают технологию глубокого обучения особенно перспективной для решения научных и практических задач в гидрологии. Ожидается, что в ближайшие годы будет опубликовано все больше исследований, демонстрирующих высокую эффективность глубоких нейронных сетей для гидрологических приложений.

Список литературы

1. *Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J.* Learning representations by back-propagating errors // *Nature*. 1986. Vol. 323 (6088). P. 533–536.
2. *Веденов А. А., Еглов А. А., Левченко Е. Б.* Архитектурные модели и реализация нейронных ансамблей // *Итоги науки и техники. Серия: Физические и математические модели нейронных сетей*. М. : ВИНТИ. 1990. Т. 1. С. 14–92.
3. *Schmidhuber, J.* Deep learning in neural networks: An overview // *Neural networks*. 2015. Vol. 61. P. 85–117.
4. *Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E.* Imagenet classification with deep convolutional neural networks // *Advances in neural information processing systems 25 (NIPS 2012)*. Lake Tahoe : NIPS, 2012. P. 1097–1105. URL: <https://papers.nips.cc/paper/4824-imagenet-classification-with-deep-convolutional-neural-networks.pdf> (date of access: 04.11.2023).
5. *Deng J., Dong W., Socher R., Li L. J., Li K., Fei-Fei L.* Imagenet: A large-scale hierarchical image database // *2009 IEEE Conference on computer vision and pattern recognition (CVPR2009)*. Miami : IEEE, 2009. P. 248–255. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5206848> (date of access: 04.11.2023).
6. Imagenet large scale visual recognition challenge / O Russakovsky, J. Deng, H. Su [et al.] // *International journal of computer vision*. 2015. Vol. 115 (3). P. 211–252.
7. *Shen C.* A transdisciplinary review of deep learning research and its relevance for water resources scientists // *Water Resources Research*. 2018. Vol. 54 (11). P. 8558–8593.
8. *Слейман А., Козлов Д. В.* Настройка пользовательского интерфейса для оценки стока в бассейне реки Эль-Аси с использованием искусственного интеллекта // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17, № 11. С. 1471–1477. DOI:10.22227/1997-0935.2022.11.1471-1477
9. Deep Learning for Precipitation Estimation from Satellite and Rain Gauges Measurements / A. Moraux, S. Dewitte, B. Cornelis, A. Munteanu // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11 (21). Art. 2463.
10. *Ayzel G. V.* Deep neural networks in hydrology: the new generation of universal and efficient models // *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2021. Vol. 66, N 1. P. 5–18. DOI:10.21638/spbu07.2021.101
11. Training-image based geostatistical inversion using a spatial generative adversarial neural network / E. Laloy, R. Héroult, D. Jacques, N. Linde // *Water Resources Research*. 2018. Vol. 54 (1). P. 381–406.
12. *Редников С. Н., Наумова А. А.* Оценка нормативных расчетных экстремальных характеристик стока при использовании различных законов распределения // *Природобустройство*. 2023. № 3. С. 92–96. DOI:10.26897/1997-6011-2023-3-92-96



СЕКЦИЯ

ВЛИЯНИЕ

**КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ
НА ТРАНСФОРМАЦИЮ ПРИРОДНЫХ
И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ
УСЛОВИЙ**



УДК 631.92(571.150)

Оценка агрометеорологических условий выращивания гречихи посевной (*Fagopyrum esculentum Moench.*) на территории Алтайского края

С. М. Авдеев (avdeev@rgau-msha.ru), Е. А. Дронова (edronova@rgau-msha.ru),
И. Ф. Асауляк (iasaulyak@rgau-msha.ru)

Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, г. Москва

Аннотация. Целью исследования является обоснование выращивания культуры гречихи посевной на территории субъекта Российской Федерации (Алтайского края) на основе анализа агроклиматических и агрометеорологических показателей. При этом поставлены следующие задачи: установить суммы температур и осадков, даты перехода через 0, 5, 10 и 15 °С и продолжительность вегетационных периодов культуры; проанализировать динамику средней многолетней температуры воздуха и сумм осадков, изменение периодов дат перехода температуры воздуха через 0, 5, 10 и 15 °С, изменение продолжительности периодов, сумм температур и условий влагообеспеченности; проанализировать условия тепло- и влагообеспеченности фаз развития гречихи посевной; сравнить полученные данные со среднемноголетними значениями и составить агроклиматическую характеристику возделывания гречихи посевной на территории Алтайского края.

Ключевые слова: гречиха посевная, температура воздуха, осадки, гидротермический коэффициент (ГТК), вегетационный период

По результатам агрометеорологических и агроклиматических наблюдений возможно оценить влияние условий погоды на развитие и состояние посевов сельскохозяйственных культур. Их влияние в значительной мере обуславливает величину урожая, качество продукции, а также ее стоимость. Поэтому необходимо уметь грамотно использовать ресурсы климата для повышения продуктивности сельскохозяйственного производства и эффективно противостоять неблагоприятным метеорологическим явлениям, происходящим в атмосфере. [1]

Алтайский край расположен в юго-восточной части Западной Сибири. Его площадь составляет 169,1 тыс. км. По характеру рельефа и природным особенностям на территории края выделяются Кулундинская равнина. Приобское плато, долина Оби, Бийско-Чумышская возвышенность, предгорье и Горный Алтай.

Обь на территории края протекает в низких берегах, сложенных легкоразмываемыми отложениями, и представляет собой равнинную реку с малыми уклонами и долины, ширина которых достигает нескольких десятков километров. На всем протяжении реки много перекатов. Средние скорости течения в межень составляют 0,5–0,7 м/с, в половодье – 2,0–2,5 м/с.

На территории края каштановые почвы распространены в зоне сухих степей. В геоморфологическом отношении эти районы относятся к области Кулундинской озерной равнины и области дельт ложбин древнего стока. Каштановые почвы развиты преимущественно на склонах плоских увалов или приозерных котловин и ложбин, но в крайних западных районах распространены также и на основной поверхности Кулундинской равнины.

Черноземы южные формируются в условиях засушливых типчаково-ковыльных степей. Располагаются они к востоку от Кулундинского озера, от долины Бурлы на севере до долины Алей на юге. В области предгорных равнин они занимают ограниченную площадь, тяготеющую лишь к самым западным окраинам предгорных, равнин. Выщелочные черноземы особенно широко распространены на Бийско-Чумышской возвышенности и на правобережье р. Чумыша. Эти почвы относятся к группе хороших плодородных почв, обладающих большими запасами питательных веществ.

Климат Алтайского края определяется сложным взаимодействием циркуляции атмосферы и характера подстилающей поверхности. Отличается он жарким, но коротким летом, холодной малоснежной зимой с сильными ветрами и метелями. Континентальность климата края наиболее ярко подчеркивают ранние заморозки в теплое время года, которые возможны даже в вегетационный период.

Средняя температура воздуха самого теплого месяца (июля) 18–21 °С. Максимальная температура воздуха в отдельные годы может достигать в западной половине 40–41 °С, в восточной 37–39 °С. Наиболее высокие температуры летом наблюдаются в районах Кулунды.

Самый холодный месяц – январь. Средняя температура воздуха в январе минус 16–20 °С. Абсолютный минимум температуры в отдельные годы от западных до восточных границ края изменяется на 10, достигая в Кулундинской, Алейской степях и предгорьях Алтайских гор минус 44–48 °С, в восточной же части края от р. Оби до предгорий Салаирского кряжа минус 52–54 °С. Амплитуда колебаний экстремальных температур достигает на левобережье Оби 85–90 °С, на правобережье 90–95 °С.

Продолжительность периода со средней суточной температурой воздуха выше нуля градусов в крае 190–205 дней. Ежегодно в течение 2,5–3,5 месяца на большей части рассматриваемой территории средняя температура воздуха превышает 15 °С, а на юго-западе края от 15 до 40 дней средняя суточная температура воздуха превышает 20 °С.

Распределение снежного покрова по территории находится в полной зависимости от термического режима. В степных районах края снег выпадает на 1–7 дней позднее даты перехода средней суточной температуры воздуха через 0 °С, т. е. ложится уже на охлажденную землю. По долине Оби даты перехода средней суточной температуры воздуха через 0 °С и выпадение снега сближаются [2; 3].

На основе средних многолетних данных агроклиматических ресурсов можно произвести оценку агроклиматических условий периода вегетации гречихи за 11 лет по метеорологической станцией Барнаул, расположенной в центральной части региона.

Вегетационный период гречихи разбит на четыре межфазных периодов:

- 1) посев – всходы;
- 2) всходы – появление соцветий;
- 3) появление соцветий – созревание;
- 4) посев – созревание.

Таблица 1

Агрометеорологические условия периода «посев – всходы» МС Барнаул

Год	Фазы развития		N, сут.	T _{ср} , °С	ΣT _{акт} , °С	ΣR, мм	ГТК	Σd, мб	T _{макс} , °С
	посев	всходы							
2003	09.06	16.06	8	20,6	165	16	0,9	10	32
2004	08.06	14.06	7	19,8	139	5	0,4	11	33
2005	02.06	08.06	7	16,1	113	13	1,2	8	32
2006	06.06	12.06	7	19,8	138	5	0,4	12	33
2007	08.06	14.06	7	14,2	99	18	1,8	7	30
2014	06.06	12.06	7	13,3	93	11	1,2	8	32
2016	01.06	08.06	8	17,7	142	0,1	0,01	11	31
2017	04.06	08.06	5	17,2	86	7	0,8	9	34
2018	07.06	14.06	8	19,3	154	13	0,9	11	32
2019	01.06	08.06	8	16,6	133	10	0,7	7	30
2020	25.05	30.05	6	16,8	101	10	1,0	7	33

Анализируя многолетние данные, представленные в табл. 1, можно установить, что в среднем на МС Барнаул посев гречихи производят 4 июня. Самая ранняя дата посева за исследуемый период отмечается в 2020 г. – 25 мая, а самая поздняя в 2003 г. – 9 июня.

Средняя дата появления всходов гречихи вблизи территории МС Барнаул приходится на 10 июня. Наиболее ранняя дата всходов за исследуемый период отмечается в 2020 г. – 30 мая, наиболее поздняя в 2003 г. – 16 июня. В целом даты появления всходов имеют больший разброс, чем даты посева, а средняя продолжительность периода «посев – всходы» составляет 7 дней.

Средняя температура воздуха вблизи территории МС Барнаул за исследуемый период составила около 17 °С. Минимальная средняя температура воздуха отмечается в 2014 г. и составляет около 13,3 °С. Максимальная средняя температура воздуха отмечается в 2003 г. и составляет около 20,6 °С

Суммы активных температур за представленный период были рассчитаны с учетом биологического минимума гречихи равному 10 °С. Согласно этому средняя сумма активных составила 123 °С.

Среднее количество осадков за текущий период составило 9 мм, наибольшее количество выпавших осадков отмечается в 2007 г. и составляет 18 мм. Минимальное количество выпавших осадков пришлось на 2016 г. составило 0,1 мм.

Показатель суммы дефицитов влажности воздуха в пределах МС Барнаул по годам распределился таким образом, что среднее значение составило 9 мб. Максимальное значение показателя отмечалось в 2006 г. и составило 12 мб. Минимальное значение было зафиксировано в 2007, 2019 и 2020 гг. и составило 7 мб.

Имея данные о сумме активных температур и сумме осадков, можно рассчитать гидротермический коэффициент (ГТК). Среднее значение ГТК по МС Барнаул за данный период составило – 0,8. Максимальное значение ГТК наблюдалось в 2007 г. и имело значение 1,8. Минимальное значение ГТК наблюдалось в 2007 г. и имело значение 0,01, это связано с маленьким количеством выпавших осадков в данный год. В целом по годам наблюдалось недостаточное увлажнение территории.

Таблица 2

Агрометеорологические условия периода «всходы – появление соцветий» на МС Барнаул

Год	Фазы развития		N, сут.	T _{ср} , °С	ΣT _{акт} , °С	ΣR, мм	ГТК	Σd, мб	T _{макс} , °С
	всходы	появление соцветий							
2003	16.06	26.06	11	20,0	219,6	17	0,8	9	32
2004	14.06	26.06	13	19,9	258,9	61	2,4	8	33
2005	08.06	20.06	13	19,2	249,3	63	2,5	10	36
2006	12.06	26.06	15	20,8	311,7	25	0,8	11	33
2007	14.06	26.06	13	18,4	238,6	21	0,9	8	31
2014	12.06	26.06	15	21,4	321,3	0	0,0	12	32
2016	08.06	24.06	17	19,9	338,9	40	1,2	10	31
2017	08.06	26.06	19	20,3	386,6	27	0,7	10	34
2018	14.06	30.06	17	20,6	350,4	38	1,1	9	32
2019	08.06	02.07	25	17,4	435,4	46	1,1	8	30
2020	30.05	16.06	18	16,0	288,8	21	0,7	8	33

Период «всходы – появление соцветий» является одним из наиболее важных. В этот период в растениях происходит процесс заложения и формирования соцветий, при благоприятных условиях данный процесс продолжается до уборки урожая. Показатели условий тепло- и влагообеспеченности в этот период определяют величину будущего урожая.

Средняя дата появления всходов гречихи на территории МС Барнаул приходится на 10 июня. Наиболее ранняя дата посева за исследуемый период отмечается в 2020 г. – 25 мая, а наиболее поздняя в 2003 г. – 9 июня.

В среднем по области появление соцветий на растениях гречихи отмечается 25 июня. Наиболее ранняя дата наступления этой фазы развития наблюдается в 2020 г. – 16 июня, а наиболее поздняя в 2019 г. – 2 июля.

Продолжительность периода «всходы – появление соцветий» в среднем по годам составляет 16 дней. Дольше всего он наблюдается в 2019 г. и составляет 25 дней, а меньше всего в 2003 г. – 11 дней.

Средняя температура воздуха по многолетним данным на территории МС Барнаул за данный период составляет 19,5 °С. Максимальное значение по годам в данный период наблюдалось в 2014 г. и составило 21,4 °С, минимальное же наблюдалось в 2020 г. и составило 16,0 °С.

Среднее значение суммы активных температур по территории МС Барнаул за период «всходы-появление соцветий» составляет 309 °С. Среднее значение суммы осадков за период «всходы – появление соцветий» составило 32 мм, наибольшее значение показателя было зафиксировано в 2005 г. и составило 63 мм, а наименьшее наблюдалось в 2014 г. и составило 0,1 мм.

Показатель суммы дефицитов влажности воздуха в пределах МС Барнаул по годам распределился таким образом, что среднее значение составило 9 мб. Максимальное значение показателя отмечалось в 2014 г. и составило 12 мб. Минимальное значение было зафиксировано в 2002, 2007, 2019 и 2020 гг. и составило 8 мб.

Имея данные о сумме активных температур и сумме осадков, можно рассчитать ГТК. Среднее значение ГТК по МС Барнаул за данный период составило – 1,1. Максимальное значение ГТК наблюдалось в 2005 г. и имело значение 2,5, в этот промежуток времени выпало большое количество осадков. Минимальное значение ГТК наблюдалось в 2014 г. и имело значение 0,001. В среднем по годам наблюдалось равенство прихода и расхода влаги вблизи рассматриваемой территории.

Период «появление соцветий – созревание» является критическим для жизни растений гречихи. Наибольшая чувствительность гречихи к низким и высоким температурам наблюдается в фазу цветения. При прогревании воздуха выше 30 °С и относительной влажности ниже 30 % резко ухудшаются условия опыления и оплодотворения из-за малого выделения нектара и его высыхания. При температуре воздуха более 30 °С в тени и 50 °С на поверхности почвы наблюдается «захват» гречихи – отмирание и усыхание многих бутонов, цветков и сформированной завязи. Оптимальные условия в критический период развития гречихи (от начала цветения до созревания) – теплая (16... 18 °С) и влажная (более 50 % относительная влажность) погода, при которой формируется наибольший урожай. Агрометеорологические условия периода «появление соцветий – созревание» на МС Барнаул приведены в табл. 3.

Таблица 3

Агрометеорологические условия периода «появление соцветий – созревание» на МС Барнаул

Год	Фазы развития		N, сут.	T _{ср.} , °С	ΣT _{акт.} , °С	ΣR, мм	ГТК	Σd, мб	T _{макс.} , °С
	появление соцветий	созревание							
2003	26.06	21.08	57	18,2	1035,9	69	0,7	8	32
2004	26.06	18.08	54	18,5	1001,0	119	1,2	7	34
2005	20.06	20.08	62	18,6	1154,9	164	1,4	7	36
2006	26.06	24.08	60	20,2	1211,5	119	1,0	9	33
2007	26.06	23.08	59	18,8	1074,1	59	0,6	9	32
2014	26.06	30.08	66	19,8	1305,2	171	1,3	9	37
2016	24.06	20.08	58	19,9	1155,3	142	1,2	7	31
2017	26.06	18.08	54	18,8	1013,2	99	1,0	6	31
2018	30.06	12.08	44	18,4	808,6	79	1,0	7	32
2019	02.07	14.08	44	18,3	889,3	61	0,7	9	34
2020	16.06	10.08	56	20,0	1118,2	110	1,0	10	33

В среднем по области появление соцветий на растениях гречихи отмечается 25 июня. Наиболее ранняя дата наступления данной фазы развития наблюдается в 2020 г. – 16 июня, а наиболее поздняя в 2019 г. – 2 июля.

Начало созревания в среднем отмечается 19 августа. Раньше всего начало этой фазы отмечается в 2020 г. – 10 августа, позже всего фаза была зафиксирована в 2014 г. – 30 августа.

Средняя продолжительность периода «появление соцветий – созревание» составляет 55 дней. Наименьшая продолжительность этого периода была зафиксирована в 2019 и 2020 гг. и составила 44 дня. Наибольшая продолжительность периода была зафиксирована в 2014 г. и составила 66 дней.

Средняя температура воздуха по территории МС Барнаул за исследуемый межфазный период составила 19,0 °С. Наибольшая средняя температура отмечается в 2002 г. и составляет 20,2 °С, а была зафиксирована в 2003 г. и составила 18,2 °С.

Среднее значение сумм активных температур воздуха на исследуемой территории составляет 1069 °С.

Среднее значение суммы осадков за период «появление соцветий – созревание» составило 108 мм, наибольшее значение показателя было зафиксировано в 2014 г. и составило 171 мм, а наименьшее наблюдалось в 2007 г. и составило 59 мм.

Показатель суммы дефицитов влажности воздуха в пределах МС Барнаул по годам распределился таким образом, что среднее значение составило 8 мб. Максимальное значение показателя отмечалось в 2020 г. и составило 10 мб. Минимальное значение было зафиксировано в 2017 г. и составило 6 мб.

Имея данные о сумме активных температур и сумме осадков, можно рассчитать ГТК. Среднее значение ГТК по МС Барнаул за данный период составило – 1,0. Максимальное значение ГТК наблюдалось в 2005 г. и имело значение 1,4, в этот промежуток времени выпадало наибольшее количество осадков за исследуемый промежуток времени. Минимальное значение ГТК наблюдалось в 2007 г. и имело значение 0,7. В среднем по годам наблюдалось недостаточное увлажнение территории.

Для данного периода очень важным показателем является T_{max} . Среднее многолетнее значение составляет 33 °С, что является довольно опасным показателем для периода «появление соцветий – созревание».

Таблица 4

Агрометеорологические условия периода «посев – созревание» на МС Барнаул

Год	Фазы развития		N, сут.	$T_{ср},$ °С	$\sum T_{акт},$ °С	$\sum R,$ мм	ГТК	$\sum d,$ мб	$T_{макс},$ °С
	посев	созревание							
2003	09.06	21.08	74	18,7	1380,4	98	0,7	8	32
2004	08.06	18.08	72	18,9	1358,8	175	1,3	8	34
2005	02.06	20.08.	80	19,9	1592,3	180	1,1	9	36
2006	06.06	24.08	80	18,7	1497,1	189	1,3	8	33
2007	08.06	23.08	77	19,6	1510,8	94	0,6	9	33
2014	06.06	30.08	86	19,3	1660,8	182	1,1	9	37
2016	01.06	20.08	81	19,7	1597,4	181	1,1	8	31
2017	04.06	18.08	76	19,0	1446,6	230	1,6	7	34
2018	07.06	12.08	67	19,0	1272,2	94	0,7	8	32
2019	01.06	14.08	75	18,9	1420,6	114	0,8	8	34
2020	25.05	10.08	78	18,9	1473,8	122	0,8	9	33

Средняя дата посева в среднем по многолетним данным на МС Барнаул отмечается 4 июня. Наиболее ранняя дата наступления данной фазы развития наблюдается в 2020 г. – 25 мая, а наиболее поздняя в 2003 г. – 9 июня.

Начало созревания в среднем отмечается 19 августа. Раньше всего начало этой фазы отмечается в 2020 г. – 10 августа, позже всего фаза была зафиксирована в 2014 г. – 30 августа.

Средняя продолжительность периода «посев – созревание» составляет 77 дней. Наименьшая продолжительность этого периода была зафиксирована в 2018 г. и составила 67 дней. Наибольшая продолжительность периода была зафиксирована в 2014 г. и составила 86 дней. Средняя температура воздуха вблизи территории МС Барнаул за исследуемый межфазный период составила 19,0 °С. Наибольшая средняя температура отмечается в 2016 г. и составляет 19,7 °С, наименьшая была зафиксирована в 2003 и 2006 гг. и составила 18,7 °С.

Среднее значение сумм активных температур воздуха на исследуемой территории составляет 1474 °С. Среднее значение суммы осадков за период «посев – созревание» составило 151 мм, наибольшее значение показателя было зафиксировано в 2017 г. и составило 230 мм, а наименьшее наблюдалось в 2007 и 2017 гг. и составило 94 мм.

Показатель суммы дефицитов влажности воздуха в пределах МС Барнаул по годам распределился таким образом, что среднее значение составило 8 мб. Максимальное значение показателя отмечалось в 2005, 2007, 2014 и 2020 гг. и составило 9 мб. Минимальное значение было зафиксировано в 2017 г. и составило 7 мб.

Имея данные о сумме активных температур и сумме осадков, можно рассчитать ГТК. Среднее значение ГТК по МС Барнаул за данный период составило – 1,0. Максимальное значение ГТК наблюдалось в 2017 г. и имело значение 1,6, в этот промежуток времени выпадало наибольшее количество осадков за исследуемый промежуток времени. Минимальное значение ГТК наблюдалось в 2007 г. и имело значение 0,6. В среднем по годам наблюдалось равенство прихода и расхода влаги вблизи рассматриваемой территории.

Для данного периода важным показателем является T_{max} . Среднее многолетнее значение составляет 34 °С, что является довольно опасным показателем для периода «посев – созревание».

Анализируя представленные в работе агроклиматические данные, можно сформулировать следующие выводы. При сравнении дат перехода температур через 0, 5, 10 и 15 °С в весенний и осенний период на МС Барнаул можно заметить устойчивую тенденцию роста, особенно при переходе температур через 10 °С и 15 °С весной и осенью. На данные изменения могут влиять микроклиматические особенности территории. На протяжении всех периодов относительно среднесезонных значений за 30 лет 1961–2020 гг. сумма температур, наблюдавшаяся вблизи МС, неуклонно росла, так же как и сумма осадков. При анализе отклонений дат перехода температур через 0, 5, 10 и 15 °С на МС Барнаул можно отметить увеличение данных периодов.

Список литературы

1. *Авдеев С. М.* Биоклиматический потенциал в условиях глобального изменения климата // Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ : сб. тезисов Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 90-летию Рос. гос. гидрометеорол. ун-та. Санкт-Петербург, 22–24 окт. 2020 г. СПб. : Изд-во РГГМУ, 2020. С. 100–102.
2. *Важов В. М., Козил В. Н., Одищев А. В.* Гречица в лесостепи Алтая : монография. Бийск : Изд-во АГАО, 2012. 204 с.
3. *Гнатовский В. М.* Некоторые пути адаптации земледелия сухостепной зоны Алтайского края к климату и почвам // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2010. № 11 (73). С. 5–9.

УДК 339.5:656

Экологическая безопасность международных транспортных коридоров

Р. В. Казюлин (kazyulin84@mail.ru), Н. Г. Чернышов

Тамбовский государственный технический университет» г. Тамбов

Аннотация. Рассматривается появление международных транспортных коридоров, которые являются следствием новых социально-экономических и политических условий, складывающихся в мире, и опираются на новейшие достижения науки и техники. Данная работа посвящена экологической проблематике формирования международных транспортных коридоров на современном этапе – отражению вопросов экологизации и безопасности в планах развития транспортной отрасли. Комплексный анализ рассматриваемой проблематики в рамках настоящей статьи позволил определить возможности усиления экологизации транзитного потенциала.

Ключевые слова: Великий шелковый путь, ШОС, транспортные коридоры, экологизация, природные экосистемы, стратегия, цели устойчивого развития.

Появление международных транспортных коридоров (МТК) – это следствие новых, социальных и экономических условий в мире, которое опирается на новейшие достижения в науке и технике. Экологические проблемы являются важнейшими в комплексе проблем, связанных с созданием и функционированием МТК: со стороны усиления мощности транспортных средств – повышается нагрузка на окружающую среду; со стороны опасности некоторых транспортируемых грузов – заставляют предусматривать особые меры, направленные на предотвращение их незаконного распространения в атмосфере.

Основной причиной экологических происшествий могут стать: а) нарушения транспортной технологии перевозки грузов; б) стихийных бедствий, которые приводят к разгерметизации контейнеров, включая опасные грузы; в) с террористическими акциями, направленными на захват опасного груза и применение его в преступных целях [1].

Президент Узбекистана Шавкат Мирзиёев, выступая на совещании Совета глав государств-членов ШОС, сказал, что, благодаря твердой приверженности принципам открытой и неблоковой деятельности ШОС повышает взаимовыгодность отношений между странами-участниками и углубляет сотрудничество в международном масштабе. Расширение состава ШОС, развитие наших партнерских связей.

Кроме того, Ш. М. Мирзиёев в своем докладе отметил: «Все перспективные проекты в области транспорта и коммуникаций мы могли бы обсудить на площадке первого Транспортного форума ШОС в следующем году в Узбекистане. Особую актуальность приобретают проблемы экологической повестки. Мы предлагаем создать Климатический совет ШОС, который сможет объединить наших политиков и общественных деятелей, ученых и экспертов-экологов, представителей бизнеса. Такой формат позволит повысить эффективность сотрудничества в продвижении проектов климатической адаптации, борьбы с опустыниванием и деградацией земель, внедрения водосберегающих технологий.

Это особо востребовано в контексте преодоления губительных последствий экологической катастрофы Арала» [2].

В связи с этим мы считаем необходимой разработку общих принципов и подходов к обеспечению продовольственной безопасности. В настоящем документе необходимо предусматривать конкретные мероприятия, направленные на сближение нормативно-правовой базы, совместные исследования, внедрение инноваций [1; 3–8].

Кроме того, наиболее серьезно следует обратить внимание на программы выращивания, переработки сельского хозяйства, формирование согласованных схем прямой взаимной доставки, организацию эффективной логистики, «зеленых» и «экспресс-коридоров» по доставке качественной и доступной продукции.

Экологические проблемы сегодняшнего дня не являются результатом только современного этапа развития. В них, как в зеркале, отражается весь путь человеческого развития, ориентированного на достижение экономического прогресса. Долгие годы рост экономического производства рассматривался как единственное средство удовлетворения интересов и жизненных потребностей населения [7].

Одной из задач развития инфраструктуры транспорта является недоразвитие международных транспортных коридоров, под которыми являются совокупность установленных магистральных перевозок различных типов транспорта, имеющих соответствующее обустройство, обеспечивая перевозку пассажиров, грузов в направлениях, связанных с территориями государств-участников [13].

Развитие транспортных потоков набирает новую силу и требует экологизации международной транспортной логистики.

Основная работа по формированию МТК начинается с подготовки и последующего подписания международного соглашения с участием государств, по территории которых планируется проложить транспортный путь, а также стран, заинтересованных в его использовании. Известно, что функционирование автомобильного, железнодорожного, морского, водного, воздушного и трубопроводного транспорта оказывает существенное воздействие на окружающую среду, представляет повышенную угрозу возникновения аварий и техногенных катастроф, сопровождающихся большим экономическим ущербом. В этой связи одной из важнейших проблем создания и функционирования новых МТК является проблема обеспечения их экологической безопасности. Вопросы экологизации транспорта и безопасности обуславливают необходимость снижения его вредного воздействия на окружающую среду, как следствие, создания качественных условий жизни населения страны. Особое значение должно уделяться вопросам обеспечения сохранности перевозимых грузов, предотвращения чрезвычайных происшествий и аварий, убытков от них, борьбы с терроризмом на транспорте и другим глобальным мерам борьбы за безопасность, что крайне важно для дальнейшего развития и организации нормальной работы всех видов транспорта, действовавших в МТК.

Стратегической функцией МТК является обеспечение международного транзита [9–10]. Как и любая другая деятельность по перевозке грузов, осуществлению операций складирования и временного хранения, выполнению погрузочно-разгрузочных работ и т. п., эта тоже неизбежно связана с различного рода рисками. На протяжении всей логистической цепи всегда существует вероятность чрезвычайных происшествий. Набирающий обороты курс на экологизацию транспорта, развитие технологий контейнеризации транзитных грузопотоков, активно растущий сегмент производства и потребления, а также другие макротенденции в области международных отношений и мировой торговли диктуют новые требования к качеству транспортных услуг.

Термин «экологизация» нашел широкое применение в концепциях различных сфер и видов жизнедеятельности людей [4; 10; 12]. Недостаточно понимать этот термин только как комплекс мер, направленных на заботу об окружающей среде. Под экологизацией также принято понимать процесс неуклонного и последовательного внедрения систем технологических, управленческих и других решений, усиливающих эффективность использования естественных ресурсов и условий, повышение уровня безопасности и снижение рисков на локальном, региональном и глобальном уровнях.

Государства, участвующие в международных транспортных процессах, имеют в своем законодательстве соответствующие нормативы и регулирующие акты, определяющие нанесение минимального ущерба окружающей среде. Однако такие законы диктуют условия, приемлемые только для каждой отдельной страны, и совершенно не учитывают законодательство сопредельных территорий.

Особенности воздействия транспортной отрасли на окружающую природную среду можно свести к следующим [12; 13]:

- загрязнение атмосферы, водных объектов и земель, изменение химического состава почв и микрофлоры, образование производственных отходов;
- потребление природных ресурсов и выделение тепла в окружающую среду;
- создание высоких уровней шума и вибрации;
- возможность активизации неблагоприятных природных процессов, типа водной эрозии, заболачивания местности, оползней, обвалов и др.;
- травматизм и гибель людей, животных, нанесение большого материального ущерба при авариях и катастрофах.

В границах МТК будут подвержены негативному влиянию урбанизированные территории, места расположения крупных транспортных узлов, а также участки коридоров, проходящие по пограничным территориям различных государств. Опыт создания МТК в странах Европейского союза показывает, что разработка рекомендаций, имеющих комплексный подход к рассмотрению вопросов экологического характера, а также включение экологической проблематики в процесс разработки транспортной политики и отражение этих вопросов в планах развития государств-участников транспортного процесса способствуют значительному уменьшению некоторых видов воздействия отрасли на окружающую среду.

Так, Европейской экономической комиссией при ООН (ЕЭК ООН) страны Европы, Кавказа и Средней Азии были поделены на три группы с учетом установленных политических объединений [14]:

1. Западная Европа – Австрия, Бельгия, Дания, Финляндия, Франция, Германия, Греция, Ирландия, Италия, Люксембург, Нидерланды, Португалия, Испания, Швеция, Великобритания, Исландия, Лихтенштейн, Норвегия, Швейцария, включая малые государства Андорру, Монако, Сан-Марино.

2. Центральная и Восточная Европа – Болгария, Чешская Республика, Эстония, Венгрия, Латвия, Литва, Польша, Румыния, Словацкая Республика, Словения, Кипр, Мальта и Турция, Албания, Босния-Герцеговина, Хорватия, Македония, Сербия и Черногория.

3. Восточная Европа, Кавказ и Центральная Азия – Армения, Азербайджан, Беларусь, Грузия, Республика Молдова, Российская Федерация, Украина, Казахстан, Кыргызская Республика, Таджикистан, Туркменистан, Узбекистан.

Системным фактором для развития взаимных торговых отношений является создание стабильных маршрутов транспорта, включая развитие Транскаспийского мультимодального маршрута. Президенты считают важным расширение портовой мощности, увеличение паромной и железной дороги, гармонизацию таможенной процедуры, внедрение цифровых решений по обработке груза и пересечении границ. Такие проекты полностью соответствуют поставленным целям и задачам инициативы Евросоюза «Глобальные ворота». Узбекская сторона отметила важность реконструкции железнодорожной дороги «Термез – Мазари Шариф – Кабул – Пешавар», которая способствует углублению взаимосвязанности.

Из практических соображений было рекомендовано ввести экологические нормативы и регламенты относительно видов транспорта, типов транспортных средств и используемого топлива. Однако эти нормативы и регламенты в области экологической эффективности оказались недостаточно существенными и не смогли сократить общее негативное воздействие на окружающую среду, которое связано с быстрым развитием объемов транспортной отрасли и ее инфраструктур.

В связи с обозначившимся и продолжающимся трендом отрицательные аспекты экологической ситуации в области транспорта проявятся еще более заметно, чем раньше. В соответствии с типовыми правилами предусматриваются следующие аспекты безопасности:

- 1) перечень опасных грузов, которые чаще всего перевозятся;
- 2) классификация и определение классов грузов по категориям в зависимости от вида риска, связанного с их перевозкой;
- 3) процедуры отправления грузов: порядок нанесения этикеток, маркировки и подготовки транспортных документов;
- 4) аварийные мероприятия;
- 5) стандарты по упаковке, процедуры испытаний и сертификации;
- 6) стандартные требования к контейнерам для перевозки различными видами транспорта, процедуры проведения испытаний и выдача соответствующей документации;
- 7) представление отчетов об авариях, происшествиях и др.

Кроме решений правового и организационно-технического характера, в систему экологической безопасности обязательно должен быть встроен надежный механизм обеспечения биокоммуникаций в местах пересечения транспортных коридоров с природными миграционными коридорами животных и растений и буферными зонами. Соответствующие мероприятия по обеспечению экологической безопасности МТК должны проводиться как на стадии их обоснования и проектирования, так и в процессе строительства и эксплуатации.

В заключение хотелось бы отметить, что разработка обобщенной комплексной стратегии, одновременно охватывающей проблемы развития транспорта, включая создание МТК, и императивы соблюдения экологических требований, даст возможность обеспечить надежную охрану окружающей среды, выполнить задачи отраслевой интеграции и гарантировать устойчивое развитие территорий, кроме того, при этом важно четко определить цели, задачи и пути решения, выявить и обозначить реальные инструменты и механизмы по предотвращению, выявлению и противодействию умышленным несанкционированным действиям, включая планирование, реализацию, контроль и совершенствование проводимых мероприятий, охватывающих правовые, организационные, технические, технологические и экологоэкономические аспекты.

Список литературы

1. Чумляков К. С., Чумлякова Д. В. Экологизация и безопасность в планах развития международных транспортных коридоров // Вестн. Том. гос. ун-та. Экономика. 2016. № 3 (35). С. 240–251.
2. Выступление Президента Шавката Мирзиёева на заседании Совета глав государств-членов ШОС 16.09.2022. URL: <https://review.uz/post/vstuplenie-prezidenta-shavkata-mirziyoyeva-na-zasedaniiso-veta-glav-gosudarstvchlenov-shos-polnyy-tekst> (дата обращения: 10.02.2023).
3. Чумляков К. С. Стратегическая роль транспортных коридоров в развитии международных транзитных перевозок // Рос. внешнеэкономический вестн. 2013. № 11. С. 62–67.
4. Чумляков К. С. Тенденции транзита: от морского к сухопутному? // Мир транспорта. 2014. № 3 (52). С. 156–161.
5. Гурьева М. А., Руднева Л. Н. Оценка устойчивого развития региона на основе индикативной системы оценки уровня экологизации экономики // Вестн. УрФУ. Серия: Экономика и управление. 2013. № 3. С. 104–116.
6. Шадиметов Ю. Ш., Айрапетов Д. А. Актуальные вопросы стратегии экологически устойчивого транспорта // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2022. 4 (97). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13343> (дата обращения: 10.02.2023).
7. Тимченко Т. Проблемы экологической безопасности морских составляющих международных транспортных коридоров // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2008. № 1. С. 129–142.
8. Shadimetov Yu. Sh, Ayrapetov D. A., Ergashev B. Transport, ecology and health // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2021. Vol. 8. Iss. 4, N 33. P. 17226–17230.
9. Павлова Е. И. Экология транспорта: учеб. для вузов. М. : Транспорт, 2000. 248 с.
10. Шадиметов Ю. Ш., Айрапетов Д. А., Ниязов Х. Возрастание роли здравоохранения в активизации человеческого фактора // Высшая школа, 2021. № 21. С. 22–25.
11. Окружающая среда Европы: Третья оценка // Европейское агентство по охране окружающей среды. URL: http://www.eea.europa.eu/ru/publications/environ-mental_assessment_report_2003_10-sum/download (дата обращения: 11.11.2023).
12. Шадиметов Ю. Ш., Айрапетов Д. А. Экологическая дипломатия в центральной Азии // Экономика и социум. 2022. № 9 (100). 11 с.
13. Шадиметов Ю. Ш., Айрапетов Д. А. Актуальные вопросы экологического образования и воспитания // Экономика и социум. 2022. № 6 (97). С. 924–929.
14. Худазаров Э. А. Разработка технологий интегральных оценок исполнения проектов создания международных транспортных коридоров // ТДР. 2010. № 1. С. 41–44.

УДК 55(571.53)

Трансформация природной среды геодинамически активных территорий в условиях естественных и антропогенных климатических изменений

Т. И. Коновалова (tkonov@mail.ru)^{1,2}

¹*Иркутский государственный университет, г. Иркутск*

²*Институт географии им. В. Б. Сочавы, г. Иркутск*

Аннотация. Возможность эффективного ответа российского общества на большие вызовы с учетом взаимодействия человека и природы является одним из приоритетных направлений современных фундаментальных и прикладных научных исследований. Существенное значение в решении этой проблемы имеет разработка концепции трансформации геосистем, которая может служить основой для решения задач рационального природопользования, оценки экологического состояния территории и охраны природы. Выявление ведущих факторов трансформации геосистем осложняется необходимостью учета климатических и геодинамических изменений. Показано, что основные механизмы и особенности трансформации геосистем геодинамически активных регионов связаны с воздействием вещества и энергии, поступающих из эндогенных источников. Отмечается, что геосистемы таких территорий подвержены быстрым и необратимым преобразованиям, которые также изменяют и климатические условия. Исследование основано на использовании теоретического и практического опыта многолетних разработок в области системных исследований географической среды Байкальской природной территории.

Ключевые слова: геосистема, механизмы трансформации, тектонические преобразования, климат.

Введение

Современные исследования трансформации геосистем во многом базируются на сложившихся представлениях о ведущей роли в их преобразовании климатических и антропогенных факторов. Но многолетний опыт изучения геосистем Сибири показал, что такие подходы являются, по меньшей мере, дискуссионными при оценке характера преобразования геосистем геодинамически активных территорий.

Объект исследования – геосистемы Байкальской Сибири, в пределах которой расположены существенно различные по геодинамической обстановке Сибирская платформа, Восточно-Саянская горная область, Байкальская рифтовая зона, Ангаро-Витимский гранитоидный батолит. Это обусловило проявление разнообразных условий преобразования геосистем в районе объекта всемирного природного наследия – оз. Байкал. Из-за сложности решения проблемы трансформации геосистем предлагается изучать природные единства, создаваемые веществом-энергетическими потоками, идентифицировать отклонения в режиме средообразующих процессов. Современные геосистемы и направление их преобразований не могут быть полностью поняты без познания процессов, которые формировали их на протяжении тысячелетий. Поэтому при исследовании трансформации геосистем были выявлены этапы эволюции геосистем с учетом как климатических, так и тектонических преобразований.

Исследования базируются на материалах многолетних наземных, аэровизуальных исследований и картографирования геосистем Сибири, результатах дешифрирования космических снимков с искусственных спутников Земли (Landsat 8 – «OLI», NOAA-20 «VIRS»), опубликованных данных по тектонике и геотермическим градиентам, изменению климата, включая сведения, полученные при реализации проекта «Байкал-бурение».

Обзор современных представлений

Геосистемы – это земные пространства всех размерностей, где отдельные компоненты природы находятся в системной связи друг с другом и как определенная целостность взаимодействуют с космической сферой и человеческим обществом. Под трансформацией геосистем понимается перестройка их структуры, обусловленная преобразующей динамикой и эволюцией, которые развиваются под воздействием модификации вещественно-энергетических потоков и информационных связей: разнообразия компонентов, особенностей их взаимосвязей, подчинения вышестоящей по иерархическому уровню геосистеме (рис. 1) [6].



Рис. 1. Схема трансформации геосистем

Геодинамически активными считаются участки земной коры, для которых характерны неотектоническая активность, специфические проявления геологических процессов, определяющих перемещение вещества, петрологический состав горных пород. Н. Л. Добрецов отмечал, что современная геодинамика определяется сочетанием тектоники плит и плюмов (горячих мантийных струй), а также космических факторов (прежде всего, вариациями солнечной радиации),

влияющих на процессы перемещения и напряжения общепланетарного масштаба в земной коре. Они, в свою очередь, вызывают климатические и тектонические реорганизации ландшафтной оболочки [3]. Ф. А. Летников [9] подчеркивал, что на протяжении 4 млрд лет на процесс развития планеты Земля дополнительно накладываются внешние гравитационные силы, порожденные взаимодействием гиперсистемы Солнце – Земля – Луна. В результате этого Земля испытывает воздействие извне, следствием которого становятся процессы перемещения и напряжения общепланетарного масштаба в верхней части мантии и земной коре.

Утверждается, что на ранних этапах эволюции Земли преобладало влияние земного тепла, поскольку эндогенный тепловой поток был в 5–10 раз выше современного, а светимость солнца ниже на 20–30 % [13]. В настоящее время происходит общее остывание планеты из-за уменьшения потока эндогенного тепла, несмотря на то что приход солнечного тепла на поверхность Земли в три раза выше эндогенного. В районах воздействия плюмов, по-прежнему, фиксируются повышенные градиенты эндогенного тепла. Плюмы – узкие колонны мантии, достигающие 150 км в поперечнике, осуществляют подъем вещества и энергии нижней мантии к поверхности планеты. На основании исследования геотермального состояния глубинных недр Центральной Азии отмечена активная роль внутривоздушного тепла при тектонических перестройках в литосфере [12]. Выявленным аномалиям соответствуют повышенная интенсивность современных тектонических движений, разломообразование, эволюция основных геологических структур. Это определяет формирование высокогорий, либо оседаний крупных блоков земной коры, которые вносят свои коррективы в преобразование климата: формирование барических центров, усиление его континентальности, изменение характера увлажнения и т.д. На рисунке плюмы показаны на основе данных [4] (рис. 2).

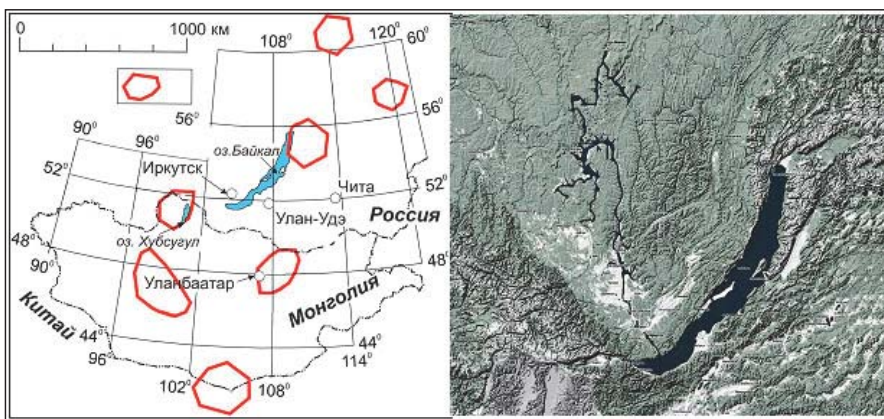


Рис. 2. Сопряженность высокогорного рельефа с плюмами

Так значительное изменение климата в регионе увязывают с формированием Хангай-Алтае-Саянской горной страны. Она стала преградой для широтного переноса воздушных масс и послужила основой развития Монгольского антициклона. В настоящее время происходит общее остывание планеты из-за уменьшения потока эндогенного тепла, несмотря на то, что приход солнечного тепла на поверхность Земли в три раза выше эндогенного. Высказывалось предположение о том, что всплески тектонической активности приходится на эпохи смены направленности вектора в системе «тепло-холодно». Атмосферные и гидросферные процессы выступают в качестве триггерного механизма, способствующего высвобождению упругой энергии, запасенной в литосфере [8]. Возможно, что с этим связано значительное повышение годовых температур воздуха, которые в районе исследований превосходят показатели северного полушария, и увеличение числа экстремальных погодных явлений, связанных с атмосферными блокировками западного переноса.

Отмечается, что четвертичное (плейстоценовое) оледенение - текущий ледниковый период, начавшийся 2,58 млн лет назад, совпадает со сменой палеомагнитных эпох Гаусс – Матуяма. Снижение эндогенной активности Земли в интервале 750–600 млн лет (магнитная инверсия Брюнес – Матуяма, которая считается маркером начала среднего плейстоцена) вновь привело к охлаждению поверхности Земли, вызвавшему очередное оледенение. Следы этих эпох были обнаружены при изучении керн донных отложений оз. Байкал, которое показало, что на рубеже 2,5 млн лет назад произошло оледенение горного обрамления Байкала и появление айсбергов в озере [11]. С двумя глубокими похолоданиями, которые совпали с рубежами магнитной инверсии Гаусс – Матуяма и началом эпохи обратной полярности Брюнес – Матуяма, связано вымирания байкальских диатомовых сообществ, а также расширение лесостепной и степной растительности, свидетельствующее об уменьшении атмосферного увлажнения (2).

Динамическое взаимодействие Сибирской платформы и расширяющейся Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) создали условия горизонтального растяжения, что отличается от проявления процессов движения блоков земной коры в пределах БРЗ. Современные поля скоростей и напряжений Байкальского рифта демонстрируют изменения от чистого растяжения в середине рифта до косоугольного, левостороннего растяжения в его южной и сжатия в северной оконечности. Геометрия Байкальского рифта во многом определяется присутствием древней Сибирской платформы. Вдоль окраины Сибирской платформы сжатие вызывает левосторонние и обратные движения. Отмечается, что литосфера ведет себя как крупный разрыв. Ширина зоны современных деформаций достигает 190–200 км [14].

Здесь получила развитие предрифтовая зона в пределах Лено-Ангарского плато. Расположение Лено-Ангарского плато на границе с геодинамически активной Байкальской рифтовой зоной показало согласованность с представлением А. П. Карпинского, который впервые выявил взаимосвязь процессов, протекающих на платформе и в смежных геосинклинальных областях, сопряженных с заложением и развитием последних [7]. Район Лено-Ангарского плато не подвергался покровному оледенению, поэтому тайга формировалась здесь на протяжении длительного периода, проходя все этапы своего развития. Оказавшись в

сфере воздействия БРЗ, она приобрела разнообразные черты, характерные как для прилегающих районов Среднесибирской таежно-плоскогорной области на западе и юге территории (согласно районированию сибирских географов), так и геосистем Байкало-Джугджурской горно-таежной области – на востоке и Южно-Сибирской горной области в центральной части. В этой связи особенности трансформации геосистем плато могут служить эталоном для изучения характера преобразования районов окраинных территорий древних платформ, которые находятся на границе с геодинамически активными территориями.

Следующим фактором трансформации геосистем является тепловой эндогенный поток. В пределах района исследований в условиях сжатия он характеризуется, как правило, низкими величинами и составляет ≈ 40 МВт/м² в районе платформы и 50–60 МВт/м² в Байкальской складчатой зоне. Очень высокие значения (от 0,3 до 35 Вт/м²) соответствуют гидротермальной циркуляции флюидов вдоль крупных разломов. Отмечается, что поверхностный тепловой поток на оси разломов достигает нагрева 80 МВт/м². Поверхностный тепловой поток вулканического поля Витимского батолита еще выше и характеризуется значениями 75–90 МВт/м² [15]. В районе исследований широко представлены древние разломы. Они являются своеобразными естественными насосами для флюидов - подвижных составляющих магмы или насыщенных газами растворов, циркулирующих в земных недрах. Они определяют наряду с давлением и температурой метаморфизм горных пород и геохимические характеристики территорий, прилегающих к разломам. Аномальные условия в зоне воздействия разломов оказывают влияние на пространственные преобразования геосистем.

Анализ изображения космического снимка, полученного с искусственного спутника Земли (NOAA-20) радиометром VIIRS (thermal spectral channel i4) в ночное время, показал приток эндогенного тепла по крупным разломам в пределах района исследований. На снимке он показан красным цветом, желтым – озера и заболоченные территории. Вероятно, что его длительное и постоянное воздействие способствовало сохранению плиоценовых реликтов в районе исследований даже во время максимального похолодания климата (рис. 3).

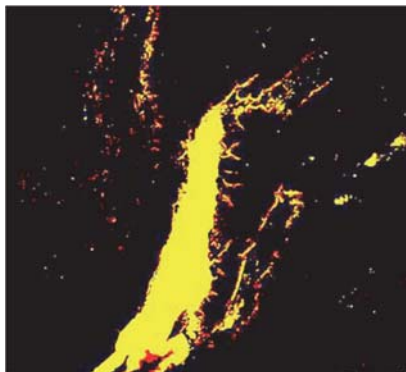


Рис. 3. Приток эндогенного тепла. ИСЗ NOAA-20 (радиометр VIIRS; тепловой спектральный канал i4)

Обсуждение результатов исследования

Проведенные исследования эволюционных преобразований геосистем показали, что климатические и неотектонические преобразования происходили синхронно и вызывали развитие резонансных явлений и трансформацию геосистем. На ранних этапах развития БРЗ в палеозое и мезозое активизация тектонических процессов была связана с базальтовым вулканизмом и воздействием плюма, который обусловил формирование одного из крупнейших интрузивных массивов на Земле – Ангаро-Витимского батолита (синоним – Баргузинский). В сфере воздействия плюма получили развитие наиболее высокие горные сооружения, что объясняют динамическим влиянием на литосферу восходящих течений в плюмовых колоннах [4]. В этих горах сформировались молодые гольцовые и подгольцовые типы геосистем с проявлением гравитационных и криогенных процессов. На больших высотах здесь наблюдается адвекция воздушных масс, в том числе поступающих с востока, которые имеют так называемые морские свойства. В сфере этих вторжений в верхних поясах гор развиваются горные тундры, подгольцовые заросли кедрового стланика и кедровые леса. По тем же причинам по высокогорьям вплоть до Байкала проникла северо-притихоокеанская каменная береза.

Разнообразный состав гранитов Баргузинского батолита (основной, умеренно кислый и щелочной) определяет существенную трансформацию современных геосистем на близком расположенных участках региона. В районах развития гранитов кислого состава сформировались горно-таежные кедрово-лиственничные геосистемы в отличие от доминирующих лиственнично-таежных. Помимо этого, состав гранитов повлиял на дифференциацию и биотическую продуктивность лиственнично-таежных геосистем, которые преобладают на территории Витимского плоскогорья. Они корреспондируют геосистемам средней и южной лиственничной тайги Якутии, при этом, несмотря на развитие гор, высотная поясность зачастую не выражена отчетливо.

Деструктивные изменения в геосистемах района исследований произошли около 5–6 млн л. н. в результате активного развития БРЗ. Влияние современных тектонических процессов, связанных с развитием рифтовой зоны, четко фиксируется в рельефе района исследований горными цепями и крупными субмеридиональными разломами, чьи линейные очертания подчеркиваются современной гидросетью, вдоль которой формируются аazonальные геосистемы с реликтами и эндемиками в биоте и почвенном покрове. Подъем хребтов вызвал развитие горного оледенения, формирование молодых гольцовых и подгольцовых геосистем. В целом для региона в голоцене было установлено три крупных периода изменения климата и растительности. Первый (11,7–9,5 тыс. л. н.) отличался более низкими, чем современные, атмосферным увлажнением, средними температурами зимних и летних сезонов; широкое развитие в это время получили лесотундровые ландшафты. Второй период (9,5–6,6 тыс. л. н.) был наиболее благоприятным для развития темнохвойной пихтовой тайги с максимально высокой за весь голоцен среднегодовой суммой атмосферных осадков и средней температурой зимних сезонов. Третий (6,5 тыс. л. н. – наши дни) ознаменовался снижением всех

перечисленных параметров климата по сравнению с предыдущим периодом; в растительности региона стали преобладать светлохвойные леса.

Вместе тем не все районы Прибайкалья отвечали синхронно или даже аналогично на глобальные изменения природной среды. Отмечается, что оптимум голоцена с минимальной сезонной контрастностью климата в разных районах БПТ имел место в интервале времени ~11–5 тыс. л. н. Высокогорные районы около 9500–6900 л. н. испытывали влияние влажного и теплого воздуха, поступающего с западным переносом воздушных масс. Это влияние определило проникновение пихтарников в пределы хребтов, где в настоящее время преобладают березово-лиственничные редколесья с редкой примесью угнетенной пихты. После 6800 л. н. произошло ухудшение условий увлажнения. Количество атмосферных осадков и аккумуляция снега были максимальными в начале среднего голоцена, особенно около 8000–7500 л. н., что способствовало расселению кедрового стланика на территории исследования. Переход климатической системы почти на всей территории Евразии во второй половине среднего голоцена к более существенным континентальным условиям означал глобальное распространение этого явления. Геосистемы оз. Байкал ответили на изменение климата коренной перестройкой своей структуры и состава – темнохвойная мезофитная лесная растительность была замещена существенно более ксерофитной светлохвойной в позднем голоцене. Вместе с тем изменение климатических условий не привело к столь резким преобразованиям геосистем в районе исследований, где, по-прежнему, были представлены горно-таежные темнохвойные геосистем [1; 5].

Основные особенности рассматриваемой территории из-за разнообразия климатических и тектонических преобразований обусловлены взаимопроникновением геосистем, относящихся к различным физико-географическим областям – Байкало-Джугджурской, Южно-Сибирской горной, а также отчасти Центрально-Якутской и Амуро-Сахалинской. Компоненты природы двух последних находят определенное место в типологической структуре основных областей. Доминируют горно-таежные типы геосистем, которые отличаются литоморфностью, ведущей ролью мобильной составляющей, резкими как локальными, так и региональными климатическими и ландшафтными контрастами. Проявления региональных факторов дифференциации геосистем осложнены местными географическими особенностями: процессами заболачивания, развитием карстовых явлений, проявлением мерзлотных процессов и т. д. Здесь имеет место своеобразное сочетание горно-таежных и горно-тундровых геосистем, поскольку вертикальная поясность осложняется барьерными эффектами, дающими гумидный и аридный эффект.

Состав горных пород и осадочных отложений обусловил существенное преобразование геосистем и их контрастность на близко расположенных участках. Их влияние особенно отчетливо прослеживается в условиях, удаленных от экологического оптимума функционирующих здесь геосистем. В. Б. Сочавой была отмечена независимость их развития, связанная с различными центрами формирования под влиянием Тихоокеанских и Атлантических воздушных масс. В связи с этим было выделено две фратрии формаций – Панпритихоокеанскую и

Панприатлантическую [10]. В районе исследований, который располагается на стыке Алтае-Саянского и Верхояно-Колымского центров формирования гольцовой (высокогорной) растительности, отмечается присутствие различных сообществ горных тундр. Альпинотипные луговые сообщества образуют в районе исследования сложные сочетания с горными тундрами.

С эпохой оледенения также генетически сопряжены таежные типы геосистем. Формирование и распространение тайги происходило на протяжении всего четвертичного периода; оно было связано с тремя флорогенетическими центрами: южносибирским, ангаридским и охотским. Отличительной особенностью горных ландшафтов на севере исследуемой территории служит распространение у верхней границы леса каменноберезовых крутосклонных групп фаций. Эти геосистемы наряду с марями – заболоченными редкостойными лиственничниками, ерниками и кедрово-стланиковыми группировками – представляют собой элементы приморского и северотихоокеанского типов природной среды, свойственных ландшафтам Амура-Сахалинской и Северо-Притихоокеанской физико-географических областей. В южносибирском центре господствуют леса из лиственницы сибирской и сосны обыкновенной. В настоящее время их развитие сопровождается с крупными разломами. На большей части территории доминируют сообщества ангаридского центра. Основную роль играют лиственница даурская, березки тощая, Миддендорфа и др., которые образовались в условиях позднего плейстоценового похолодания. Бореальная растительность, в составе которой преобладают виды берингийского комплекса, встречается в высокогорьях и среднегорьях региона. К ней относятся заросли кедрового стланика, редколесья из берез шерстистой и каменной. Сложные эволюционно-динамические отношения между представителями этих центров существуют и в настоящее время. Примером являются кедровые леса с подлеском из кедрового стланика.

Заключение

Таким образом, сочетание разнообразных геодинамических режимов слабоактивной платформы и области материкового рифтогенеза вызвало неоднозначный отклик геосистем на изменение климата. Здесь сконцентрированы уникальные геосистемы, свойственные физико-географическим областям Сибири и Дальнего Востока, представлены растительные сообщества разнообразных фратрий формаций. Преобразованиям подвержены геосистемы как топологического (фации, их группы), так и регионального уровня организации (округа, провинции).

Список литературы

1. Безрукова Е. В., Белов А. В. Феномен изменений природной среды Байкальского региона в среднем голоцене: причины и последствия // Вестник ИРГСХА. 2013. № 57, вып. 1. С. 30–36.
2. Глобальное похолодание Центральной Азии в позднем кайнозое согласно осадочной записи из озера Байкал / Е. В. Карабанов, М. И. Кузьмин, Д. Ф. Вильямс [и др.] // ДАН. 2001. Т. 370, № 3. С. 61–66.
3. Добрецов Н. Л. Мантийные суперплюмы как причина главной геологической периодичности и глобальных перестроек // Доклады РАН. 1997. Т. 357, № 6. С. 777–780.
4. Зорин Ю. А., Турутанов Е. Х. Плюмы и геодинамика Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 7. С. 685–699.

5. Коновалова Т. И. Трансформация геосистем Предбайкалья // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Науки о Земле, 2020. Т. 31. С. 26–47.
6. Коновалова Т. И. Концепция трансформации геосистем // Геосистемы Северо-Восточной Азии: природные и социально-экономические факторы и структуры : сб. науч. ст. Владивосток : Тихоокеан. ин-т географии ДВО РАН, 2024. С. 76–82.
7. Коновалова Т. И., Ноговицын В.Н. Пространственно-временные преобразования геосистем Лено-Ангарского плато // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2017. Т. 21. С. 68–79.
8. Леви К. Г. Природно-климатические изменения в позднем плейстоцене - голоцене северного полушария. Анализ радиоуглеродных хронологий // Развитие жизни в процессе абиотических изменений на земле. 2008. № 1. С. 297–310
9. Летников Ф. А. Глубинные флюиды континентальной литосферы // Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы : материалы всерос. совещания, 6–9 окт. 2015 г. Иркутск : Ин-т земной коры СО РАН, 2015. С. 11–41.
10. Сочава В. Б. Закономерности географии растительного покрова горных тундр СССР // Академику В. Н. Сочаве к 75-летию со дня рождения. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1956. С. 522–536.
11. Ярмолюк В. В., Кузьмин М. И. Корреляция эндогенных событий и вариаций климата в позднем кайнозое Центральной Азии // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2006. Т. 14, № 2. С. 3–25.
12. Hu S., He L., Wang J. Heat flow in the continental area of China: a new data set // Earth Planet. Sci. Lett. 2000. V. 179. P. 407–419.
13. Initiation of leaking Earth: An ultimate trigger of the Cambrian explosion / Sh. Maruyama, Y. Sawaki, T. Ebisuzaki [et al.] // Gondwana Research. 2014. Vol. 25, N 3. P. 910–944.
14. Petit C., Deverchere J. Structure and evolution of the Baikal rift: A synthesis // Geochem. Geophys. Geosyst. 2006. Vol. 7, N 11.
15. Priestley K., McKenzie D. The thermal structure of the lithosphere from shear wave velocities // Earth and Planetary Science Letters. 2006. Vol. 244.

УДК [556.555.4+556.555.5](282.247.211)

Исследование многолетнего ледово-термического режима Онежского озера

П. М. Степанов (petrstepanov142@gmail.com)

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Представлены результаты статистического анализа данных о ледовом и термическом режиме Онежского озера за период 1950–2020 гг., полученных в результате многолетних наблюдений на метеорологических станциях и озерных постах. Выявлены тенденции изменчивости ледово-термического режима озера за последние 70 лет.

Ключевые слова: Онежское озеро, ледовый режим, термический режим, линейные тренды.

Введение

Онежское озеро является одним из крупнейших озер Европы и России. Озеро является важным климатообразующим объектом северо-западной части России. Общая площадь акватории составляет 9700 км², объём водоема – 285 км³.

Изменение термических и ледовых характеристик озера с конца прошлого века прежде всего можно объяснить изменением климата в данном регионе. Как известно, изменение климата – общемировая тенденция. Наиболее чувствительными к изменениям климата считаются умеренная и арктическая климатическая зона. Объект исследования находится на севере умеренного климатического пояса. Помимо этого, Онежское озеро является мультizonальным. Климат во многом обуславливается влиянием Арктики. Тема является актуальной, так как следует влияние изменения климата на эколого-экономическое состояние объекта и региона. Что в дальнейшем дает понимание оценки эколого-экономического состояния и потенциала объекта.

Материалы и методы

Изучались термический и ледовый режимы Онежского озера по данным наблюдений на гидрологическом посту г. Петрозаводск. Также использовались данные по метеостанции г. Петрозаводск.

Результаты исследования

Проведен анализ межгодовой изменчивости термического и ледового режимов озера Онежское за период 1956–2014 гг. в зависимости от климатических условий.

Температура воздуха в холодную половину года на метеостанции Петрозаводск в период с конца 80-х гг. по настоящее время повышалась. Выявленный тренд является статистически значимым. При этом до 1988 г. в ряде температур воздуха за холодный период отмечается тенденция на понижение (рис. 1). Скорость изменения температуры воздуха за холодный период составляет 0,04 °C за 10 лет.

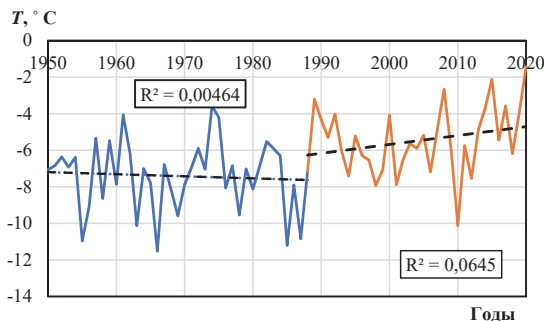


Рис. 1. Хронологический график средней температуры за холодный период.

В результате анализа межгодовой изменчивости средней годовой толщины льда была выявлена тенденция на уменьшение толщины льда (рис. 2). Средняя толщина льда уменьшается примерно на 4 см за весь период наблюдений.

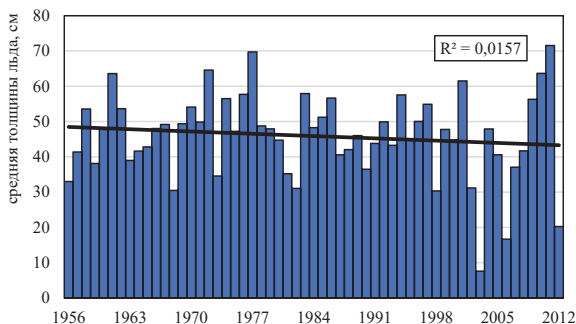


Рис. 2. Среднегодовая толщина льда на водомерном посту г. Петрозаводск

Минимальные значения толщины льда отмечаются в 1958, 1970, 1975, 1984, 2000, 2005, 2008, 2014 гг. и колеблются от 7,5 до 35 см. Аномально высокая температура воздуха в 2005 г. сказалась на резком уменьшении средней толщины льда в аналогичные годы. Максимальные – в 1960, 1963, 1974, 1979, 1985, 1988, 1996, 2003, 2012 и 2013 гг. Значения максимальной толщины льда варьируются в пределах от 53 до 72 см.

В результате анализа сроков разрушения ледяного покрова на озере было установлено, что даты начала взлома льда сдвигается с середины апреля на начало апреля и конец марта в среднем на 7 дней, рис. 3. Тренд сдвига дат не значим.

Анализ данных температуры воды на водомерном посту г. Петрозаводск показал наличие статистически незначимого тренда на уменьшение температуры воды в период с 1956 по 1968 г. При этом после 1968 г. отмечается тенденция на увеличение температуры воды, рис. 4. Тренд на увеличение статистически значим.

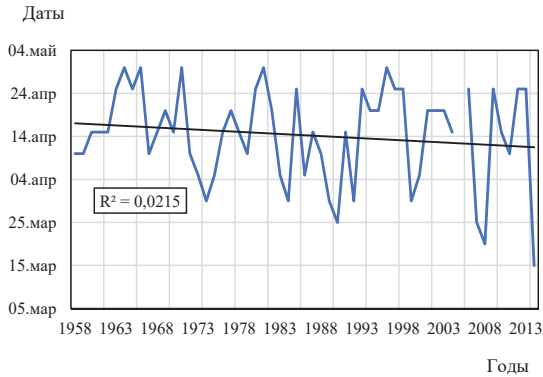


Рис. 3. Даты разрушения ледяного покрова на водомерном посту г. Петрозаводск

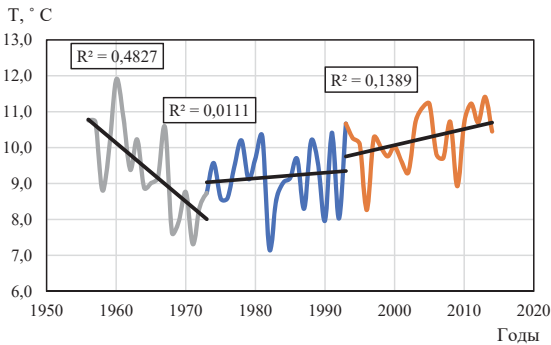


Рис. 4. Среднегодовая температура воды на посту

Температура воздуха в холодный период увеличивается несколько быстрее чем в теплый период, +0,05 и +0,04 в год соответственно (рис. 5 и 6).

Выводы

Важным следствием текущей климатической изменчивости является сокращение периода ледостава и уменьшение толщины льда на оз. Онежское. Учитывая тенденции текущих климатических изменений, можно ожидать дальнейшего сокращения периода, когда озеро покрыто сплошным ледяным покровом. Также повышение температуры воздуха за холодный период сказывается на толщине льда, вызывая её уменьшение.

Анализ данных, полученных с метеостанции и озерного поста, показал значимые изменения в ледо-термическом режиме озера. Начала ледохода за 56 лет сдвинулось на 7 дней раньше со средней скоростью 0,13 дня/год ($R = 0,02$). Скорость повышения температуры 0,03 °C/год ($R = 0,32$). Средняя температура воды

начиная с 1993 г. повышается со скоростью $0,04 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год}$ ($R = 0,14$). Исходя из пересчитанного можно сказать что изменение климата влияет на гидрологический режим ледово-термический режим озера. В свою очередь изменение режима сказывается на экологическом состоянии озера и экономику региона как потребителя.

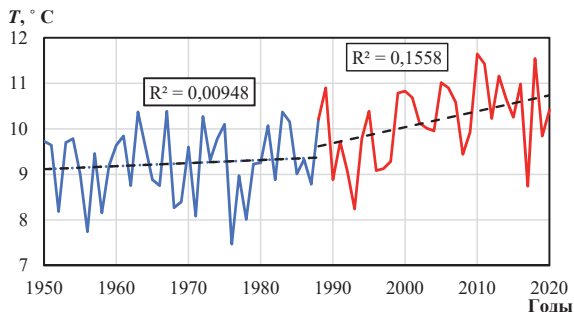


Рис. 5. График средней температуры за теплый период года

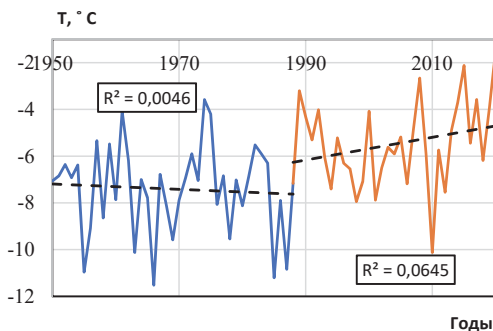


Рис. 6. График средней температуры за холодный период года

Список литературы

1. Озера Карелии : справочник / под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2013 (2015). 463 с.
2. Гидрологический ежегодник. Л. : Гидрометеиздат, 1938. Т. 9. Вып. 0–3. 2019 с.
3. Давыденко Е. В., Гайдукова Е. В., Дреговаль М. С. Особенности уровневого режима озер Кольского полуострова // Гидрометеорология и экология. 2020. № 61. С. 437–445.

УДК 556.535.3+551.583(282.256.341)

Влияние климатических изменений в пределах водосбора озера Байкал на сток его притоков

Е. Н. Сутырина (ensut78@gmail.com), Ф. М. Андреев

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Цель исследования – выявление и количественная оценка современных тенденций изменчивости стока притоков оз. Байкал, происходящих на фоне изменения климата. В результате исследования с использованием данных NCEP-DOE Reanalysis 2 проведена количественная оценка изменчивости климатических параметров в пределах водосбора оз. Байкал. Дана оценка тенденций изменчивости параметров стока ряда притоков Байкала изучены с использованием многолетних рядов гидрологической информации. Проанализировано влияние изменчивости климатических факторов и параметров атмосферной циркуляции на трансформацию параметров стока притоков озера.

Ключевые слова: водосбор, Байкал, изменение климата, изменение параметров стока.

Введение

Цель исследования – выявление и количественная оценка современных тенденций изменчивости стока притоков оз. Байкал, происходящих на фоне изменения климата. Речной сток формируется под влиянием сложного взаимодействия физико-географических факторов и относится к многофакторным природным процессам. Основными факторами стока, определяющими его развитие, являются климатические. Климат воздействует на сток не только непосредственно, но и через другие природные факторы: почву, растительность, рельеф. Климатические изменения могут существенно трансформировать гидрологические условия в речных бассейнах [1–3]. Изменчивость стока притоков Байкала в свою очередь ведет к изменению уровня режима озера и обуславливает актуальность подобного рода исследований.

Озеро Байкал расположено на юго-востоке Сибири между 51°28' и 55°47' северной широты и 103°43' и 109°58' восточной долготы. Байкал – самое глубокое (1642 м) и самое большое по объему пресноводное озеро в мире. Длина озера по тальвегу оценивается в 672 км, ширина – от 79 до 27 км, а площадь озера – 23,6 тыс. км².

Водосбор оз. Байкал является трансграничным. Общая площадь водосбора Байкала составляет 576,5 тыс. км². В пределах Российской Федерации находится 44,6 % площади водосбора (в Республике Бурятия – 31,8 %, в Забайкальском крае – 10,2 %, в Иркутской области – 2,2 %, в Республике Тыва – 0,4 %), 55,4 % площади водосбора находится на территории Монголия. Около 53 % объема речных вод формируется на территории Бурятии, 27 % – Монголии, 16 % – Забайкальского края и 4 % – Иркутской области [4–6].

Использованные материалы

Для изучения изменений климата в пределах всего трансграничного водосборного бассейна оз. Байкал в качестве источника метеорологической информации использовались данные проекта NCEP-DOE Reanalysis 2 о средней за месяц интенсивности осадков и средней за месяц температуре воздуха в узлах регулярной сетки $1,9 \times 1,9^\circ$ за период с 1979 по 2023 г.

Для анализа параметров стока использовались многолетние ряды среднемесячных расходов в замыкающих створах: рек Селенги (1948–2020), Баргузин (1936–2020), Верхней Ангары (1939–2020), Голоустной (1975–2020), Анги (1971–2020) и Бугульдейки (1975–2020), разбитые на несколько периодов, каждый из которых включал одинаковое количество 22–23-летних магнитных циклов солнечной активности для более репрезентативного анализа рядов и исключения влияния ряда естественных циклов на сток на результаты анализа. Для обработки гидрологической информации использовались методы статистической обработки, методы расчета внутригодового распределения и др.

Результаты

По данным проекта NCEP-DOE Reanalysis 2 определены тенденции изменения некоторых метеозаэментов (рис. 1). В том числе установлено, что после 1979 г. наблюдались статистически значимые тенденции к увеличению средней за год температуры воздуха на $0,3^\circ\text{C}/10$ лет ($p = 0,002$) в южной части бассейна на широтах ниже 50° северной широты и росту температуры на $0,2^\circ\text{C}/10$ лет ($p = 0,02$) – в северной части водосборной территории. В некоторые месяцы темпы роста средней температуры воздуха составляют около $0,5\text{--}0,7^\circ\text{C}/10$ лет. Рост температуры воздуха способствует увеличению испаряемости и ведет к увеличению расходной части водного баланса притоков озера.

Также по данным NCEP-DOE Reanalysis 2 было изучена многолетняя изменчивость осадков (см. рис. 1). В северной части бассейна статистически значимой тенденции к изменению осадков за период с 1979 по 2022 г. не наблюдается. В южной части бассейна наблюдаются разнонаправленные статистически значимые тенденции: уменьшение годовых сумм осадков на $147\text{ мм}/10$ лет ($p = 0,0000001$) в 1990–2009 гг., которое сменилась ростом их ростом на $258\text{ мм}/10$ лет ($p = 0,0004$) в последующий период. Изменения в количестве осадков непосредственно влияет на приходную часть водного баланса оз. Байкал. Различия в тенденциях в разных частях бассейна объясняется существенной протяженностью бассейна и влиянием разных циркуляционных факторов в пределах его территории.

В работе также проанализировано изменение во внутригодовом распределении температуры воздуха и количества осадков в 1998–2020 гг. по сравнению с 1979–1997 гг. По представленным на рис. 2 столбчатым диаграммам видно, что среднемесячная температура за многолетний период увеличилась в более поздний период на 1°C и более в феврале-апреле, июне-июле – в северной части водосбора и феврале-апреле, июне-сентябре – в его южной части. В среднем за год температура воздуха увеличивалась на $0,7$ и $0,8^\circ\text{C}$ в южной и северной частях бассейна соответственно.

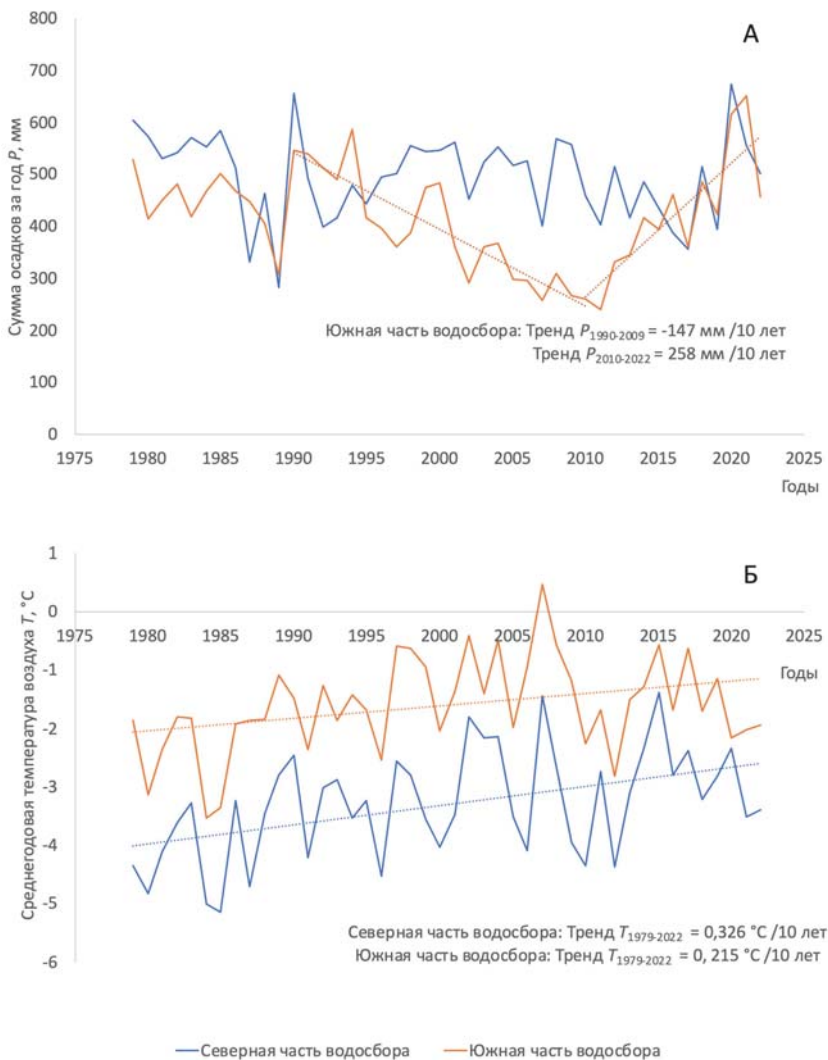


Рис. 1. Многолетняя изменчивость сумм осадков за год (А) и температуры воздуха (Б) в пределах водосбора оз. Байкал по данным реанализа NCEP-DOE Reanalysis 2

Еще более выраженные изменения произошли во внутригодовом распределении количества осадков. В южной части бассейна они сократились в более поздний период на треть или более во все летние месяцы. В северной части снижение осадков также пришлось на летние месяцы, но не выглядит так критично.

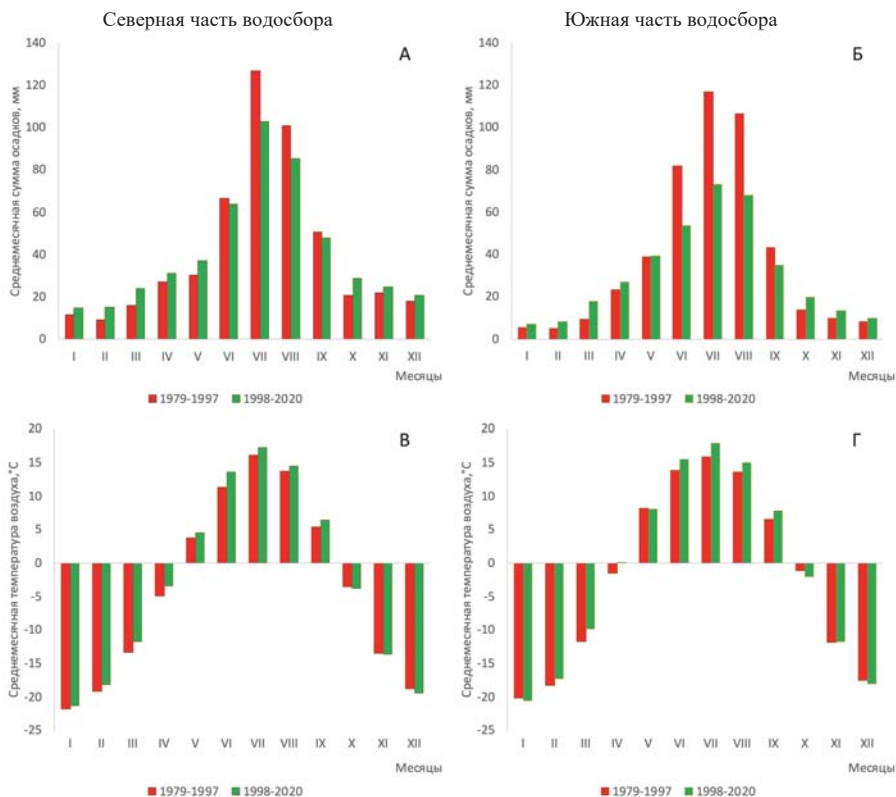


Рис. 2. Внутригодовое распределение среднесесячных сумм осадков (А, Б) и среднесесячной температуры воздуха (В, Г) в пределах водосбора оз. Байкал по данным NCEP-DOE Reanalysis 2 за периоды 1979–1997 и 1998–2020 гг.

Под влиянием изменения климатических факторов, описанных выше, а также бассейновых факторов, в результате хозяйственной деятельности в пределах водосбора и произошедшей трансформации ландшафтов и т. д., рассмотренных разными коллективами авторов, в ходе многолетних исследований, происходит изменение притока в оз. Байкал. Измерения стока, производимые на реках в течение длительного времени, показывают, что его величина подвержена значительным колебаниям. При этом расход воды в реке изменяется как в течение календарного года, так и из года в год. Поэтому внимание в работе уделено, как многолетней изменчивости внутригодового распределения стока, так и межгодовой изменчивости среднегодовых расходов исследуемых водотоков.

В ходе исследования на примере шести притоков оз. Байкал: рек Селенги, Баргузин, Верхней Ангары, Голоустной, Анги и Бугульдейки изучено изменение стока за многолетний период. Первые три водотока являются крупнейшими при-

токами озера, причем р. Селенга приносит половину объема от всего поступления речных вод в озеро, а ее водосбор занимает 78 % от водосбора озера – почти всю южную часть.

Дана сравнительная оценка изменения внутригодичного распределения стока притоков Байкала в 1997–2020 гг. по отношению к распределению в более раннем периоде 1975–1997 гг. (рис. 3).

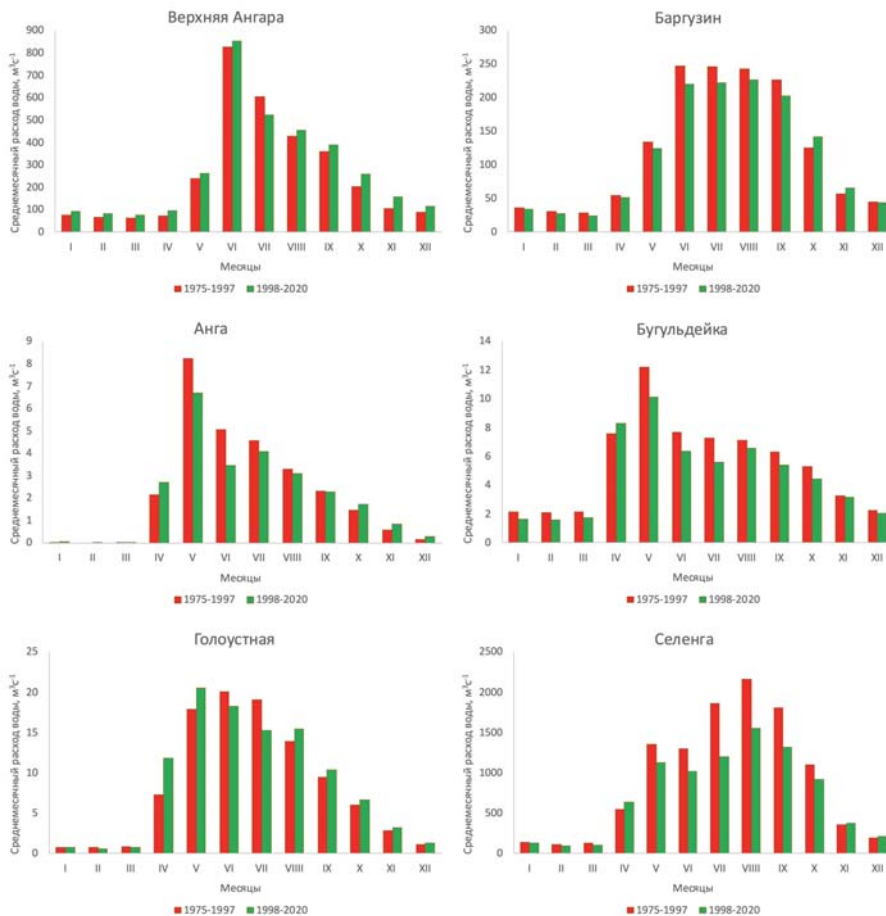


Рис. 3. Внутригодичное распределение стока притоков оз. Байкал в 1975–1997 и 1998–2020 гг.

Видно, что наиболее заметные изменения во внутригодичном распределении стока коснулись главного притока озера – р. Селенги, где почти на треть произошло снижение расходов в июле-сентябре, что с учетом времени добегания

стока в один месяц хорошо соотносится с выявленными изменениями внутрigoдового распределения осадков на южной части водосборной территории оз. Байкал. В целом сопоставление периодов демонстрирует наблюдается снижение величины среднегодового расхода р. Селенги на 21,6 % в более поздний период. У р. Баргузин также выявлено снижение среднемесячных расходов в 1997–2020 гг. по отношению к 1975–1997 гг. с января по сентябрь, а у рек Верхней Ангары, среднемесячные расходы в большинство месяцев увеличились по сравнению с более ранним периодом, у рек Голоустная, Бугульдейка и Анга отмечается снижение расходов воды в более поздний период в июне и июле и вероятно связано с изъятием воды на сельскохозяйственное водоснабжение, возросшее вместе с увеличением роли населенных пунктов, расположенных на берегах данных водотоков в обслуживании туристической отрасли на оз. Байкал.

В ходе исследования на основании рядов гидрологической информации были проанализированы тенденции изменения расходов исследуемых притоков Байкала за многолетний период. Выявлено наличие циклических изменений без статистически значимых трендов на реках Баргузин, Верхней Ангаре, Бугульдейке, Голоустной, Анге. На р. Селенге также выявлена циклическая в смене положительных и отрицательных тенденций, такая же как в случае с осадками в южной части водосбора Байкала. В целом за весь период 1948–2020 гг. линейный тренд изменения расходов составляет выявлен линейный тренд снижения среднегодовых расходов воды на $318 \text{ м}^3/10 \text{ лет}$, но с умеренной статистической значимостью ($p = 0,09$) (рис. 4), кроме этого, также статистически значимый тренд изменения расходов воды к понижению выявлен у Бугульдейки на $0,44 \text{ м}^3/10 \text{ лет}$ ($p = 0,03$), что равнозначно уменьшению стока данного водотока на 8,25 % за десятилетие.

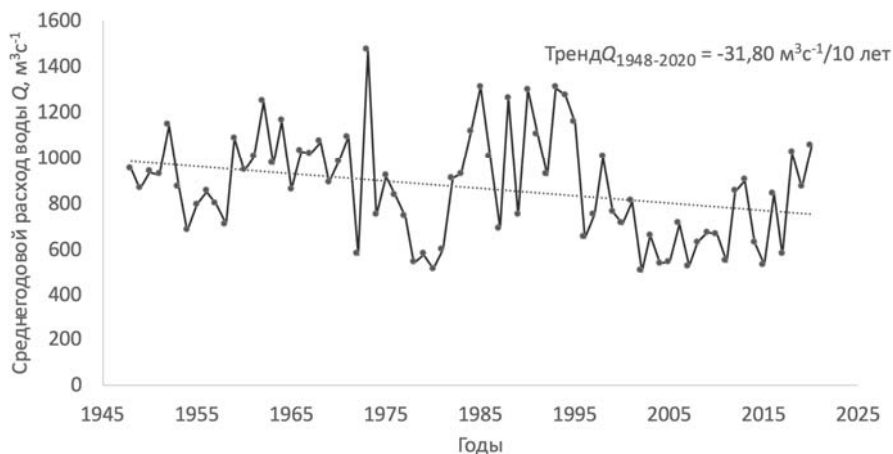


Рис. 4. Многолетняя изменчивость расходов р. Селенги за период 1948–2020 гг.

На основе анализа многолетних рядов информации о среднегодовых величинах расходов в сопоставлении с рядами годовых сумм осадков выявлено наличие статистически значимой заметной линейной связи между расходами р. Селенги и осадками в пределах ее водосборного бассейна ($r = 0,68$, $p = 0,008$) в 1979–2020 гг. Однако другие исследования [3] показывают, что подобные зависимости меняются в многолетнем разрезе под влиянием бассейновых факторов, включающих деградацию ландшафтов в пределах водосбора. И при одной и той же сумме осадков будут формироваться более низкие значения расходов.

Выводы

В ходе проведенного исследования с применением данных реанализа о температуре воздуха и осадках, информации о стоке по данным гидрологических постов за многолетний период изучены современные гидроклиматических условия водосбора оз. Байкал, а также тенденции их изменения на фоне изменений климата.

Установлено наличие значимых трендов в изменении температуры воздуха в пределах бассейна за многолетний период 1975–2020 гг. Выявлены разнонаправленные тренды осадков в пределах водосбора и тенденции изменения стока ряда притоков оз. Байкал. Выявлен линейный тренд к снижению расходов воды р. Селенги за период 1948–2020 гг. с умеренной статистической значимостью и статистически значимый тренд к снижению расходов воды р. Бугульдейки.

Список литературы

1. Амосова И. Ю., Ильичева Е. А. Структурно-гидрографический подход к определению областей формирования стока рек бассейна оз. Байкал в период максимальной и экстремальной водности // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2024. Т. 48. С. 3–24. DOI:10.26516/2073–3402.2024.48.3
2. Потемкина Т. Г., Потемкин В. Л. Сток наносов притоков озера Байкал: изменения и тенденции // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2023. Т. 43. С. 79–90. DOI:10.26516/2073–3402.2023.43.79
3. Сутырина Е. Н. Реакция стока р. Селенги на изменение интенсивности осадков и состояния водосборного бассейна // Известия Иркутского государственного университета 2015. Т. 13. Серия: Науки о Земле. С. 120–130
4. Батиметрическая электронная карта озера Байкал / П. П. Шерстянкин, С. П. Алексеев, А. М. Абрамов [и др.] // Докл. Академии наук. 2006. Т. 408, № 1. С. 102–107.
5. Экологический атлас бассейна озера Байкал. Иркутск: Изд-во Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2015. 145 с.
6. The INTAS Project 99–1669 Team, 2002. A new bathymetric map of Lake Baikal / M. De Batist, M. Canals, P. Sherstyankin, S. Alekseev. URL: <http://www.lin.irk.ru/intas/index.htm> (date of access: 12.10.2023).

УДК 556.06

Вклад природных ресурсов в производственные функции при изменении климата

А. М. Тихонова (tikhonova.alexandra2001@gmail.com), Е. В. Гайдукова (oderiut@mail.ru), В. С. Девятов (dafted@mail.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Представлены практические рекомендации по использованию статистических характеристик многолетнего речного стока в производственных функциях. Существует несколько методов построения производственных функций: физический, статистический, оптимизационный. Произведен расчет производственной функции для яровых культур, выращиваемых в Алтайском крае, в бассейне р. Обь. Ожидаемое уменьшение количества осадков и изменение их распределения во времени могут привести к уменьшению доступности воды для орошения, что приведет к экономическим потерям. Полученные результаты могут быть использованы для решения задач планирования капиталовложений в водозависимых отраслях экономики. На основе полученной зависимости чистого дохода от урожайности для Алтайского края, можно провести анализ вклада природных ресурсов в производственные функции при изменении климата для конкретного сельскохозяйственного предприятия, уделяя особое внимание объемам водопотребления.

Ключевые слова: изменение климата, модель формирования стока, производственные функции, экономика, сельское хозяйство, чистый доход.

Введение

Актуальность темы связана с современным развитием прогностических моделей формирования стока с речных водосборов и разработкой методов оценки экономической эффективности при принятии решений в сельском хозяйстве с учетом воздействия климатических изменений, которые могут оказывать значительное влияние на отрасли экономики.

Рассматриваемая проблема учета изменений климата при описании процесса формирования речного стока и включение гидрологических оценок в производственные функции имеет важное значение для стратегического развития Российской Федерации. Необходимо разработать комплекс региональных научных положений, которые определят порядок расчета статистических характеристик многолетнего стока в условиях неустойчивого климата. Это является необходимым условием для создания надежного гидрологического обоснования расчета объемов воды, требуемых для функционирования сельскохозяйственной отрасли.

Цель работы заключается в проведении расчетов характеристик речного стока в условиях изменяющегося климата для гидрологического обоснования планирования использования водных ресурсов в водозависимых отраслях экономики, в частности в сельском хозяйстве.

Исходные данные и методы исследования

Для начала работы необходимо было проанализировать многолетние данные о весеннем половодье на выбранном водосборе – водосбор р. Обь. Рассмотрены три гидрологических поста: с. Фоминское с площадью водосбора 98 тыс. км², г. Барнаул с площадью водосбора 169 тыс. км² и г. Камень-на-Оби с площадью водосбора 216 тыс. км². В рамках данного анализа выделяются два расчетных периода: с 1953 по 1980 г. и с 1981 по 2007 г. После этого проводится расчет средних значений температуры воздуха, нормы годовых сумм осадков и слоя стока для каждого из указанных периодов [2].

Затем производится идентификация модели формирования стока в виде системы дифференциальных уравнений для начальных статистических моментов m_i :

$$-\bar{c} m_1 + \bar{N} = 0; \quad (1)$$

$$-2\bar{c} m_2 + 2\bar{N} m_1 + G_{\bar{N}} = 0,$$

где m_1, m_2 – первый и второй начальные моменты, характеризующие среднее значение и дисперсию величин; $\bar{N}, G_{\bar{N}}$ – норма осадков и характеристика скорости изменения дисперсии этих осадков; k – коэффициент стока.

Алгоритм параметризации модели заключается в получении численных значений параметров на основе статистических моментов одного расчетного периода. Затем эти значения используются для оценки статистических характеристик другого периода. Для учета изменений в условиях формирования стока, вызванных различными факторами, такими как изменение климата, изменение площади водосборного бассейна, изменение водоотводных систем и т. д., необходим расчет с переменными параметрами в прогнозной модели стока.

В результате анализа прогнозных значений по системе (1) был сделан вывод, что увеличение среднегодовых температур воздуха приведет к уменьшению нормы стока весеннего половодья в среднем течении р. Обь.

Планирование социально-экономического развития региона включает в себя использование производственной функции для оптимизации производства в различных отраслях, в том числе в сельском хозяйстве.

Расчет производственной функции помогает определить оптимальные значения факторов производства для получения максимального выхода продукции в определенной отрасли экономики. Например, для сельского хозяйства производственная функция может использоваться для определения оптимального количества воды для орошения, необходимого для максимальной урожайности.

Производственная функция – это математическая модель, которая описывает зависимость объема производства от входных факторов производства, таких как труд, капитал и природные ресурсы [1]. В общем виде производственная функция может быть представлена в виде:

$$Q = f(K, L, Z), \quad (2)$$

где Q – объем производства; K – капитал; L – труд; Z – природные ресурсы.

Существует несколько методов построения производственных функций: физический, статистический, оптимизационный.

1. Физический метод основан на использовании физических законов для получения продукции. Он может быть применен в различных областях, таких как гидроэнергетика, судоходство и сельское хозяйство.

В сельском хозяйстве применяются математические модели, позволяющие описать зависимость между различными параметрами произрастания растений и урожайностью. Одной из таких моделей является модель Шабанова В.В., которая позволяет описать зависимость урожайности (Y) от объема воды, подаваемой на орошение ($W_{\text{оп}}$).

Эта модель учитывает множество факторов, включая тип почвы, уровень влажности, температуру и другие параметры, которые могут влиять на рост и развитие растений:

$$S = \frac{y}{y_{\max}}, \quad (3)$$

$$S = \left[\frac{(w_{\text{опт}} - w_0) \frac{M}{M_{\text{опт}}} + w_0}{w_{\text{опт}}} \right]^{w_{\text{опт}}} \cdot \left[\frac{1 - (w_{\text{опт}} - w_0) \frac{M}{M_{\text{опт}}} + w_0}{(1 - w_{\text{опт}})} \right]^{(1 - w_{\text{опт}})}, \quad (4)$$

$$W_{\text{оп}} = \frac{F_{\text{оп}} \cdot M}{\eta}, \quad (5)$$

где S – относительная урожайность; y_{\max} – максимально возможная в конкретных условиях урожайность, ц/га; $F_{\text{оп}}$ – площадь орошения, га; $w_{\text{опт}}$ – оптимальная влажность почвы, %; w_0 – среднегодовое значение влажности почвы, %; $M_{\text{опт}}$ – биологически оптимальная оросительная норма, м³/га.

2. Статистический метод применяется в сельском и рыбном хозяйствах для анализа данных. В данном случае применяются фактические ряды наблюдений, которые включают в себя информацию о различных параметрах, таких как урожай, рыбный улов, погодные условия и др. При этом производственная функция может быть представлена в виде зависимости между входными и выходными параметрами, которые включают в себя объемы воды, уровень удобрений, температуру и другие факторы, оказывающие влияние на производственный процесс:

$$Y = f(W), \quad (6)$$

где Y – урожайность.

Удобно использовать нормированные зависимости. Нормированные зависимости представляют собой относительные значения выходных параметров по отношению к входным параметрам, что позволяет сравнивать эффективность различных производственных процессов и оптимизировать их:

$$S = f(W_{\text{опт}}), \quad (7)$$

где $W_{\text{опт}}$ – оптимальный годовой объем воды для орошения.

3. Оптимизационный метод используется в сельском и рыбном хозяйстве, судоходстве.

Производственные функции находят широкое применение в оптимизации использования водных ресурсов в условиях их ограниченности. Например, можно рассмотреть задачу распределения водных ресурсов между различными

сельскохозяйственными культурами. В случае если имеется N вариантов распределения водных ресурсов, производственная функция может быть представлена в виде зависимости между входными параметрами, такими как объемы воды, и выходными параметрами, такими как урожайность:

$$\text{ЧД}_{\Sigma} = f(W) \quad , \quad (8)$$

где ЧД_{Σ} – суммарный чистый доход, получаемый от реализации урожая всех орошаемых сельскохозяйственных культур; W – объем воды, выделяемый для орошения конкретной культуры.

Решение задачи оптимизации заключается в максимизации чистого дохода, который является критерием оптимизации. Этот критерий может быть записан в виде: $\text{ЧД}_{\Sigma} \rightarrow \max$.

При этом суммарный чистый доход получается, как сумма доходов от орошения всех i -х культур:

$$\text{ЧД}_{\Sigma} = \sum \text{ЧД}_{ij}, \quad (9)$$

где ЧД_{ij} – чистый доход, получаемый от орошения i -й культуры в j -м варианте распределения водных ресурсов.

Прибыль ЧД_{ij} определяется по зависимости

$$\text{ЧД}_{ij} = \Pi_{ij} - C_{ij}, \quad (10)$$

где Π_{ij} – стоимость продукции i -й культуры в j -м варианте распределения водных ресурсов; C_{ij} – затраты на производство i -й культуры в j -м варианте распределения водных ресурсов.

Стоимость продукции j -й культуры определяется по формуле

$$\Pi_{ij} = Y_{ij} \cdot F_j \cdot c_j, \quad (11)$$

где Y_{ij} – урожайность j -й культуры в i -м варианте распределения водных ресурсов; F_j – площадь, занятая j -й культурой; c_j – цена продукции j -й культуры.

Урожайность j -й культуры, обозначаемая как Y_{ij} , зависит от нормы орошения, обозначаемой как M_{ij} .

$$Y_{ij} = f(M_{ij}). \quad (12)$$

Объем воды, выделяемой j -й культуре в i -м варианте распределения водных ресурсов, влияет на оросительную норму M_{ij} :

$$M_{ij} = \frac{W_{ij} \eta}{F_j}, \quad (13)$$

где W_{ij} – объем водных ресурсов, выделяемый j -й культуре в i -м варианте распределения; η – КПД оросительной системы.

Результаты исследования

В работе расчет производственной функции был произведен на примере Алтайского края. На рассматриваемой территории, основным направлением в растениеводстве являются зерновые производство. Доля яровых культур составляет 96 % от общей посевной площади зерновых [4].

Биологически оптимальная оросительная норма для яровых культур в рассматриваемом регионе составляет 1110 м³/га. Площадь орошения в среднем составляет 500 га. Из этого следует, что годовой объем, требуемый для орошения в среднем равен 1000 т/м³. Урожайность зависит от объема воды, затрачиваемой на орошение (рис. 1).

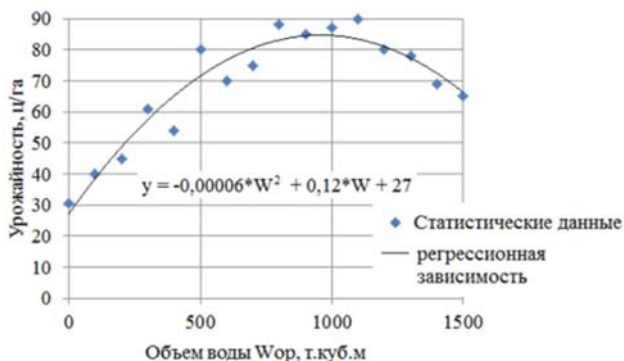


Рис. 1. Статистическая зависимость урожайности от объема подаваемой на орошение воды (площадь орошения 500 га)

Средний коэффициент полезного действия (КПД) оросительной системы в Алтайском крае составляет 0,47 [6]. Средняя цена за 1 га яровых культур равна 50 тыс. руб. Удельные затраты на возведение одного гектара яровых культур составляют 20 тыс. руб. Исходя из этих данных, можно установить следующие зависимости, показанные на рис. 2 и 3.

Изменение климата может серьезно повлиять на годовой объем воды, необходимый для орошения сельскохозяйственных культур. Уменьшение количества осадков и изменение их распределения во времени могут привести к уменьшению доступности воды для орошения, что в свою очередь может привести к экономическим потерям. Уменьшение оросительной нормы может привести к снижению урожайности, так как оросительная норма представляет собой объем воды, необходимый для получения оптимального урожая.

Основываясь на результатах прогноза статистических характеристик многолетнего стока на ретроспективном материале, можно заключить, что климатические изменения могут привести к уменьшению слоя стока за весеннее половодье, особенно, при уменьшении количества осадков, что повлияет на количество воды доступного для орошения [5].

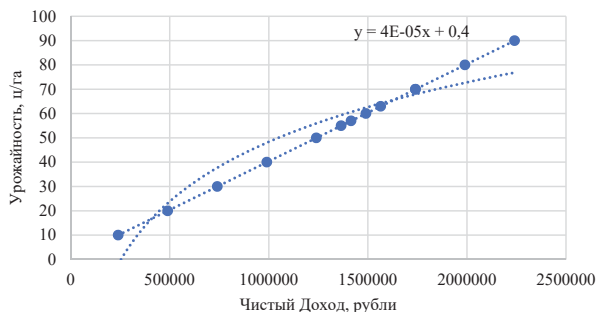


Рис. 2. Статистическая зависимость чистого дохода от объема подаваемой на орошение воды (площадь орошения 500 га)

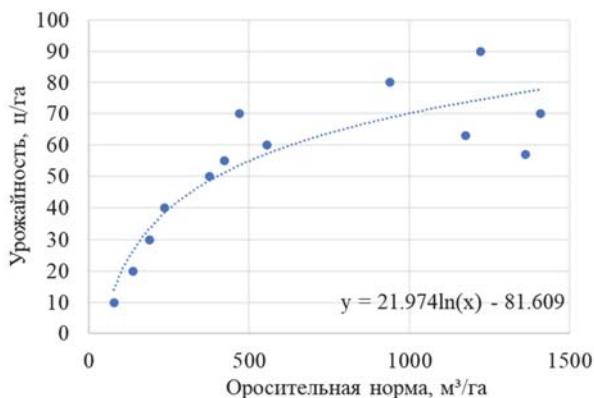


Рис. 3. Статистическая зависимость урожайности от нормы орошения (площадь орошения 500 га)

Выводы

Изменение климата оказывает значительное влияние на сток рек и других водных объектов. Повышение температуры и изменение осадков приводят к изменению количества, распределения и режима поступления воды в реки. Это может привести к увеличению или уменьшению объема стока, а также к изменению времени и длительности паводковых периодов.

В настоящей работе были предложены практические рекомендации по использованию результатов расчета и прогноза статистических характеристик многолетнего стока для дальнейшей оценки экономической эффективности производственной функции. Исследование показало, что полученные результаты могут быть использованы для решения задач планирования капиталовложений в отраслях экономики.

Данная работа поможет получить более глубокое понимание вклада природных ресурсов в производственные процессы и разработать стратегии для устойчивого и эффективного использования этих ресурсов (см., например, [3]).

В дальнейшей перспективе на основе полученной зависимости чистого дохода от урожайности, можно провести анализ вклада природных ресурсов в производственные функции при изменении климата для конкретного сельскохозяйственного предприятия, уделяя особое внимание объемам водопотребления.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ № FSZU-2023-0002.

Список литературы

1. Иванов М. А. Производственная функция // Экономическая школа. URL: <https://seinst.ru/page476/> (дата обращения: 03.11.2023).
2. Сценарная оценка долгосрочных изменений максимального стока весеннего половодья в Арктическом регионе России на основе стохастической модели формирования многолетнего стока / В. В. Коваленко, Е. В. Гайдукова, Н. В. Викторова [и др.] // Труды Всерос. науч. конф. «Современные проблемы стохастической гидрологии и регулирования стока», ИВП РАН, 2012. С. 100–106.
3. Об оценке и управлении гидрологическими рисками в период весеннего половодья в бассейне р. Арпа (Республика Армения) / В. Г. Маргарян, Е. В. Гайдукова, И. О. Винокуров, Н. А. Решин // Устойчивое развитие горных территорий. 2022. Т. 14, № 2 (52). С. 240–251.
4. Мосиенко Н. А. Агрогидрологические основы орошения в степной зоне. Л. : Гидрометеоздат, 1972. 214 с.
5. Планирование водопользования при орошении сельскохозяйственных культур / Г. В. Ольгаренко, Т. А. Капустина, Д. Г. Ольгаренко, Ф. К. Цекоева. М. : Минсельхоз России, 2014. 172 с.
6. Штакковский А. В. Укрупненные нормы водопотребности для орошения по природно-климатическим зонам СССР. М. : М-во мелиорации и водного хозяйства СССР, 1984. 359 с.

УДК 551.510.42

Оценка испарения с суши в летний период в рамках гидрометеорологических изысканий

В. Д. Шестакова (Шерстова) (vikakachyg2000@gmail.com)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Под испарением с поверхности суши понимается сумма всех видов этого процесса: биологическое испарение с листьев растений (транспирация), физическое – испарение с орошённых атмосферными осадками листьев, испарение с почвы, снега, льда, водоёмов, расположенных на исследуемой территории. Методы расчёта испарения с поверхности суши основаны на использовании уравнений водного и теплового балансов, их связи, на закономерностях переноса влаги от испаряющей поверхности в атмосферу. Выбор метода расчёта зависит от поставленной задачи, наличия исходных данных, природных условий и требуемой точности результатов расчёта. В рамках данной работы для оценки испарения с суши в летний период использовались климатические параметры территории и результаты рекогносцировочного обследования в рамках проведения инженерно-гидрометеорологических изысканий.

Ключевые слова: инженерно-гидрометеорологические изыскания, оценка испарения с суши, летний период.

Введение

Испарение с поверхности суши является одной из важнейших составляющих водного баланса речных бассейнов и отдельных участков земной поверхности. Поэтому желательно иметь методы расчета испарения, достаточно надежные и вместе с тем легко доступные для использования, базирующиеся на данных наблюдений гидрометеорологической сети и не требующих регулярных, сложных, трудоемких, а порой и технически неосуществимых измерений для получения информации, необходимой для расчета испарения по тому или иному методу.

Метод определения испарения с суши в летний период

Расчет испарения с суши в летний период производится согласно «Рекомендациям по расчёту испарения с поверхности суши» [1]:

$$E = E_0 \frac{w_1 + w_2}{2w_0}, \text{ при } \frac{w_1 + w_2}{2} \geq w_0 \quad (1)$$

$$E = E_0, \text{ при } \frac{w_1 + w_2}{2} < w_0 \quad (2)$$

где E и E_0 – испарение и испаряемость, соответственно, мм; $\frac{w_1 + w_2}{2}$ – средний для месяца запас продуктивной влаги в начале и в конце месяца соответственно; w_1 и w_2 – запасы продуктивной влаги соответственно в начале и конце месяца; w_0 – критическое значение влажности почвы, при котором $E = E_0$, принято равным 200 мм;

Месячная испаряемость E_0 определяется по эмпирическим графикам связи ее с приближенным значением дефицита влажности воздуха $d = (e_t - e)$, где e_t – максимальная упругость водяного пара, вычисленная по прогнозируемой температуре воздуха, мб; e – средняя месячная упругость водяного пара воздуха, мб.

Графики зависимости E_0 от d построены для различных геоботанических зон (рис. 1). Зона, к которой принадлежит данный пункт, определяется по его координатам с помощью карты (рис. 2). По графикам определяется E_0 за все месяцы теплого периода года, а при отсутствии данных по дефициту влажности воздуха – также и за месяцы холодного периода [1].

Значения W определялись согласно Рекомендаций по расчету испарения с поверхности суши по формуле:

$$(w_1 + w_2) / 2, \quad (3)$$

где w_1 и w_2 – запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы соответственно в начале и в конце месяца.

Запас продуктивной влаги в конце месяца w_2 вычисляется по формулам:

$$w_2 = c/a \text{ при } (w_1 + w_2) / 2 < w_0, \quad (4)$$

$$w_2 = w_1 + x - y - E_0, \text{ при } (w_1 + w_2) / 2 > w_0, \quad (5)$$

где $c = w_1 b + x - y$, $b = 1 - E_0 / 2w_0$, $a = 1 + E_0 / 2w_0$; x – количество осадков по данным метеостанции, мм; y – величина стока по данным гидропостов в районе изысканий, мм.

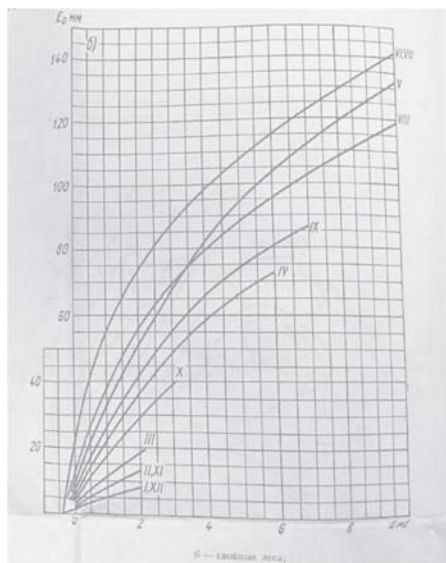


Рис. 1. Средняя многолетняя месячная испаряемость E_0 в зависимости от средней многолетней месячной разности $d = (et - e)$ для различных геоботанических зон

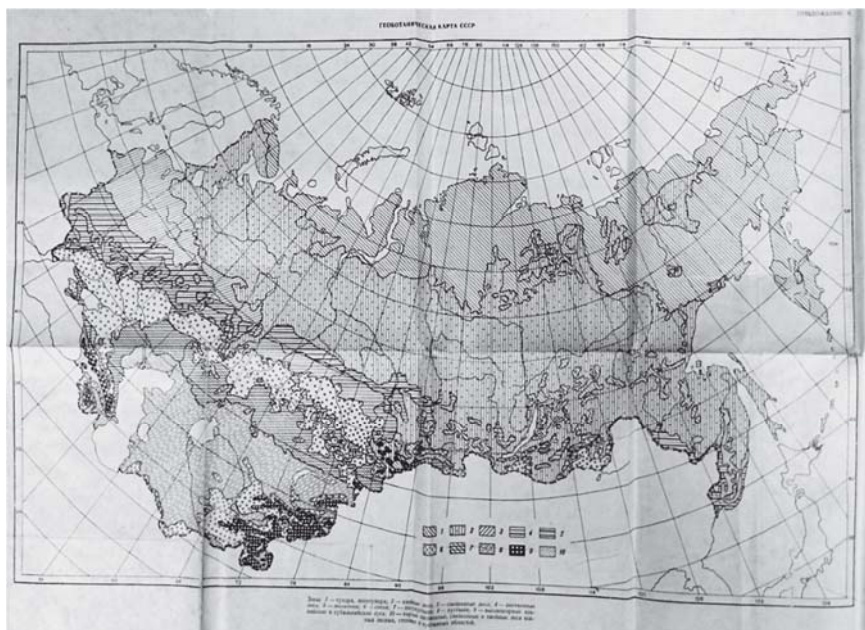


Рис. 2. Геоботаническая карта

Приближенное значение запаса влаги для первого месяца теплого периода (w_1) принимается равным согласно карте, представленной на рис. 2. Зная w_1 , приступают к расчетам w_2 для всех остальных месяцев. При расчетах w_1 для конца первого месяца к осадкам данного месяца прибавляют сумму осадков предыдущих месяцев и вычитают испаряемость за те же месяца.

Запас влаги w_1 для начала каждого расчетного месяца (начиная со второго) принимается равным запасу влаги w_2 для конца предыдущего месяца. Так расчет продолжается по циклу до конца теплого периода.

Цикл вычислений запаса продуктивной влаги считается завершенным, если полученное в результате вычислений конечное значение запаса влаги w_2 для конца последнего месяца теплого периода совпадает с принятым значением w_1 для начала первого месяца теплого периода. При несоблюдении данного условия цикл вычислений следует повторить заново, приняв при этом w_1 для начала теплого периода равным значению w_2 , полученному в результате первого цикла вычислений для конца теплого периода. При необходимости повторять цикл вычислений до тех пор, пока конечное значение запаса влаги w_1 для конца последнего месяца теплого периода не совпадет с принятым значением w_1 для начала первого месяца теплого периода.

Искомые месячные значения испарения различной обеспеченности для теплого периода снимаются с обобщенных кривых (рис. 3).

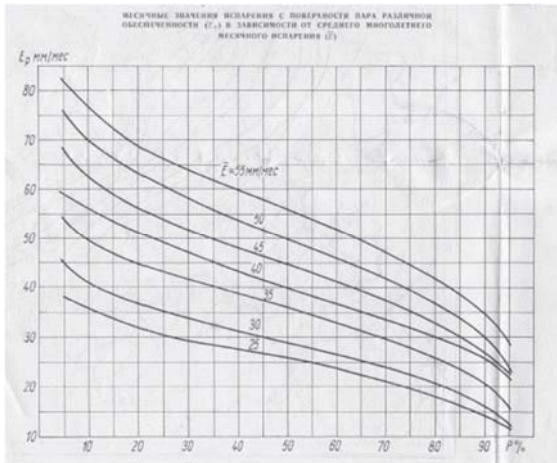


Рис. 3. Месячные значения испарения с поверхности пара различной обеспеченности (E_p) в зависимости от среднего многолетнего месячного испарения (\bar{E})

Принятые обобщенные значения отклоняются от индивидуальных кривых, построенных для каждого отдельного месяца по отдельной метеостанции не более чем на $\pm 10\%$.

Величина критической влажности W_0 определяется в соответствии с Рекомендациями по расчету испарения с поверхности суши [1] и усредняется для всего теплого периода.

Результаты расчётов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расчет и результаты расчета месячного и годового испарения с поверхности почвы

Месяц	IV		V		VI		VII		VIII		IX		Год
x	20		32		66		90		80		45		417
y	0,6		108,0		29,1		10,3		5,0		5,9		133,0
t	3,6		10,6		16,9		19,3		16,7		9,6		0,8
e	4,1		6,9		7,8		6,8		5,1		3,5		3,4
d	3,8		5,9		11,5		15,6		13,9		8,5		5,8
EO	57,0		72		127		143		137		111		738
W_0	200		200		200		200		200		200		200
a	1,14		1,18		1,32		1,36		1,34		1,28		–
b	0,86		0,82		0,68		0,64		0,66		0,72		–
c	21		-60		59		122		134		97		–
$wI, 2, мм$	10	20	20	32	32	66	66	90	90	80	80	45	–
E	4,3		9,4		31,1		55,8		58,2		34,7		193,4

Месячные значения испарения с поверхности почвы различной обеспеченности приведены в табл. 2.

Таблица 2

Месячные значения испарения с поверхности почвы различной обеспеченности

Обеспеченность	IV	V	VI	VII	VIII	IX	Год
Среднее	4,3	9,4	31	56	58	35	193
5 %	15	19	45	84	86	54	303
10 %	14	17	41	77	78	50	277
20 %	12	15	36	68	70	45	246
50 %	<10	12	29	56	58	36	191
80 %	<10	11	21	43	45	27	147
90 %	<10	<10	14	34	36	21	105
95 %	<10	<10	13	29	30	16	87

Результаты

В рамках проведённого исследования с имеющимися данными климатических параметров и проведённым рекогносцировочным обследованием территории проведения гидрометеорологических изысканий проведён расчёт и приведена одна из методик расчёта испарения с суши в летний период.

Изучен метод, приведённый в Рекомендациях по расчёту испарения с поверхности суши.

Изучена практическая точка зрения применения метода, т. к. она необходима при строительстве, реконструкции и ликвидации промышленных, гражданских и сельскохозяйственных объектов.

Список литературы

1. Рекомендации по расчёту испарения с поверхности суши. Л. : Гидрометеоизда, 1976. 96 с.

2. Иркутская область. Экологические условия развития. Атлас // Иркипедия. URL: http://irkipedia.ru/content/irkutskaya_oblast_ekologicheskie_usloviya_razvitiya_atlas_2004 (дата обращения: 15.08.2024).

3. СП 131.13330.2020. Свод правил. «Строительная климатология»: Актуализированная версия СНиП 23-01-99* : утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 24 декабря 2020 г. № 859 ; пр и введен в действие с 25 июня 2021 г. М. : ФГБУ «РСТ», 2022. 162 с.

Научное издание

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ

*Материалы
VI Всероссийской научно-практической конференции
Иркутск, 19–22 декабря 2023 г.*

ISBN 978-5-9624-2317-3

*Материалы публикуются в авторской редакции
Дизайн обложки: П. О. Ершов*

Темплан 2024. Поз. 102
Уч.-изд. 11,9

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИГУ
664082, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 124