

Прогноз зарождения полярных мезоциклонов на основе индексов конвективной неустойчивости с региональными пороговыми значениями и построение прогностических траекторий их перемещения

С.А. Петриченко (psa@rpatyphoon.ru), О.В. Калмыкова (kov@feerc.ru), С.В. Козлов (kozlov-sv@rpatyphoon.ru), Л.К. Кулижникова (kuljink@yandex.ru)

Научно-производственное объединение "Тайфун" Росгидромета, г. Обнинск.

Представлен прототип автоматизированной системы прогноза полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России, которая позволяет выделить область с заданной вероятностью обнаружения возмущения. Расчет таких областей в последовательные моменты времени дает возможность получить траекторию перемещения мезоциклона. В основе прогноза лежит определение районов совпадения зон с превышением региональных пороговых значений отобранной группы индексов конвективной неустойчивости.

Общая информация

В 1994 году Рабочей группой по полярным депрессиям Европейского геофизического общества (*European Geophysical Society's Polar Lows Working Group*) для наименования облачных вихрей α и β мезомасштаба (от 20 до 2000 км), возникающих над морями к полюсу от полярного фронта, рекомендовано пользоваться термином «полярный мезоциклон» (*polar mesocyclone*) [Rasmussen, Turner J. 2003]. Термин же «полярная депрессия» (*polar low*) служит для наименования наиболее интенсивных полярных мезоциклонов со скоростью ветра, превышающей 15 м/с.

Полярные мезоциклоны (ПМЦ) развиваются во всех морских районах с открытой водой, примыкающих к морским льдам или холодным массивам суши, преимущественно в зимнее полугодие. Максимальное количество ПМЦ в северном полушарии наблюдается в Гренландском, Норвежском и Баренцевом морях. Это связано с наличием значительных межширотных температурных контрастов в приземном слое атмосферы, которые особенно велики вблизи ледового барьера и усилены проникновением теплых атлантических вод на север. В сочетании с интенсивным тропосферным переносом эти контрасты создают условия для развития бароклинической неустойчивости в регионе в холодное время года.

Над северными морями России, лежащими к востоку от Новой Земли (Карское море, море Лаптевых и Восточно-Сибирское море), ПМЦ возникают гораздо реже, вследствие меньшей, чем в Северо-Европейском бассейне, площади свободной от льда морской поверхности. В этих областях наблюдается летний максимум в годовом ходе количества ПМЦ в отличие от зимнего максимума в морях западнее Новой Земли. Возникновение ПМЦ над акваториями морей Восточного сектора Арктики связано, в первую очередь, с переносом относительно теплого воздуха с суши на море [Заболотских, Гурвич, Шапран 2015, Яровая, Ефимов, 2022]. Предполагается, что при наличии тенденции к увеличению акваторий открытой воды в условиях происходящего потепления в этом регионе следует ожидать и возрастания количества возникающих ПМЦ.

ПМЦ наблюдаются также в восточных морях: Беринговом, Охотском и Японском [Shun-ichi I. Watanabe, Hiroshi Niino, and Wataru Yanase, 2016], где наблюдается зимний максимум.

Поскольку размеры полярных мезоциклонов незначительны по сравнению с крупномасштабными барическими образованиями (в среднем 200 – 600 км), а срок их жизни в большинстве случаев менее полутора суток, они достаточно редко отображаются на синоптических картах.

Тем не менее, анализ полей давления и геострофической завихренности все же используется для идентификации ПМЦ. Чаще всего такие циклоны обнаруживаются и исследуются на основе реанализа и по данным спутниковых наблюдений [Гурвич, Заболотских, 2015; Смирнова, Голубкин, 2017]. Запуск в 2021 году российского высокоорбитального метеорологического спутника "Арктика-М" расширил эти возможности. В последнее время для идентификации и исследования ПМЦ актуальными стали и методы численного моделирования с использованием региональных моделей [Вазаева, Чхетиани, Дурнева, 2022].

Прогноз ПМЦ до настоящего времени является нерешенной проблемой. Существуют отдельные работы, посвященные этому направлению. Например, исследовалась возможность оперативного прогноза полярного мезоциклона с помощью ансамблевой прогностической системы [Kristiansen, Sorland, Iversen, Bjarge, Kaitzow, 2011]. Исследуются возможности прогноза с помощью моделирования вариаций синоптических систем типа полярного фронта [Мингалев, Орлов, Мингалев, 2012], с использованием расчетных значений интегрального критерия спиральности и кинематического числа завихренности [Вазаева, Чхетиани, 2021].

Полярные мезовихри могут иметь различные механизмы образования. Основные, по современной классификации, это бароклинические и конвективные типы мезоциклонов [Гончаров, Караваев, Колесов, Лебедев, 2020; Ефимов, Яровая, Комаровская, 2020].

Нами ранее было предложено использовать для прогноза ПМЦ индексы конвективной неустойчивости. Поля различных конвективных индексов могут иметь особенности в областях мезоциклонов, возникающих при различных синоптических ситуациях, поскольку связаны как с термическими, так и с динамическими характеристиками атмосферных процессов. Расчет полей конвективных индексов для уже идентифицированных ПМЦ и их сопоставление с наблюдаемыми характеристиками позволили выделить ограниченный перечень этих индексов в качестве предикторов. Для каждого используемого индекса были определены региональные пороговые значения. Суперпозиция их полей, по нашему мнению, дают возможность вероятностного прогнозирования зарождения и формирования прогностической траектории перемещения рассматриваемого ПМЦ [Петриченко, Калмыкова, Козлов, 2021а, 2021б, Петриченко, Калмыкова, Козлов, Кулижникова, 2022]. На основе полученных результатов был разработан программный комплекс, позволяющий в автоматическом режиме формировать вероятностные прогностические карты угрозы возникновения и перемещения ПМЦ. Разработанная технологическая линия была запущена в работу в тестовом режиме последовательно: с ноября 2021 года – прогноз возникновения ПМЦ, с августа 2022 года – прогноз перемещения ПМЦ. В процессе работы проводится отладка и доработка отдельных элементов системы.

Программные средства

Технологическая линия построения прогнозов полярных мезоциклонов в Арктическом регионе РФ включает в себя:

- численную модель PolarWRF-ARW 4.1.5 (PWRF) с выбранными настройками и параметризациями подсеточных процессов;
- программный модуль для расчета полей индексов конвективной неустойчивости;
- программный модуль для расчета полей вероятности образования ПМЦ на основе отобранной конфигурации Индексов, каждому из которых сопоставлено свое региональное пороговое значение;
- комплекс программ запуска расчетов по расписанию;
- программный модуль построения карт областей риска образования ПМЦ;
- программный модуль для расчета центров областей с заданной вероятностью риска обнаружения ПМЦ;
- программный модуль для отрисовки траекторий перемещения центров областей с заданной вероятностью риска обнаружения ПМЦ.

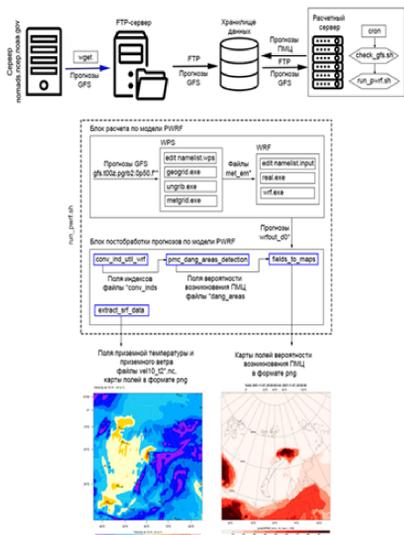


Рис. 1. Блок-схема раздела технологической линии для прогноза возникновения ПМЦ

Схема работы технологической линии

На FTP-сервере НПО Тайфун, имеющем доступ к сети Интернет, по заданному расписанию запускается программа, которая обращается к специализированному серверу Национального центра по прогнозированию окружающей среды NCEP и проверяет наличие результатов счета по модели GFS от 00ч UTC текущей рассматриваемой даты. Если прогнозы доступны для скачивания, то осуществляется их загрузка на FTP-сервер. По окончании загрузки по протоколу ftp файлы прогнозов передаются на специально оборудованный сервер для хранения больших объемов информации – Хранилище данных.

На Расчетном сервере с установленной системой PWRF по заданному расписанию с помощью специальных скриптов реализуется запрос к Хранилищу данных на получение требуемых прогнозов GFS. При наличии соответствующих прогнозов они загружаются на Расчетный сервер, и запускается расчет по модели PWRF с последующей обработкой ее выходной продукции.

В процессе расчета по модели PWRF формируются выходные файлы, содержащие прогностические данные по стандартным метеозлементам (температура, давление, влажность, скорость ветра и др.) в узлах расчетной сетки на различных вертикальных уровнях. Эти данные используются для последующего расчета полей индексов конвективной неустойчивости атмосферы.

Для расчета индексов используется специально разработанный программный модуль, по результатам работы которого формируются выходные файлы, содержащие значения около 100 индексов конвективной неустойчивости.

На основе выбранной конфигурации индексов строится поле вероятности образования ПМЦ. Расчет вероятности производится с помощью специально разработанного программного модуля. При расчете вероятности используется, как это отмечалось нами ранее, следующее предположение: чем больше индексов идентифицировали критическую область, тем больше вероятность того, что в этой области может быть обнаружен ПМЦ.

В настоящий момент для идентификации ПМЦ используется блок из десяти конвективных индексов, в который входят группы индексов, связанных с завихренностью, со скоростью и сдвигом скорости ветра, а также с градиентами температуры и с влажностью в нижнем слое атмосферы. Для каждого из используемых индексов определены региональные критические значения. В некоторых случаях эти значения определены именно для ПМЦ.

Схема работы технологической линии

Например, общепринятое значение сдвига ветра в нижнем трех-километровом слое атмосферы в обычной конвективной системе > 5 м/с. Для ПМЦ нами установлено < 5 м/с (по аналогии с тропическими циклонами, которые не развиваются при большом вертикальном сдвиге ветра).

На следующем этапе работы технологической линии осуществляется построение карт областей риска образования ПМЦ (на базе вышеупомянутых полей вероятности), а также карт приземной температуры и приземной скорости ветра.

Далее реализуется алгоритм отслеживания перемещения областей существования возмущений. В выделенных зонах с 70% вероятностью возникновения ПМЦ на комплексной пространственной картине рассчитываются геометрические центры масс предполагаемых ПМЦ. Расчеты проводятся для каждого момента времени исходного прогноза. По результатам сопоставления центров масс, рассчитанных за последовательные моменты времени, производится их группировка по принадлежности к одному и тому же ПМЦ. Центры масс, отнесенные к одному ПМЦ, в порядке их расчета соединяются прямой линией. Таким образом, формируется прогностическая траектория перемещения рассматриваемого ПМЦ.

Для расчета положения центров областей 70% вероятности обнаружения ПМЦ в последовательных по времени прогнозах разработан дополнительный программный модуль.

На заключительном этапе работы осуществляется построение карт с прогностическими траекториями перемещения центров областей с заданной вероятностью обнаружения ПМЦ. Эти траектории, по нашему мнению, в определенной степени отражают возможную картину перемещения реального мезоциклона.

Тестовые расчеты

Моделирование проводится один раз в сутки, заблаговременность прогноза – до 48 часов. По результатам моделирования формируются выходные поля стандартных метеозлементов с часовым шагом по времени, шаг расчетной сетки составляет 12 км. Расчетная область включает в себя практически всю акваторию Баренцева и Карского морей, а также западную часть моря Лаптевых – это области, где сравнительно часто наблюдаются ПМЦ. В качестве начальных и граничных условий при проведении расчетов используются прогностические данные глобальной модели GFS с разрешением 0,5° (счет от 00ч UTC). На рис. 2 представлена область интегрирования, а в табл. 1 даны сведения об используемых настройках модели PWRF.



Рис. 2

Параметр	Используемое значение
Размер расчетной области	187 x 187 узлов
Шаг сетки	12 км
Число вертикальных уровней	50
Временной шаг вывода	1 ч
Разрешение данных	статических
Разрешение данных	30 с
Проекция карты	polar
Координаты центра	60°E, 77°N
Период моделирования	48 ч

Табл. 1

Для удобства анализа карты риска образования ПМЦ формируются в виде трех уровней опасности по типу «светофора»: зеленый уровень – вероятность образования ПМЦ в диапазоне 0 – 50%, желтый уровень – от 50 до 70%, красный уровень – больше 70%.

На рис. 3 представлены два последовательных спутниковых изображения района Баренцева моря с явно выраженным полярным мезоциклоном (снимок с сайта НИЦ "Планета") за 08 марта 2022 года. На рис. 4 – последовательные прогностические карты областей риска образования ПМЦ, рассчитанные на те же сроки.

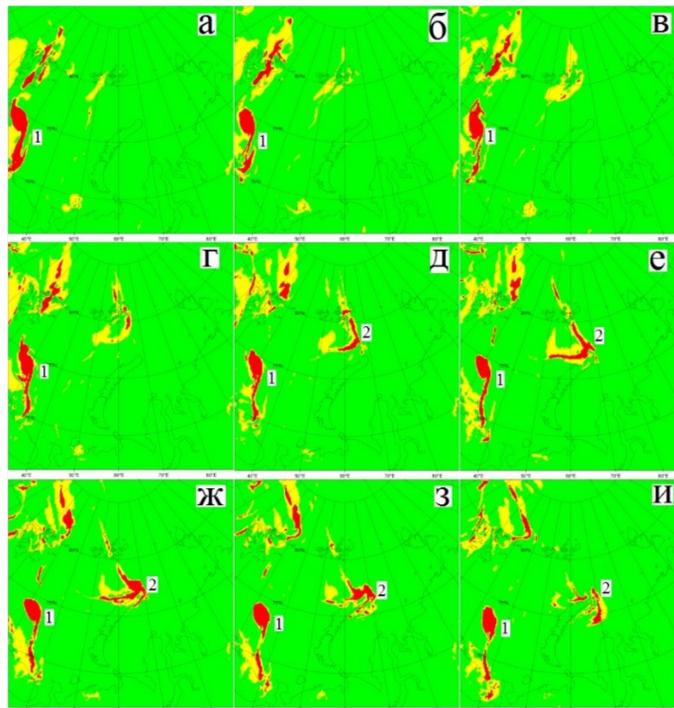


Рис. 4 – Прогностические карты от 00 ч UTC 8.03.2022 г. областей риска образования ПМЦ за период с 00 UTC 8.03.22 г. (а) до 00 UTC 9.03.22 г. (и) с интервалом в 3 ч

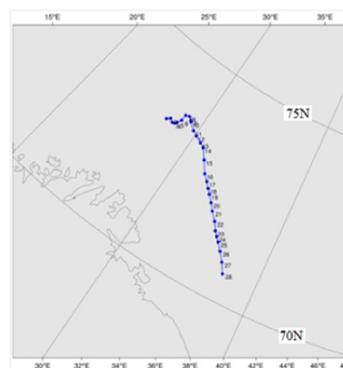


Рис. 5 - Прогностическая траектория перемещения мезоциклона, представленного на рис. 3, от 00 ч UTC 8.03.2022 г. до 03 ч UTC 9.03.2022 г

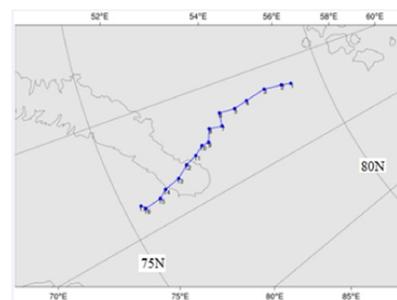


Рис. 6 - Прогностическая траектория перемещения возмущения, возникшего в районе 12 ч. UTC 8 марта северо-западнее северной оконечности Новой Земли (рис. 4, цифра 2), от 11 ч UTC 8.03.2022 г. до 03 ч UTC 9.03.2022 г. К сожалению, на спутниковых снимках этот район находился за границей области наблюдений.

Резюме

Создана технологическая линия построения в автоматическом режиме прогноза возникновения и перемещения полярных мезоциклонов. Как показал опыт ее использования, отдельные элементы этой системы требуют дальнейшего совершенствования. Особенно это относится к блоку прогноза перемещения ПМЦ. Тем не менее, первые результаты, полученные с ее помощью, позволяют утверждать, что выбранные подходы по построению вероятностных прогнозов возникновения и перемещения ПМЦ могут дать положительный эффект.

Результаты проведенных в реальном времени тестовых расчетов подтвердили работоспособность системы.

Список литературы представлен в тексте статьи.