

Научная статья

УДК 551.50+504.3

DOI: 10.24412/2658-4255-2023-2-54-64



EDN: EAJGFJ

Для цитирования:

Петриченко С.А., Калмыкова О.В., Козлов С.В., Кулижникова Л.К. Использование композиции индексов конвективной неустойчивости для прогноза зарождения полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России // Российская Арктика. 2023. Т. 5. № 2. С. 54–64. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-2-54-64>

Получена: 21.04.2023

Принята: 14.07.2023

Опубликована: 26.07.2023

For citation:

Petrichenko S.A., Kalmykova O.V., Kozlov S.V., Kulizhnikova L.K. Using a composition of convective instability indices to predict the occurrence of polar mesocyclones in the Arctic region of Russia. Russian Arctic, 2023, vol. 5, no.2, pp. 54-64. (In Russian). <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-2-54-64>

Конфликт интересов.


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Работа выполнена в рамках плана НИТР Росгидромета проект 5.1 «Развитие моделей, методов и технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты (криосферы), процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными сооружениями для Арктики и технологий гидрометеорологического обеспечения потребителей» на 2020 – 2024 годы.



S.A. Petrichenko, O.V. Kalmykova, S.V. Kozlov, L.K. Kulizhnikova

USING A COMPOSITION OF CONVECTIVE INSTABILITY INDICES TO PREDICT THE OCCURRENCE OF POLAR MESOCYCLONES IN THE ARCTIC REGION OF RUSSIA

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПОЗИЦИИ ИНДЕКСОВ КОНВЕКТИВНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ ПРОГНОЗА ЗАРОЖДЕНИЯ ПОЛЯРНЫХ МЕЗОЦИКЛОНОВ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ РОССИИС.А. Петриченко*, О.В. Калмыкова, С.В. Козлов, Л.К. Кулижникова

Научно-производственное объединение «Тайфун» Росгидромета, Обнинск, Россия

E-mail: [*psa@typhoon.obninsk.ru](mailto:psa@typhoon.obninsk.ru)**Аннотация**

В статье представлено краткое описание разработанной технологической линии построения в автоматическом режиме прогноза возникновения полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России. Технологическая линия включает в себя блок численного моделирования Polar WRF с заданием начальных и граничных условий по данным модели GFS, блок расчета индексов конвективной неустойчивости, блок расчета полей вероятности зарождения полярных мезоциклонов с использованием региональных порогов для отобранных индексов, подсистему визуализации, которая позволяет выделить область с заданной вероятностью обнаружения возмущения. В работе описана предлагаемая методика прогноза полярных мезоциклонов, приведены обоснования использования ряда конвективных индексов в качестве предикторов. Для используемых конвективных индексов были определены региональные пороговые значения, превышение которых в заданную сторону в ограниченной области увеличивает вероятность возникновения в этой зоне полярного мезоциклона. Дано представление о работе разработанной технологической линии прогноза. Продемонстрированы результаты прогностических расчетов для ряда мезоциклонов, наблюдавшихся в 2022 г. Представлены оценки оправдываемости прогноза по результатам непрерывной работы технологии в тестовом режиме с января по декабрь 2022 года.

Ключевые слова: полярные мезоциклоны, индексы конвективной неустойчивости, региональные пороговые значения, зарождение, прогноз, модель Polar WRF, технологическая линия

USING A COMPOSITION OF CONVECTIVE INSTABILITY INDICES TO PREDICT THE OCCURRENCE OF POLAR MESOCYCLONES IN THE ARCTIC REGION OF RUSSIA

S.A. Petrichenko*, O.V. Kalmykova, S.V. Kozlov, L.K. Kulizhnikova

Research and Production Association "Typhoon" of Roshydromet, Obninsk, Russia

E-mail: [*psa@typhoon.obninsk.ru](mailto:psa@typhoon.obninsk.ru)**Abstract**

The article presents a brief description of the developed technological line for the automatic prediction of the occurrence of polar mesocyclones in the Arctic region of Russia. Technological line includes a block of numerical simulation Polar WRF with the setting of initial and boundary conditions according to the GFS model, a block for calculating convective instability indices, a block for calculating the probability fields of polar mesocyclone nucleation using regional thresholds for selected indices, a visualization subsystem that allows to select an area with a given probability of detecting a perturbation. The paper gives a description of the proposed method for predicting polar mesocyclones, and justifies the use of a number of convective indices as prognostic predictors. For

the convective indices used, regional threshold values were determined, the excess of which in a given direction in a limited area increases the probability of a polar mesocyclone occurring in this zone. The operation of the developed forecasting technological line is described. The results of prognostic calculations for a number of mesocyclones observed in 2022 are demonstrated. Estimates of the justification of the forecast based on the results of continuous operation of the technology in test mode from January to December 2022 are presented.

Keywords: polar mesocyclones, convective instability indices, regional threshold values, origin, forecast, Polar WRF model, technological line

Введение

В 1994 году Рабочей группой по полярным депрессиям Европейского геофизического общества для наименования облачных вихрей α и β мезомасштаба (от 20 до 2000 км), возникающих над морями к полюсу от полярного фронта, рекомендовано использовать термин «полярный мезоциклон» (*polar mesocyclone*) [1]. Термин «полярная депрессия» (*polar low*) служит для наименования наиболее интенсивных полярных мезоциклонов со скоростью ветра, превышающей 15 м/с. Полярные мезоциклоны (ПМЦ) зачастую сопровождаются опасными погодными явлениями - штормовым волнением и ветром, обледенением судов и сооружений, снежными зарядами с ухудшением видимости. Штормовая ситуация развивается, как правило, внезапно и в течение короткого времени.

В Северном полушарии областью наиболее активного мезомасштабного циклогенеза является акватория Северо-Европейского бассейна. Это связано с наличием значительных межширотных температурных контрастов в приводном 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 бароклинной 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 [2]. Предполагается, что при наличии тенденции к увеличению акваторий открытой воды в условиях происходящего потепления в этом регионе следует ожидать и возрастания количества возникающих ПМЦ.

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 [2, 3, 4]. Запуск в 2021 году российского высокоэллиптического метеорологического спутника «Арктика-М» расширил эти возможности. Для идентификации ПМЦ актуальными стали и методы численного моделирования с использованием региональных моделей. Например, в работе [5] разрабатываются критерии, позволяющие идентифицировать и исследовать генезис ПМЦ. В работе [6] реалистично воспроизведены динамика и эволюция полярного циклона и постфактум даны прогнозы его перемещения.

Прогноз зарождения ПМЦ до настоящего времени остается нерешенной проблемой. Существуют отдельные работы, посвященные этому направлению. Например, исследовалась возможность оперативного прогноза полярного мезоциклона с помощью ансамблевой прогностической системы [7]. Исследуются возможности прогноза с помощью моделирования вариаций синоптических систем типа полярного фронта [8], с использованием расчетных значений интегрального критерия спиральности и кинематического числа завихренности [9].

Полярные мезовихри могут иметь различные механизмы образования. Основные, по временной классификации, это бароклинные и конвективные типы мезоциклонов [10, 11].

Основные положения

Для прогноза ПМЦ было предложено использовать индексы конвективной неустойчивости, расчет которых ведется по выходным данным численного моделирования атмосферы. Поля различных индексов могут иметь особенности в областях мезоциклонов, возникающих при различных синоптических ситуациях, поскольку связаны как с термическими, так и с динамическими характеристиками атмосферных процессов. В ходе работы были проанализированы поля около 100 известных индексов конвективной неустойчивости, относящиеся к моментам обнаружения ПМЦ. В процессе оценки прогностической значимости индексов рассматривались известные случаи формирования ПМЦ в исследуемом регионе, кроме того использовалась собранная авторами база данных о ПМЦ, сформированная по результатам анализа спутниковых снимков, на данный момент включающая в себя 115 записей о ПМЦ, начиная с 2020 г. По результатам проведенного анализа был сформирован набор потенциальных предикторов полярного циклогенеза из числа рассчитанных индексов, имевших особенности в районах развития ПМЦ. Для каждого индекса были определены региональные пороговые значения, с учетом их направленности на распознавание угроз возникновения ПМЦ. Важность определения регионального или ситуационного порогового значения обуславливается тем, что в отобранный перечень вошли индексы, не применявшиеся для прогноза ПМЦ. Для некоторых индексов общеизвестные для них пороги относятся к прогнозу интенсивной локализованной конвекции с опасными явлениями над сушей, по этой причине для использования этих индексов в исследуемом регионе их пороговые значения были уточнены. Предполагается, что установленные пороги могут быть в дальнейшем незначительно скорректированы по мере накопления новых данных о ПМЦ. В работе технологии была заложена такая возможность.

На рисунке 1 представлено спутниковое изображение акватории Баренцева моря с полярным мезоциклоном, наблюдавшимся в этой зоне в 7:45 UTC 15 февраля 2022 года. А на рисунке 2 приведено пространственное распределение относительной штормовой спиральности ($srh3$), которая используется, как один из предикторов, рассчитанное для этой же акватории на тот же срок.

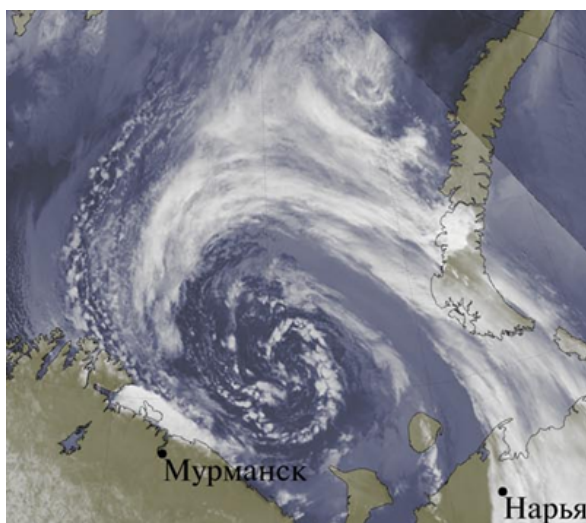


Рисунок 1. Полярный мезоциклон 15 февраля 2022 года над акваторией Баренцева моря. ИК-изображение, полученное в 7:45 UTC

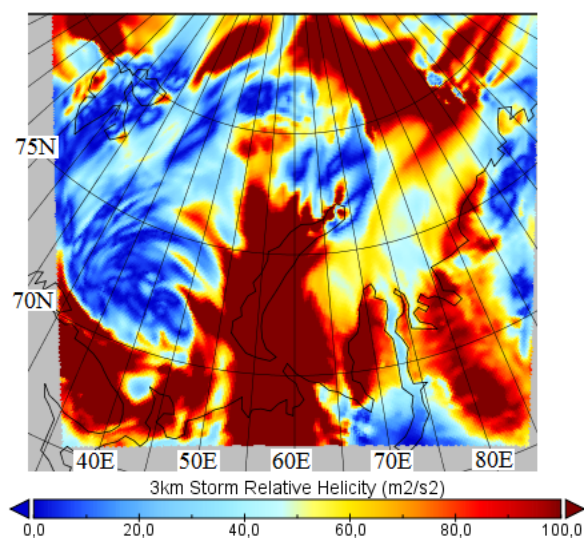


Рисунок 2. Поле конвективного индекса Storm Relative Helicity ($srh3$) в районе развития полярного мезоциклона 15 февраля 2022 года в 8 ч UTC над Баренцевым морем

Сравнение этих рисунков указывает на наличие зоны в поле $srh3$, совпадающей по местоположению и времени с временем и районом развития ПМЦ. Однако самым существенным является тот факт, что спиральность в этой зоне имеет минимум. Для данного индекса была установлена верхняя допустимая граница в $50 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Возможно, такой минимум связан с малым сдвигом ветра, который характерен для ПМЦ в его центральной зоне, также как и для тропических циклонов, при большом вертикальном сдвиге ветра они не развиваются. В качестве порогового для сдвига ветра в нижнем слое атмосферы для распознавания опасности ПМЦ установлено значение $< 5 - 7 \text{ м/с}$ в зависимости от толщины слоя. Для сравнения в обычной конвективной системе используется порог $> 5 \text{ м/с}$.

Расчеты полей отобранных индексов в оперативном режиме позволили сформировать несколько конфигураций вероятностного прогноза ПМЦ [12]. Под конфигурацией здесь следует понимать композицию индексов с установленными для них порогами. По мере тестирования разработанной технологии вносились изменения в состав конфигураций прогноза (включались новые конфигурации, корректировались пороговые значения индексов), оценивалось качество прогнозирования по каждой конфигурации. На рисунке 3 для примера показан вероятностный прогноз упомянутого выше ПМЦ на базе двух конфигураций в режиме «светофор»: зеленый уровень – вероятность образования ПМЦ в диапазоне 0 – 50%, желтый уровень – от 50 до 80%, красный уровень – больше 80%. Из рисунка 3 видно, что обе конфигурации прогноза в данном конкретном случае смогли достаточно хорошо воспроизвести положение ПМЦ. Однако следует отметить, что во многих случаях при использовании температурно-влажностной композиции возможная прогностическая зона возникновения ПМЦ оказывается существенно больше реальной.

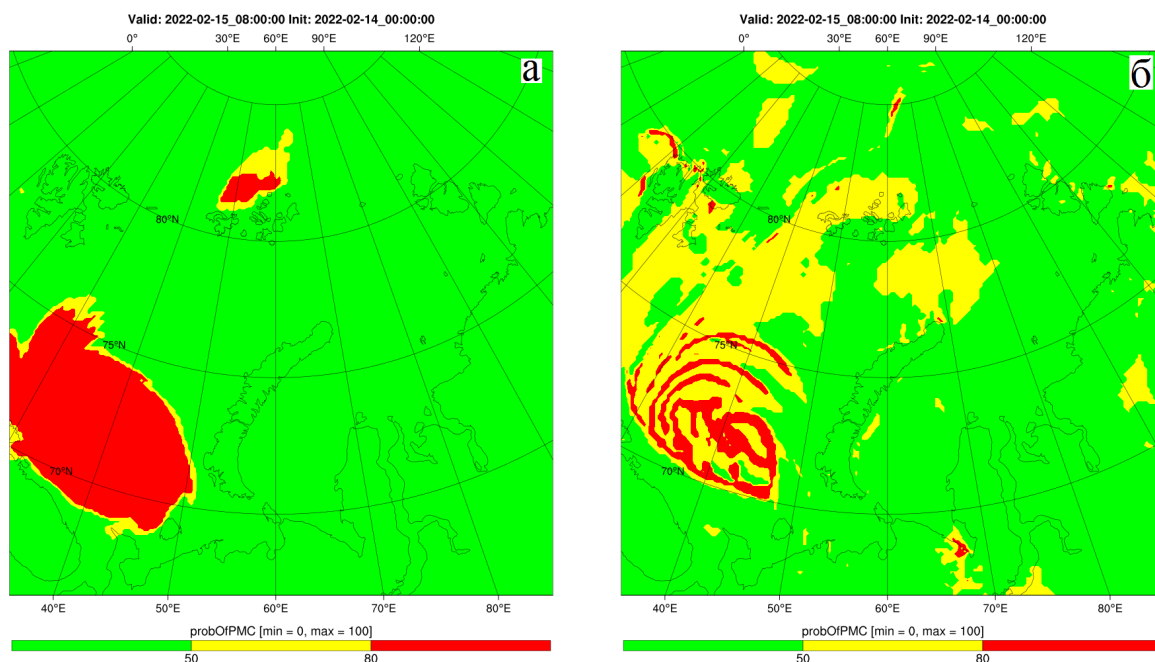


Рисунок 3. Зоны риска возникновения полярных мезоциклонов (вероятностный прогноз) на 8 ч UTC 15 февраля 2022 года, рассчитанные на базе различных конфигураций прогноза (а - композиция из семи температурно-влажностных индексов, б - композиция из восьми динамических индексов)

В настоящий момент в качестве основной рабочей конфигурации прогноза ПМЦ выбрана конфигурация из восьми динамических конвективных индексов, связанных с завихренностью, спиральностью и сдвигом ветра (справа на рисунке 3). Данная конфигурация показывает наименьшее число ложных прогнозов.

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.

Схематично работу технологической линии можно представить следующим образом. 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 0 ч UTC текущей рассматриваемой даты (шаг сетки 0.5°). Если прогнозы доступны для скачивания, с помощью свободно

распространяемой программы wget 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. Прогнозы по модели GFS используются для задания начальных и граничных условий при последующих расчетах по модели PWRF. Выбор в пользу этих данных был обусловлен полученными результатами предварительного тестирования модели PWRF на данных GFS (модель достаточно хорошо воспроизводила характерные черты ПМЦ), а также изначально ориентированной направленностью технологии на оперативное прогнозирование – прогнозы по модели GFS самого раннего счета (от 0 ч UTC) загружаются в 03:30-03:40 UTC, спустя примерно 3 ч становятся доступными прогнозы ПМЦ. Такой режим работы технологии позволит в перспективе использовать ее выходную продукцию в оперативной работе синоптика-прогнозиста.

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. В текущей версии работы технологии моделирование проводится один раз в сутки (по мере получения прогнозов GFS от 0 ч UTC), заблаговременность прогноза – до 48 часов. По результатам моделирования формируются выходные поля стандартных метеозаписей (температура, давление, влажность, скорость ветра и др.) в узлах расчетной сетки на различных вертикальных уровнях с часовым шагом по времени, на основе которых рассчитываются поля индексов конвективной неустойчивости. 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. На рисунке 4 показана область интегрирования, а в таблице 1 даны сведения об используемых настройках модели PWRF.

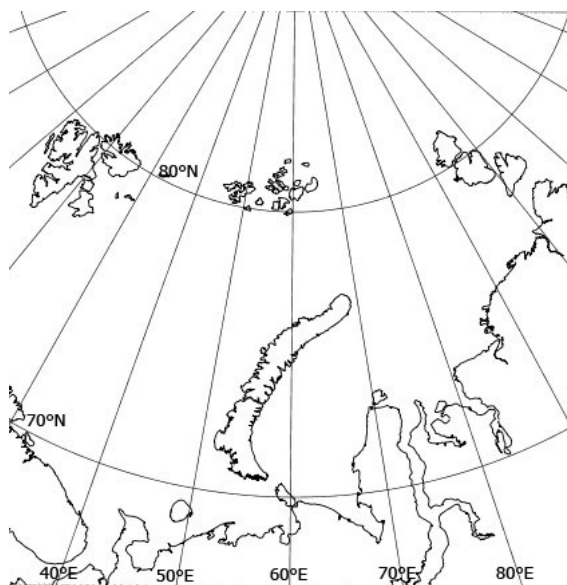


Рисунок 4. Область интегрирования модели PWRF

Таблица 1.

Настройки модели PWRF

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

На основе выбранной конфигурации (композиции индексов) строится поле вероятности образования ПМЦ (рисунки 6 и 9). Расчет вероятности производится с помощью специально разработанного программного модуля. При расчете вероятности используется предположение об аддитивном вкладе каждого индекса - чем больше индексов идентифицировали как критическую область, тем больше вероятность того, что в этой области может быть обнаружен ПМЦ.

На заключительном этапе работы технологической линии осуществляется построение карт областей риска образования ПМЦ (на базе вышеупомянутых полей вероятности) в цветовой шкале «светофор» (рисунок 3), а также карт приземной температуры и приземной скорости ветра (рисунки 7 и 10).

Полярные мезоциклоны в феврале и мае 2022 г.

Для демонстрации возможностей созданной автоматизированной прогностической системы ниже, в качестве примера, приведены прогностические расчеты для мезоциклонов, наблюдавшихся в акваториях Баренцева и Карского морей в 2022 г.

На рисунке 5 представлены четыре последовательных спутниковых изображения района Баренцева моря (снимки с сайта НИЦ «Планета») за 14 - 15 февраля 2022 года с явно выраженным полярным мезоциклоном с горизонтальными размерами около 600 км. На рисунке 6 – последовательные прогностические карты областей риска образования ПМЦ, рассчитанные для той же акватории, на те же сроки. На рисунке 7 – последовательные прогностические поля модуля приземного ветра для той же ситуации.

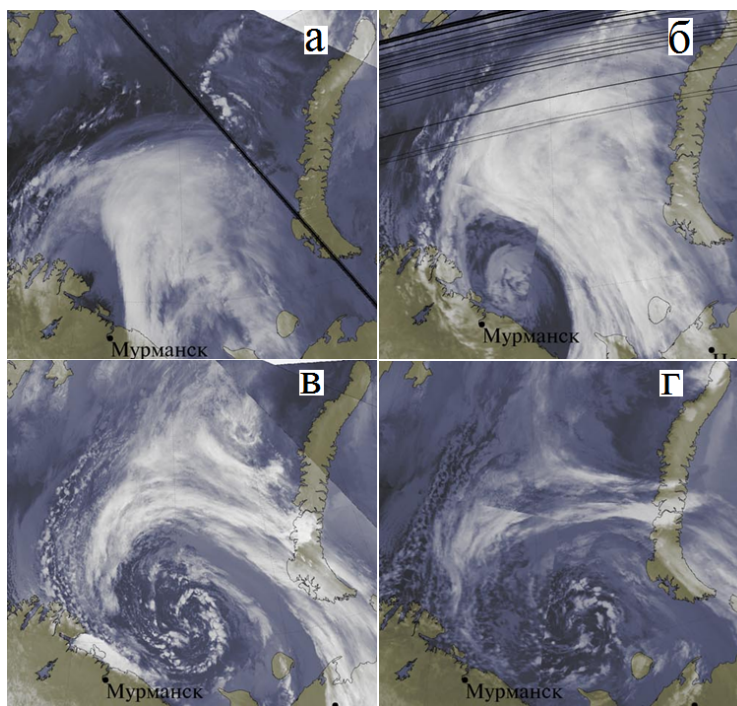


Рисунок 5. Спутниковые изображения акватории Баренцева моря с ПМЦ 14.02.2022 г. в 7:57 UTC (а) и 16:08-17:51 UTC (б), 15.02.2022 г. в 7:45 UTC (в) и 17:39 (г)

Из рисунка 6 видно, что область высокой вероятности обнаружения ПМЦ (вероятность более 80%) располагалась непосредственно в зоне реального положения мезоциклона в соответствующие моменты времени. Необходимо отметить, что если первое спутниковое изображение с вероятным мезоциклоном было получено в районе 8 ч UTC 14 февраля, то на прогностических картах возможный мезоциклон выявлялся уже в 2 ч UTC 14 февраля, а возможно был бы идентифицирован еще раньше при других границах области интегрирования.

На рисунке 7 в той же зоне наблюдается динамическая структура характерная для полярных мезоциклонов, которые, как отмечалось в многочисленных работах, имеют динамическую структуру подобную тропическим циклонам с минимумом скорости в центре и максимумом – на периферии. По данным метеостанций, расположенных в Мурманской области и в Ненецком автономном округе на побережье Баренцева моря 14 и 15 февраля 2022 г. фиксировались порывы ветра до 20 м/с.

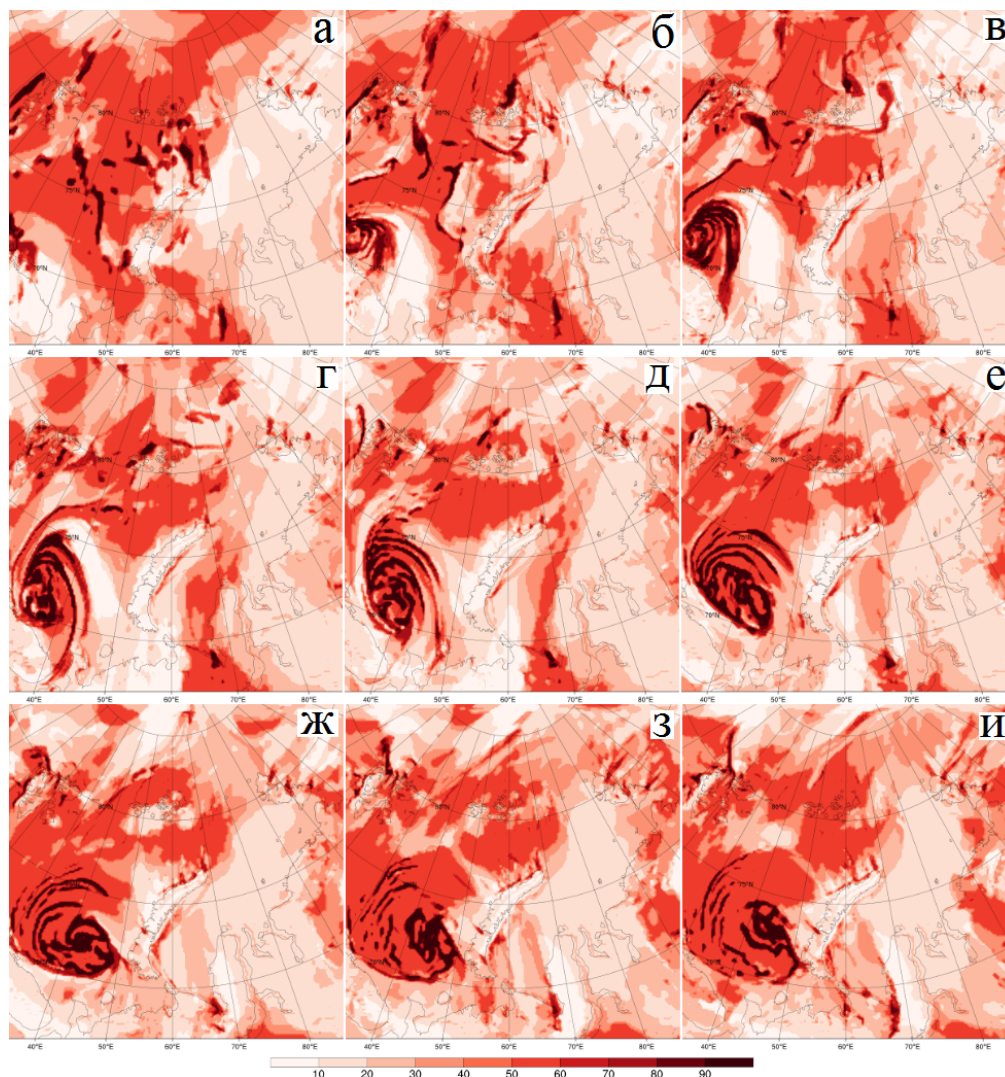


Рисунок 6. Прогностические карты от 00 ч UTC 14.02.2022 г. областей риска образования ПМЦ за период с 00 ч UTC 14.02.22 г. (а) до 18 ч UTC 15.02.22 г. (з) с интервалом в 6 ч и на 23 ч UTC 15.02.22 г. (и)

На рисунке 8 показаны спутниковые изображения района Баренцева и Карского морей (снимки с сайта НИЦ «Планета») за 17-18 мая 2022 года. На снимках идентифицируются два небольших полярных мезоциклона с горизонтальными размерами 250-300 км. Первый прослеживался с 04:51 до 18:09 UTC 17 мая 2022 г. в акватории Карского моря, второй очень короткоживущий с 14:46 до 18:09 UTC 17 мая 2022 г. в акватории Баренцева моря. В поле прогностической вероятности образования ПМЦ в местах обнаружения этих мезоциклонов идентифицировались области повышенного риска их формирования (рисунок 9). Интересно, что после распада ПМЦ в Карском море на следующий день в этой же акватории к северо-востоку от Новой Земли стал формироваться еще один мезоциклон (рисунок 8г), что согласовывалось с построенным прогнозом – до середины дня 19 мая 2022 г. в этой области прогнозировалась высокая вероятность образования ПМЦ. Что касается приземной скорости, то для первого из рассматриваемых ПМЦ модель смогла воспроизвести минимум скорости в центре мезоциклона, для второго в области его расположения отмечался очаг небольших скоростей по сравнению с ближайшим окружением, но явного минимума не наблюдалось (рисунок 10). На метеостанциях вдоль побережья Баренцева моря в первой половине дня 17 мая 2022 г. фиксировались порывы ветра до 15 м/с.

Таким образом, подводя итог представленным результатам можно сделать вывод о том, что в обоих случаях предлагаемая методика позволила построить достаточно качественный прогноз угроз образования ПМЦ. Она может быть применима для оценки риска формирования полярных мезоциклонов различных горизонтальных масштабов и времени жизни.

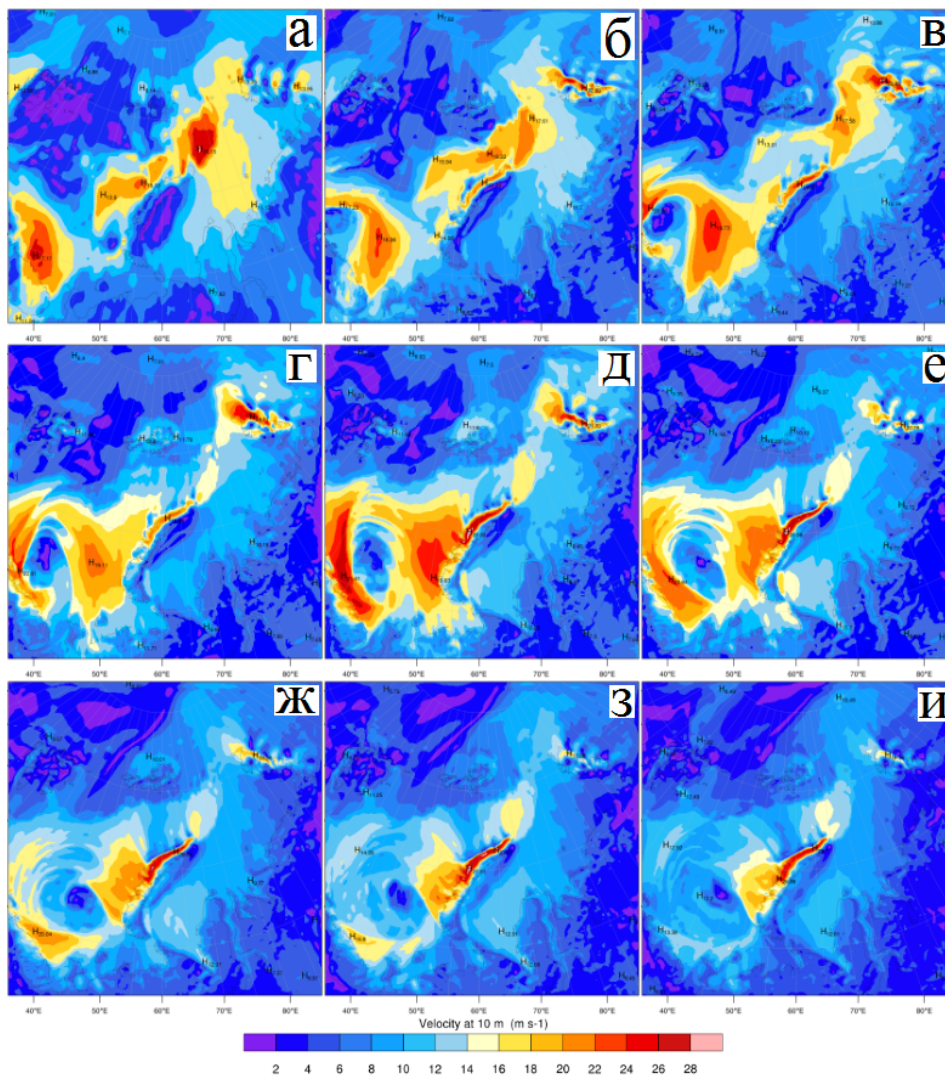


Рисунок 7. Прогностические поля модуля приземной скорости ветра от 00 ч UTC 14.02.2022 г. за период с 00 ч UTC 14.02.22 г. (а) до 18 ч UTC 15.02.22 г. (з) с интервалом в 6 ч и на 23 ч UTC 15.02.22 г. (и)

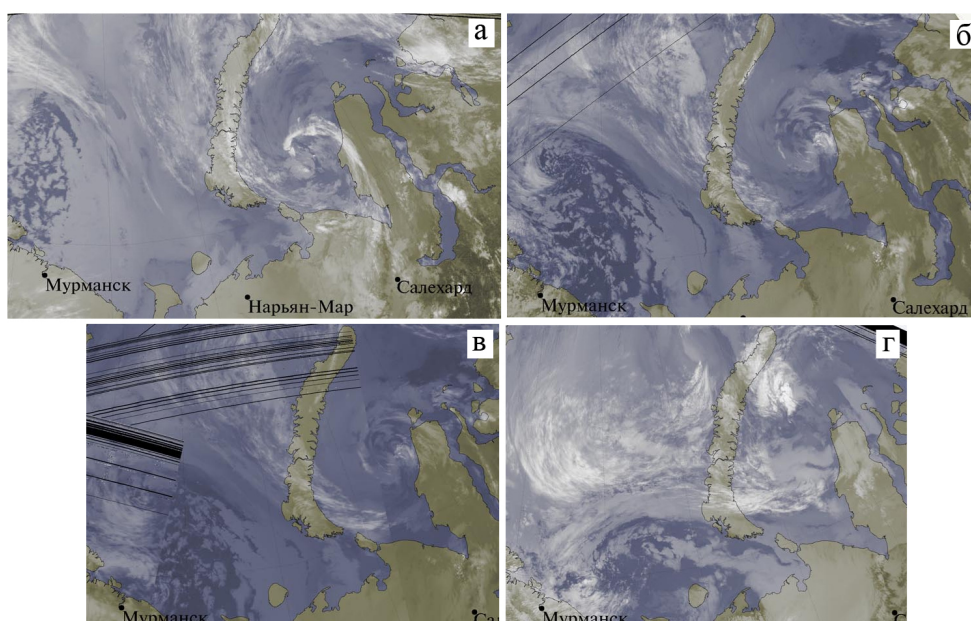


Рисунок 8. Спутниковые изображения акватории Баренцева и Карского морей с ПМЦ 17.05.2022 г. в 04:51 UTC (а), 14:46 UTC (б), 16:26-18:09 UTC (в) и 18.05.2022 в 06:20 UTC (г)

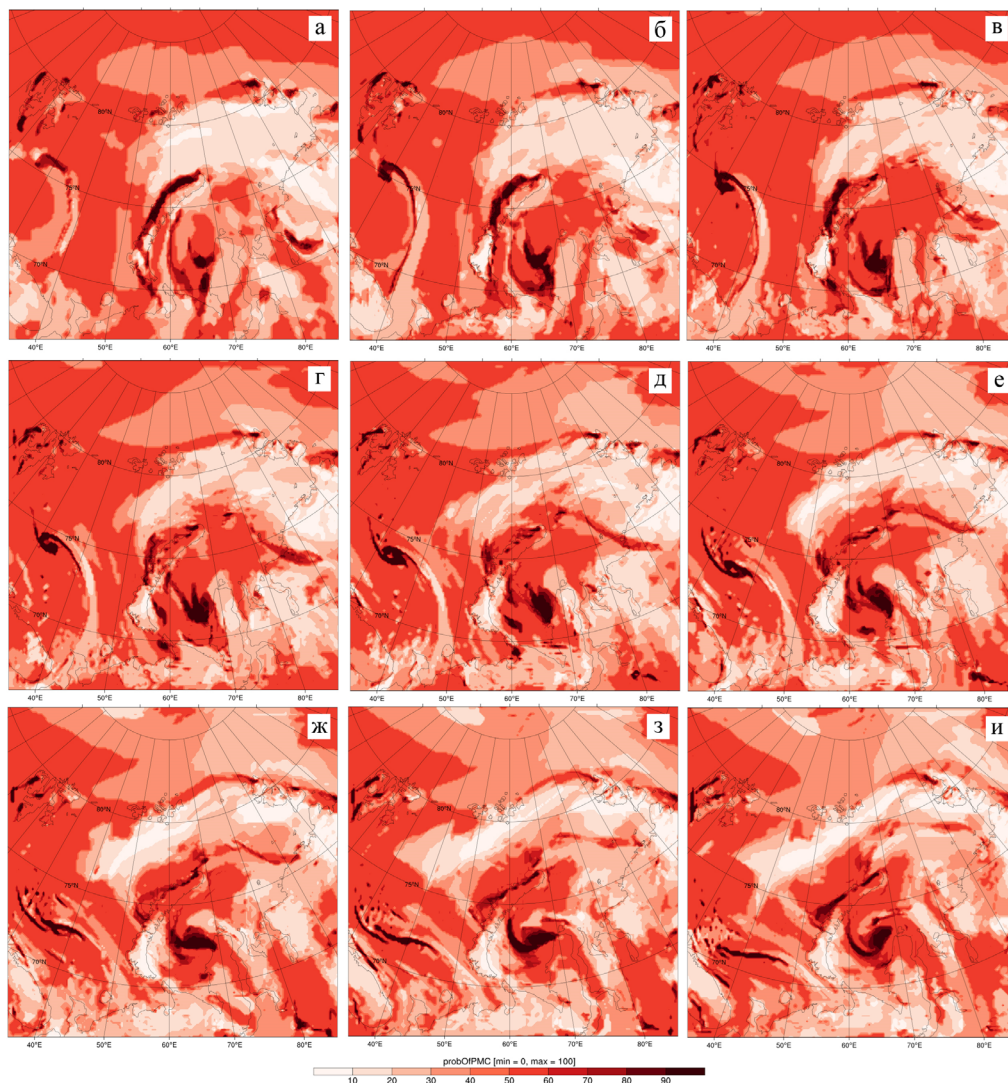


Рисунок 9. Прогностические карты от 00 ч UTC 17.05.2022 г. областей риска образования ПМЦ за период с 00 ч UTC 17.05.2022 г. (а) до 00 ч UTC 18.05.2022 г. (и) с интервалом в 3 ч.

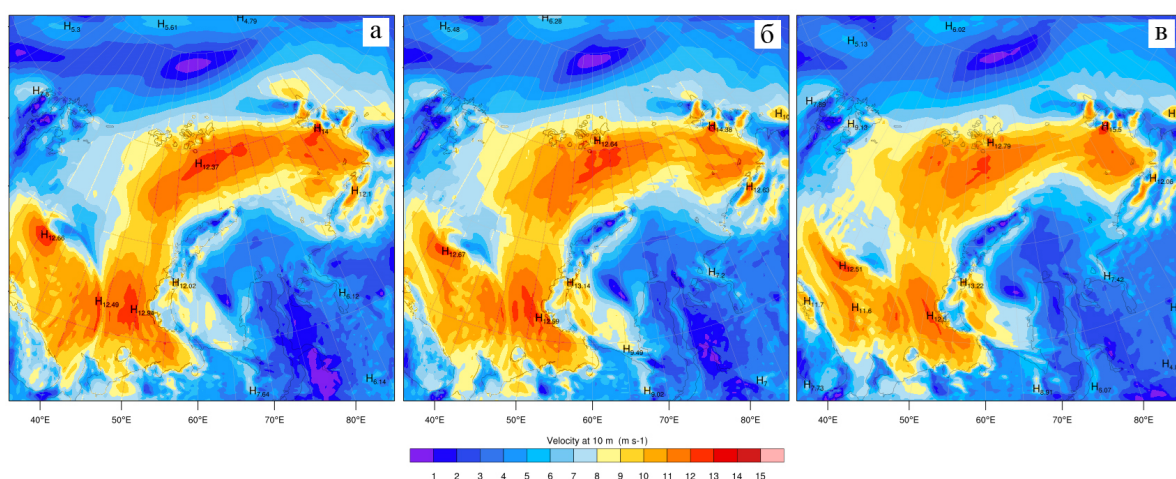


Рисунок 10. Прогностические поля модуля приземной скорости ветра от 00 ч UTC 17.05.2022 г. за период с 09 ч UTC 17.05.2022 г. (а) до 15 ч UTC 17.05.2022 г. (в) с интервалом в 3 ч.

Оценка качества прогноза

Разработанная технологическая линия была запущена в работу в тестовом режиме с ноября 2021 года. В процессе работы ведется отладка и доработка отдельных элементов системы. Была проведена существенная корректировка перечня используемых

индексов конвективной неустойчивости по сравнению с первоначальным вариантом. При этом для новых блоков индексов проводился пересчет прогностических полей вероятности обнаружения ПМЦ с момента начала работы системы.

Для оценки качества прогноза рассчитанные поля вероятности возникновения ПМЦ сопоставлялись со спутниковыми изображениями с сайта НИЦ «Планета» за те же сутки. Прогноз считался успешным при наличии совпадения по времени и месту прогностического циклона с идентифицированным на снимке. При наличии прогностического ПМЦ и отсутствии его на спутниковых изображениях за те же сутки прогноз считался ложным. При этом необходимо отметить, что за сутки, как правило, авторам были доступны всего от одного до трех одиночных или смонтированных из нескольких спутниковых изображений всей рассматриваемой акватории, полученных в разное время. Наличие ложного прогноза не означает, что ПМЦ в действительности отсутствовал. Возможно, он не был зафиксирован из-за того, что вследствие своего небольшого времени жизни успел сформироваться и диссипировать в интервале времени между двумя последовательными доступными спутниковыми изображениями. Т.е. имеет место оценка ложных прогнозов по максимуму.

В 2022 году по спутниковым изображениям с января по декабрь было идентифицировано в рассматриваемой акватории 84 полярных мезоциклонов. Оправдываемость прогноза по описанной методике в этот период составила 70%. Доля ложных прогнозов была оценена в 40%. Представляется перспективным в дальнейшем повысить качество прогноза за счет совершенствования разработанной технологии, посредством привлечения дополнительных данных.

Заключение

Разработана технологическая линия построения в оперативном режиме прогноза возникновения полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России. Насколько известно авторам, ничего подобного в России еще не было. В настоящий момент технология проходит тестовые испытания. Как показал опыт ее пока еще относительно недолгого использования, отдельные элементы прогностической системы могут потребовать дальнейшей модификации. Тем не менее, первые результаты, полученные с ее помощью, указывают на то, что выбранные подходы по построению вероятностных прогнозов возникновения ПМЦ могут дать в дальнейшем положительный эффект, технология работоспособна и может быть востребована в оперативной практике.

Список литературы:

1. Rasmussen E., Turner J. Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions // Cambridge University Press. 2003. 612 p.
2. Яровая Д.А., Ефимов В.В. Климатологические особенности полярных мезомасштабных циклонов над восточным сектором евразийской Арктики по данным реанализа ASR. // Метеорология и Гидрология. 2022. № 4. С. 5-19.
3. Гурвич И.А., Заболотских Е.В. Мезомасштабные полярные циклоны над восточным сектором Арктики по данным мультисенсорного спутникового зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 101-112.
4. Смирнова Ю.Е., Голубкин П.А. Оценка доли полярных циклонов, воспроизводимых атмосферными реанализами, с использованием различных наборов данных // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 1 (111). С.97-108.
5. Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Дурнева Е.А. О критериях идентификации полярных мезоциклонов. // Метеорология и Гидрология. 2022. № 4. С. 20-33.
6. Никитин М.А., Ривин Г.С., Розинкина И.А., Чумаков М.М. Идентификация полярных циклонов над акваторией Карского моря с помощью гидродинамического моделирования. // Вести газовой науки. 2015. № 2 (22). С. 106-112.
7. Kristiansen J., Sørland S., Iversen T., Bjørge D., Køltzow M. High resolution ensemble prediction of a polar low development // Tellus A. 2011. Vol. 63. P. 585-604.
8. Мингалев И.В., Орлов К.Г., Мингалев В.С. Механизм формирования полярных циклонов и возможность их предсказания по данным спутниковых наблюдений // Космические исследования. 2012. Т. 50. № 2. С. 166-175.
9. Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г. О вихревых критериях прогнозирования полярных мезоциклонов // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России». Иркутск, 24-26 ноября 2021 г.: Изд. ИГУ, 2021. ISBN 978-5-9624-2009-7. С. 266-274.

10. Гончаров Р.И., Караваев Д.М., Колесов Б.Г., Лебедев А.Б. Классификация Арктических мезовихрей // Материалы VI Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». Санкт-Петербург. 16–18 сентября 2020 г.: Изд. ВКА имени А.Ф. Можайского, 2020. ISBN 978-5-6042484-7-8. С. 159-164.
11. Ефимов В.В., Яровая Д.А., Комаровская О.И. Мезомасштабный полярный циклон по спутниковым данным и результатам численного моделирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. №. 1. С. 223-233.
12. Петриченко С. А., Калмыкова О. В., Козлов С. В. Кулижникова Л.К. Прототип автоматизированной системы прогноза возникновения полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России // Материалы IV Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова («Опасные явления – IV»). Ростов-на-Дону. 5–9 сентября 2022 г.: Изд. ЮНЦ РАН., 2022. ISBN 978-5-4358-0239-9. ISBN 978-5-4358-0194-1. С. 155-160.

References:

1. Rasmussen E., Turner J. Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. Cambridge University Press, 2003, 612 p.
2. Yarovaya D.A., Efimov V.V. Climatological features of polar mesomassive cyclones over the eastern sector of the Eurasian Arctic according to ASR reanalysis. Meteorology and Hydrology, 2022, no. 4, pp. 5-19. (In Russian).
3. Gurvich I.A., Zabolotskikh E.V. Mesoscale polar cyclones over the eastern sector of the Arctic according to multisensory satellite sensing data. Modern problems of remote sensing of the Earth from space, 2015, vol. 12, no. 3, pp. 101-112. (In Russian).
4. Smirnova Yu.E., Golubkin P.A. Estimation of the proportion of polar cyclones reproduced by atmospheric reanalysis using various data sets. Problems of the Arctic and Antarctic, 2017, no.1 (111), pp. 97-108. (In Russian).
5. Vazaeva N.V., Chkhetiani O.G., Durneva E.A. On the criteria for the identification of polar mesocyclones. Meteorology and Hydrology, 2022, no. 4., pp. 20-33. (In Russian).
6. Nikitin M.A., Rivin G.S., Rozinkina I.A., Chumakov M.M. Identification of polar cyclones over the Kara Sea using hydrodynamic modeling. News of gas science, 2015, no. 2 (22), pp. 106-112. (In Russian).
7. Kristiansen J., Sørland S., Iversen T., Bjørge D., Køltzow M. High resolution ensemble prediction of a polar low development. Tellus A., 2011, vol. 63, pp. 585-604.
8. Mingalev I.V., Orlov K.G., Mingalev V.S. The mechanism of formation of polar cyclones and the possibility of their prediction based on satellite observations, Space research, 2012, vol. 50., no. 2., pp. 166-175. (In Russian).
9. Vazaeva N.V., Chkhetiani O.G. On vortex criteria for forecasting polar mesocyclones // Materials of the IV All-Russian scientific and practical conference «Modern trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia». Irkutsk, November 24-26, 2021, IGU Publ., 2021. ISBN 978-5-9624-2009-7, pp. 266-274. (In Russian).
10. Goncharov R.I., Karavaev D.M., Kolesov B.G., Lebedev A.B. Classification of Arctic mesovirls // Materials of the VI All-Russian scientific conference «Problems of military-applied geophysics and control of the state of the natural environment». Saint Petersburg, September 16-18, 2020, Publishing House of the A.F. Mozhaisky VKA, 2020. ISBN 978-5-6042484-7-8, pp. 159-164. (In Russian).
11. Efimov V.V., Yarovaya D.A., Komarovskaya O.I. Mesoscale polar cyclone based on satellite data and numerical simulation results. Modern problems of remote sensing of the Earth from space, 2020, vol. 17, no. 1, pp. 223-233. (In Russian).
12. Petrichenko S. A., Kalmykova O. V., Kozlov S. V. Kulizhnikova L.K. Prototype of an automated system for predicting the occurrence of polar mesocyclones in the Arctic region of Russia // Materials of the IV International Scientific Conference in memory of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences D.G. Matishov («Dangerous phenomena - IV»). Rostov-on-Don, September 5-9, 2022. Publishing House of the UNC RAS, 2022. ISBN 978-5-4358-0239-9, ISBN 978-5-4358-0194-1, pp. 155-160. (In Russian).