



Двадцать вторая международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"



11 - 15 ноября 2024 г.

Прототип автоматизированной технологической линии прогноза зарождения и перемещения полярных мезоциклонов для Арктического региона России

С.А. Петриченко, к.ф.-м.н. (psa@rpatyphoon.ru),

О.В. Калмыкова, к.ф.-м.н. (kov@feerc.ru),

С.В. Козлов (kozlov-sv@rpatyphoon.ru),

Л.К. Кулижникова (kulijnik@yandex.ru)

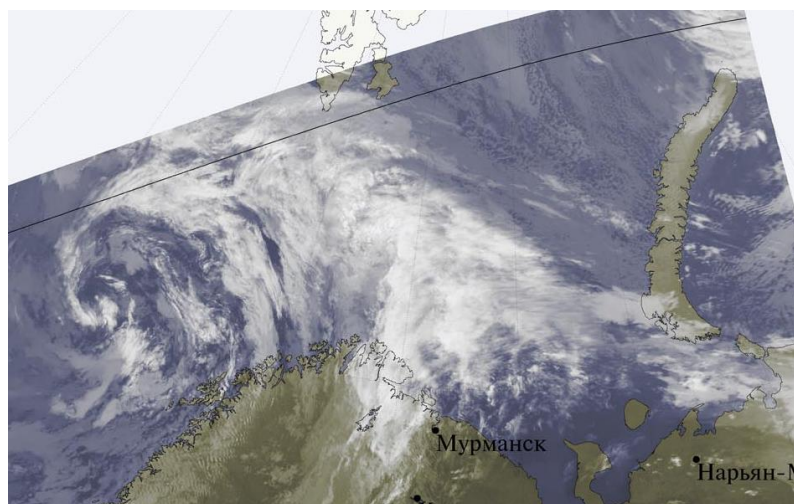
Научно-производственное объединение "Тайфун" Росгидромета, г. Обнинск

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.

Под это определение попадает очень широкий спектр циклонических образований. От орографических вихрей до небольших фронтальных циклонов на арктическом фронте.

27-08-2022, 16:23



Общая информация

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 [*Яровая Д.А., Ефимов В.В. 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.

Идентификация 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 [*Гурвич И.А., Заболотских Е.В. 2015, Смирнова Ю.Е., Голубкин П.А. 2017*]. 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 [*Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г. 2021, Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г, Дурнева Е.А. 2022*] разрабатываются критерии, позволяющие идентифицировать и исследовать генезис ПМЦ. В работе [*Никитин М.А. и др. 2015*] реалистично воспроизведены динамика и эволюция полярного циклона и постфактум даны прогнозы его перемещения.

Основные положения методики прогноза ПМЦ

Прогноз зарождения и перемещения ПМЦ до настоящего времени остается актуальной проблемой, с которой связаны многочисленные исследования. И сложности могут быть обусловлены, по нашему мнению, существованием различных механизмов их образования. Основные, по современной классификации, это бароклинные и конвективные типы мезоциклонов [*Гончаров Р.И. и др. 2020, Ефимов В.В., Яровая Д.А., Комаровская О.И. 2020*].

Нами было предложено использовать для прогноза ПМЦ индексы конвективной неустойчивости, расчет которых ведется по выходным данным численного моделирования атмосферы. Поля разных 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. Суперпозиции их полей, по нашему мнению, дают возможность вероятностного прогнозирования обнаружения ПМЦ. [*Петриченко С.А. и др. 2023, 2023*]

Основные положения методики прогноза ПМЦ

В ходе работы были проанализированы поля около 100 известных индексов конвективной неустойчивости, относящиеся к моментам обнаружения ПМЦ.

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 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.

На рисунке 1 представлено спутниковое изображение акватории Баренцева моря с полярным мезоциклоном, а на рисунке 2 - пространственное распределение относительной штормовой спиральности ($srh3$), которая используется, как один из предикторов, рассчитанное для этой же акватории на тот же срок. Сравнение этих рисунков указывает на наличие зоны в поле $srh3$, совпадающей по местоположению и времени с временем и районом развития ПМЦ.

Основные положения методики прогноза ПМЦ

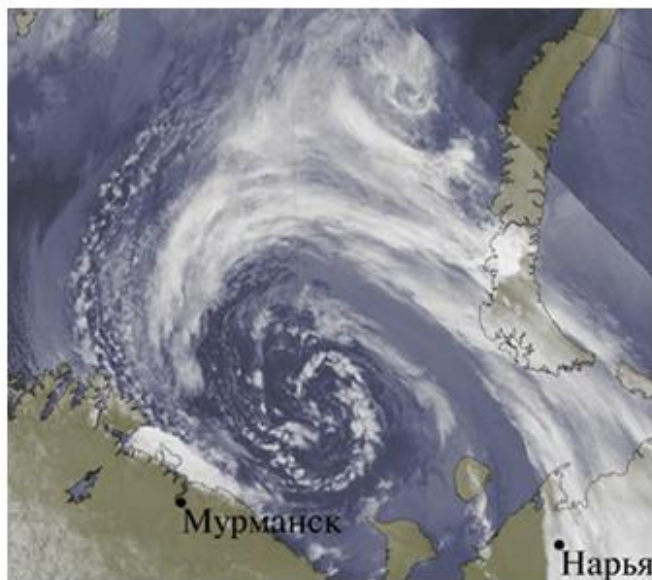


Рисунок 1 – Полярный мезоциклон 15 февраля 2022 года над акваторией Баренцева моря. ИК-изображение, полученное в 7:45 UTC

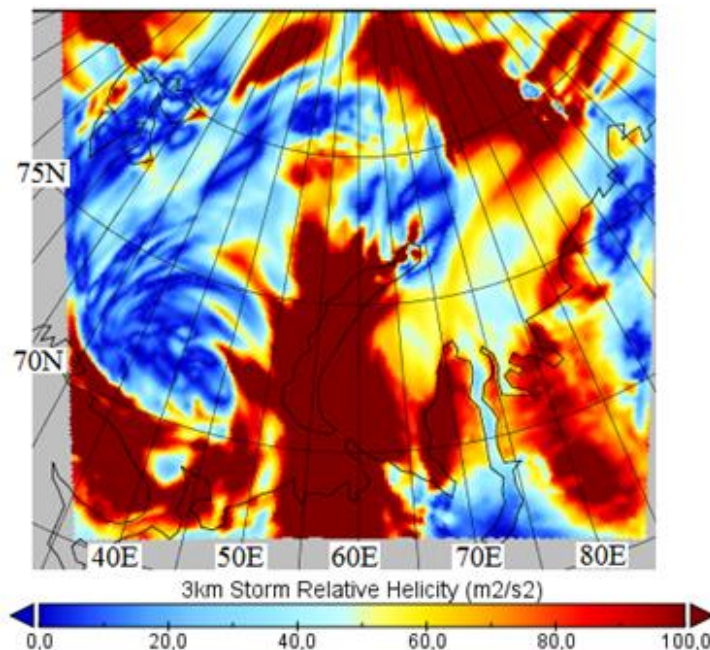


Рисунок 2 – Поле конвективного индекса Storm Relative Helicity ($srh3$) в районе развития полярного мезоциклона 15 февраля 2022 года в 8 ч UTC над Баренцевым морем

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 $> 5 \text{ м/с}$.

Основные положения методики прогноза ПМЦ

В настоящий момент в качестве основной рабочей конфигурации индексов для расчета поля вероятности обнаружения ПМЦ выбрана конфигурация из восьми динамических конвективных индексов, связанных с завихренностью, спиральностью и сдвигом ветра. Перечень этих индексов, со значениями используемых пороговых значений приведен в таблице 1.

*Таблица 1
Рабочая таблица индексов*

Обозначение индекса	Описание индекса	Общепринятый порог	Используемый порог
brns	Bulk Richardson Number Shear	>25	<25
dws1	Surface-1km Wind Speed Difference		<5
s1vs	Surface-1km Vertical Shear	>8	<5
srh3	3km Storm Relative Helicity	>150	<50
mvert1	Mean Surface-1km Vorticity		>0.0001
mvert2	Mean Surface-2km Vorticity		>0.0001
mvert3	Mean Surface-3km Vorticity		>0.0001
vrt	Vorticity		>0.00009

В этом комплекте используются четыре, коррелирующие между собой индекса, связанных с завихренностью (“Vorticity”). Фактически это означает, что завихренность имеет наибольший вес при определении возможного места обнаружения ПМЦ и таким образом ей придан соответствующий весовой коэффициент.

Для расчета индексов используются полученные по результатам моделирования средствами PWRP выходные поля стандартных метеозаписей (температура, давление, влажность, скорость ветра и др.)

Основные положения методики прогноза ПМЦ

Выбор схем параметризации подсеточных процессов в модели PWRP производился исходя из известного опыта работ других авторов, связанных с моделированием условий возникновения ПМЦ. Используемые в данной работе схемы параметризации PWRP, приведены в таблице 2.

*Таблица 2
Параметризация подсеточных процессов в модели PWRP*

Параметр	Используемое значение
микрофизика (mp_physics)	Goddard scheme
длинноволновая радиация (ra_lw_physics)	CAM Shortwave and Longwave schemes
коротковолновая радиация (ra_sw_physics)	
поверхность (sf_surface_physics)	Unified Noah Land Surface Model
приземный слой (sf_sfclay_physics)	Monin-Obukhov (Janjic Eta) scheme
пограничный слой (bl_pbl_physics)	Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) scheme
кучевая облачность (cu_physics)	Kain-Fritschs scheme

При расчете вероятности формирования ПМЦ используется предположение о том, что чем больше индексов идентифицировали закритическую область, тем больше вероятность того, что в этой области может быть обнаружен ПМЦ. Карты риска образования ПМЦ для удобства анализа формируются как с использованием градиентной шкалы, так и в цветовой шкале по типу “светофора” для описания трех уровней опасности: зеленый уровень – вероятность образования ПМЦ в диапазоне 0–50 %, желтый уровень – от 50 до 80 %, красный уровень – больше 80 %.

Технологическая линия прогноза ПМЦ

На основе полученных результатов был разработан программный комплекс, позволяющий в автоматическом режиме формировать вероятностные прогностические карты угроз возникновения и перемещения ПМЦ.

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

- а) пакет программ запуска расчетов по расписанию;
- б) численную модель PolarWRF-ARW 4.1.5 (PWRF) с выбранными настройками и параметризациями подсеточных процессов;
- в) программный модуль для расчета полей индексов конвективной неустойчивости;
- г) программный модуль для расчета полей вероятности образования ПМЦ на основе отобранной конфигурации индексов, для каждого из которых определено свое региональное пороговое значение;
- д) программный модуль построения карт областей риска образования ПМЦ;
- е) программный модуль для расчета центров областей с заданной вероятностью риска обнаружения ПМЦ;
- ж) программный модуль для построения траекторий перемещения центров областей с заданной вероятностью риска обнаружения 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, 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.

На Расчетном сервере с установленной системой PWRP 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 PWRP с последующей обработкой ее выходной продукции.

В процессе расчета по модели PWRP формируются выходные файлы, содержащие прогностические данные по стандартным метеоэлементам (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.

Схема работы технологической линии

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 закрытую область, тем больше вероятность того, что в этой области может быть обнаружен ПМЦ.

Далее реализуется алгоритм отслеживания перемещения областей существования возмущений. В выделенных зонах с 80% вероятностью возникновения ПМЦ на комплексной пространственной картине рассчитываются геометрические центры масс предполагаемых ПМЦ.

Центры масс, отнесенные к одному ПМЦ, в порядке их расчета соединяются прямой линией. Таким образом, формируется прогностическая траектория перемещения рассматриваемого ПМЦ.

На заключительном этапе работы осуществляется построение карт с прогностическими траекториями перемещения центров областей с заданной вероятностью обнаружения ПМЦ.

Расчеты

Моделирование проводится один раз в сутки, заблаговременность прогноза – до 48 часов. По результатам моделирования формируются выходные поля стандартных метеоэлементов 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 $0,5^\circ$ (счет от 00ч UTC). На рис. 3 представлена область интегрирования, а в табл. 3 даны сведения об используемых настройках модели PWRF.

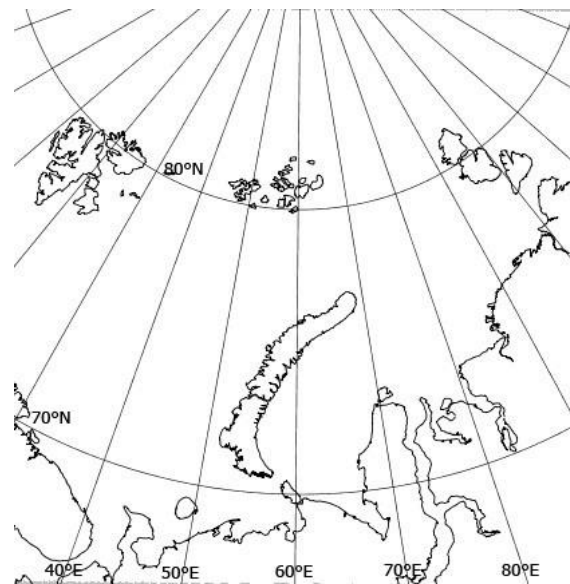


Рис. 3

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

Табл. 3

Карты риска образования ПМЦ

Разработанная технология позволяет формировать карты риска образования ПМЦ в двух цветовых шкалах.

Градиентная шкала

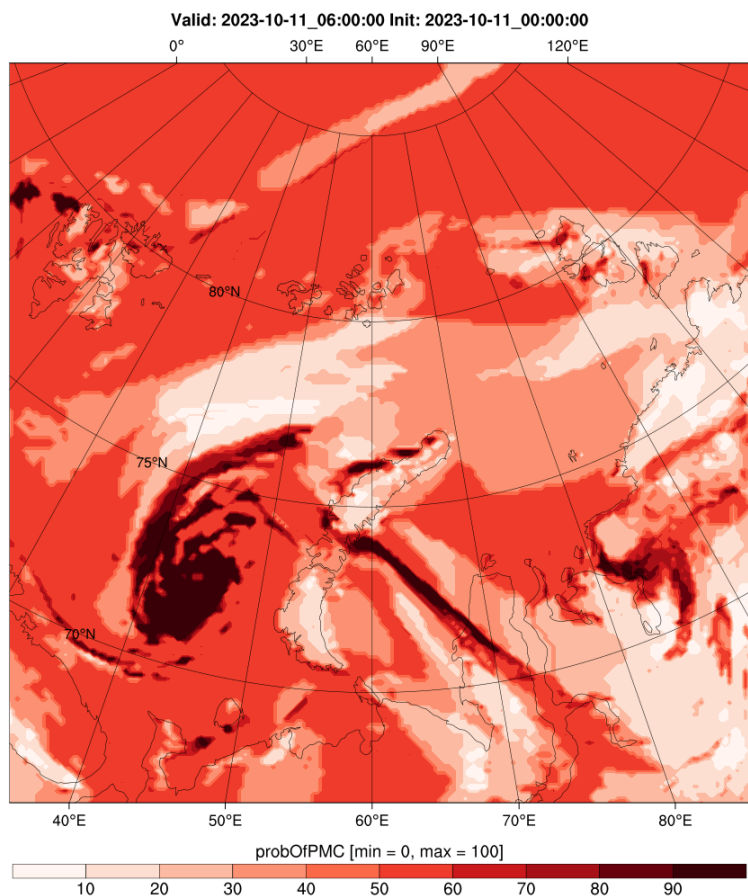


Рисунок 4

Шкала «светофор»

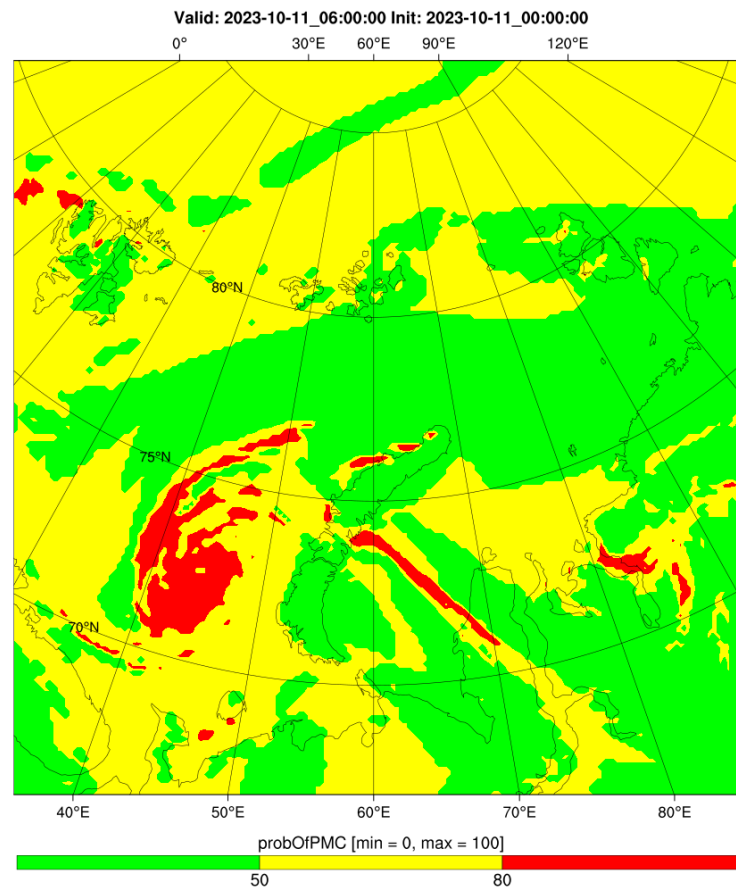


Рисунок 5

Прогноз траектории перемещения ПМЦ

Для построения траектории перемещения прогнозируемых ПМЦ был разработан алгоритм расчета центра мезоциклона.

В выделенных зонах с 80% вероятностью возникновения ПМЦ на комплексной пространственной картине, как уже отмечалось выше, рассчитываются геометрические центры масс предполагаемых ПМЦ. Расчеты проводятся для каждого момента времени исходного прогноза (в данном случае – каждый час).

Размер выделяемой зоны – не менее 80 км.

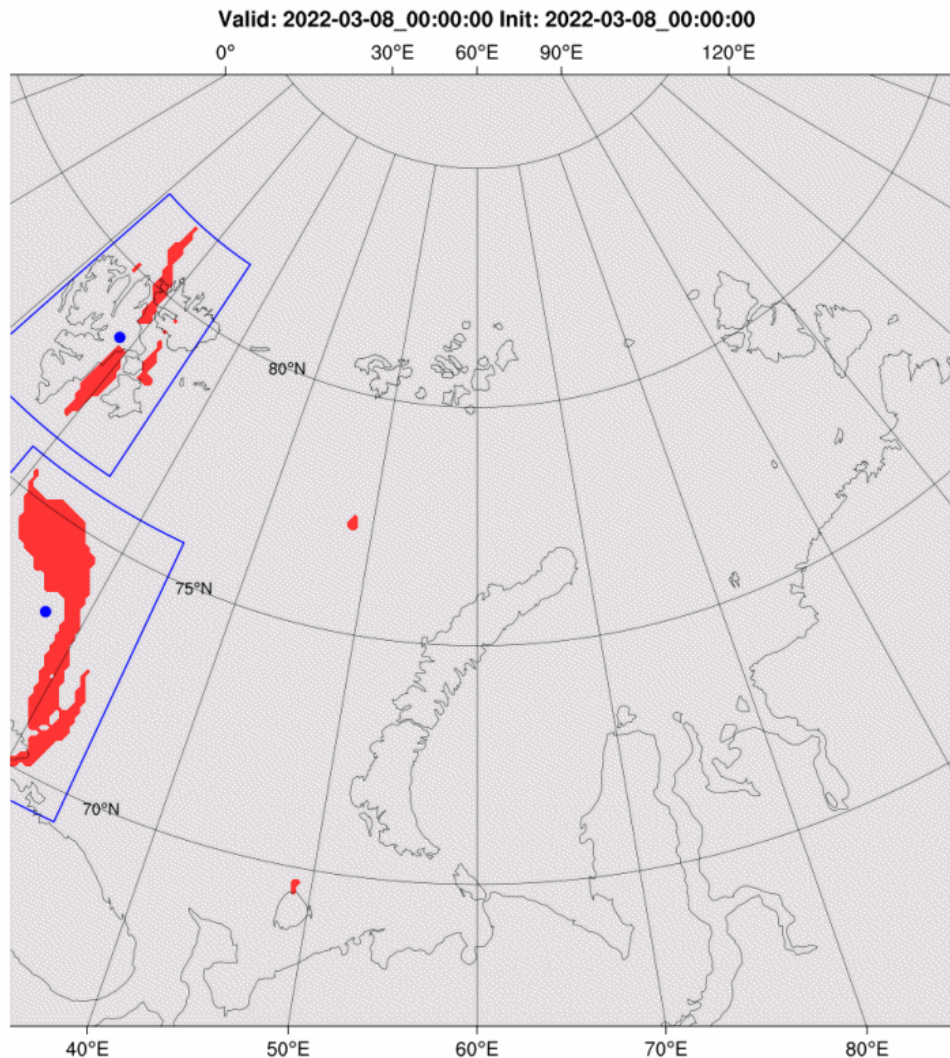


Рисунок 6

Прогноз траектории перемещения ПМЦ

По результатам сопоставления центров масс, рассчитанных за последовательные моменты времени, производится их группировка по принадлежности к одному и тому же ПМЦ.

Для этого задается максимально допустимое расстояние между центрами на последовательных по времени прогнозах, позволяющее рассматривать центры, отдаленные друг от друга на расстоянии меньшее заданного, как центры одного и того же перемещающегося ПМЦ. Максимальное расстояние между центрами ПМЦ в последовательные моменты времени было установлено в размере 80 км. Также была определена минимальная длина траектории (период существования) предполагаемого ПМЦ. Те ПМЦ (как правило, случайные и кратковременные всплески в «красной» зоне), для которых длина построенной траектории меньше заданного порога исключаются из рассмотрения. Минимальный период существования был установлен в размере 8 часов. Случаи, для которых максимальная скорость приземного ветра на периферии ПМЦ на всей длине траектории не превышает 10 м/с также исключаются из рассмотрения. Эти условия позволяют значительно сократить количество ложно идентифицируемых мезовихрей.

Прогноз траектории перемещения ПМЦ

Центры масс, отнесенные к одному ПМЦ, удовлетворяющие всем приведенным выше требованиям, в порядке их расчета соединяются отрезками прямой линии. Таким образом, формируются траектории перемещения прогнозируемых ПМЦ.

На рисунках 7 и 8 примеры карт с рассчитанными траекториями.

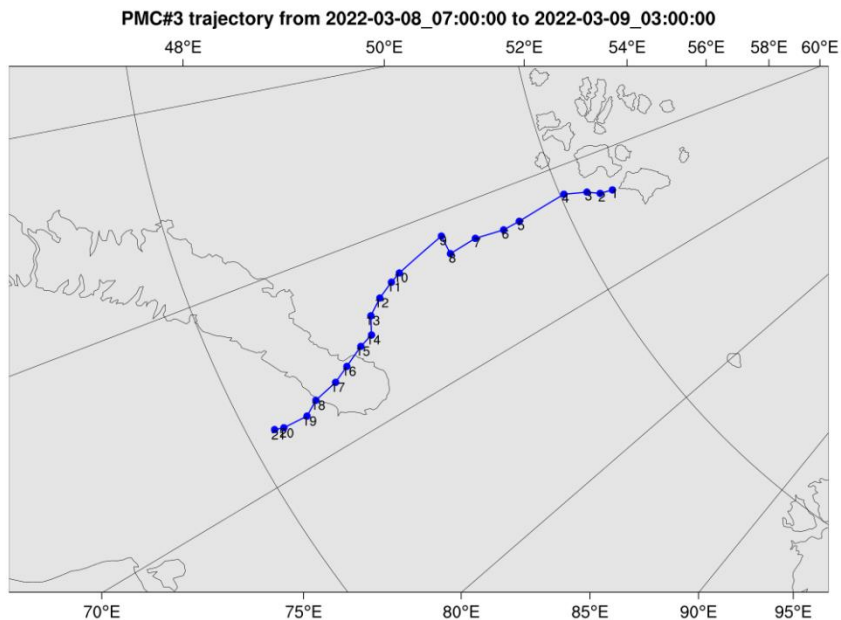


Рисунок 7

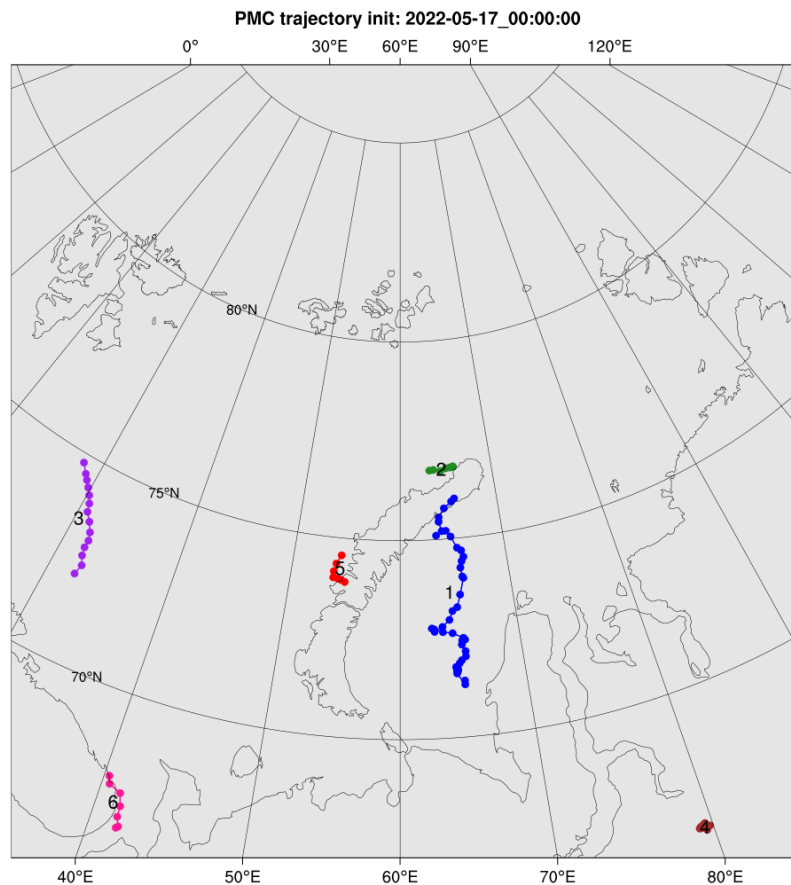


Рисунок 8

Примеры расчетов для ПМЦ.

Верификация прогнозов проводилась при помощи спутниковых изображений, публикуемых на сайтах ФГБУ «НИЦ «Планета» (<http://planet.rssi.ru>) и Метео-Сибирь (<https://geosib.rcpod.ru>). При выявлении на спутниковом снимке ПМЦ в том месте и в то время, которые даны в прогнозе, считается, что прогноз для рассматриваемой траектории оправдался.

На рисунке 9 представлены две группы по три последовательных спутниковых изображения районов Баренцева и Карского морей с явно выраженным полярным мезоциклоном (снимки с сайта НИЦ “Планета”) за 13 (верхние снимки) и 14 (нижние снимки) августа 2023 года. Необходимо отметить, что изображения в каждой из групп были получены в утренние часы. И между этими группами существовал большой временной интервал. То, что эти группы относятся к одному циклону было подтверждено результатами моделирования.

На рисунке 10 представлены последовательные прогностические карты областей риска образования ПМЦ в режиме «светофор», включающие сроки, представленные на рисунке 9.

На рисунке 11 – последовательные прогностические поля модуля приземного ветра для той же ситуации.

На рисунке 12 представлены для сравнения последовательные прогностические карты областей риска образования ПМЦ в режиме «цветовой градации».

На рисунке 13 – прогностическая траектория перемещения рассматриваемого мезоциклона.

ПМЦ 13-14 августа 2023 г. в Баренцевом море с переходом в Карском море через остров Новая Земля

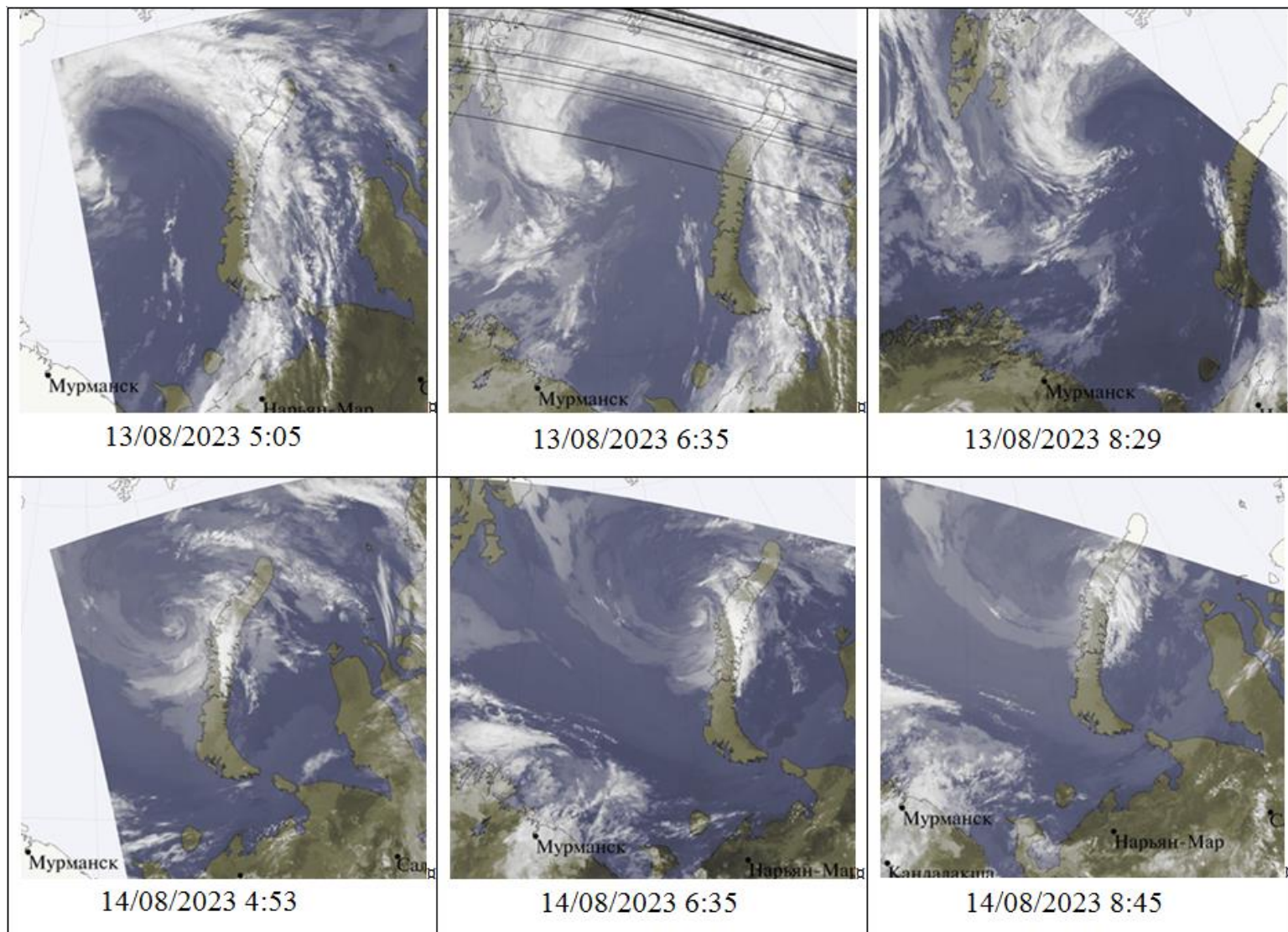


Рисунок 9

Прогноз ПМЦ 13-14 августа 2023 г.

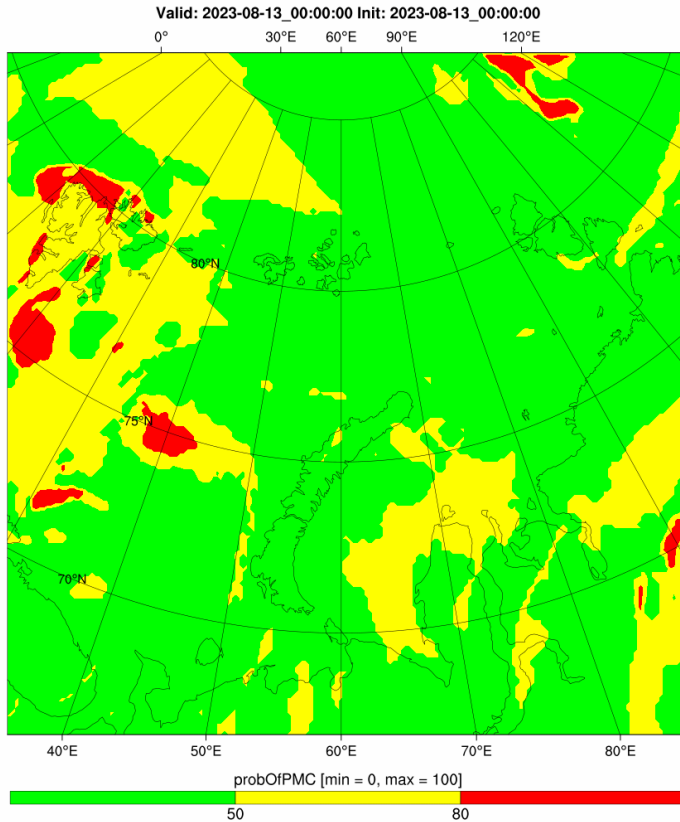


Рисунок 10. Прогностические карты от 00 ч UTC 13.08.23 г. областей риска образования ПМЦ за период с 00 UTC 13.08.23 г. до 00 UTC 15.08.23 г. с интервалом в 1 ч в режиме «светофор»

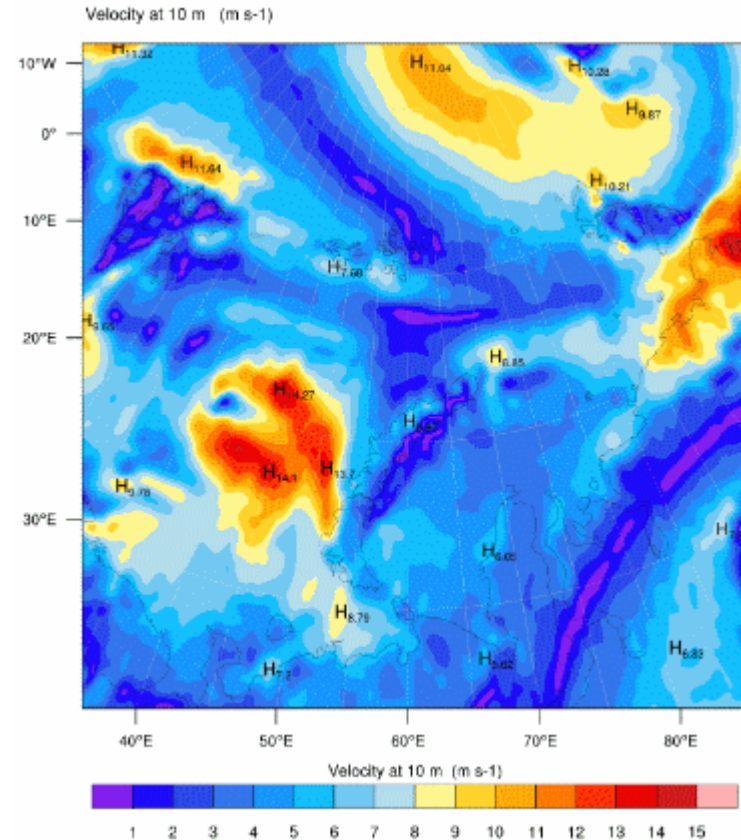


Рисунок 11. Прогностические поля модуля скорости ветра от 00 ч UTC 13.08.23 г. за период с 00 UTC 13.08.23 г. до 00 UTC 15.08.23 г. с интервалом в 1 ч

Прогноз ПМЦ 13-14 августа 2023 г.

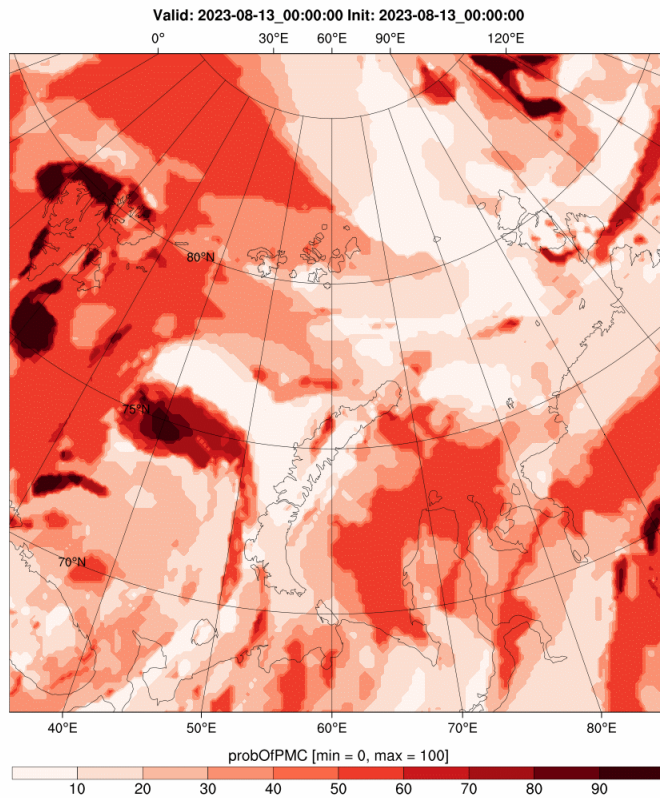


Рисунок 12. Прогностические карты от 00 ч UTC 13.08.23 г. областей риска образования ПМЦ за период с 00 UTC 13.08.23 г. до 00 UTC 15.08.23 г. с интервалом в 1 ч в режиме цветовой градации

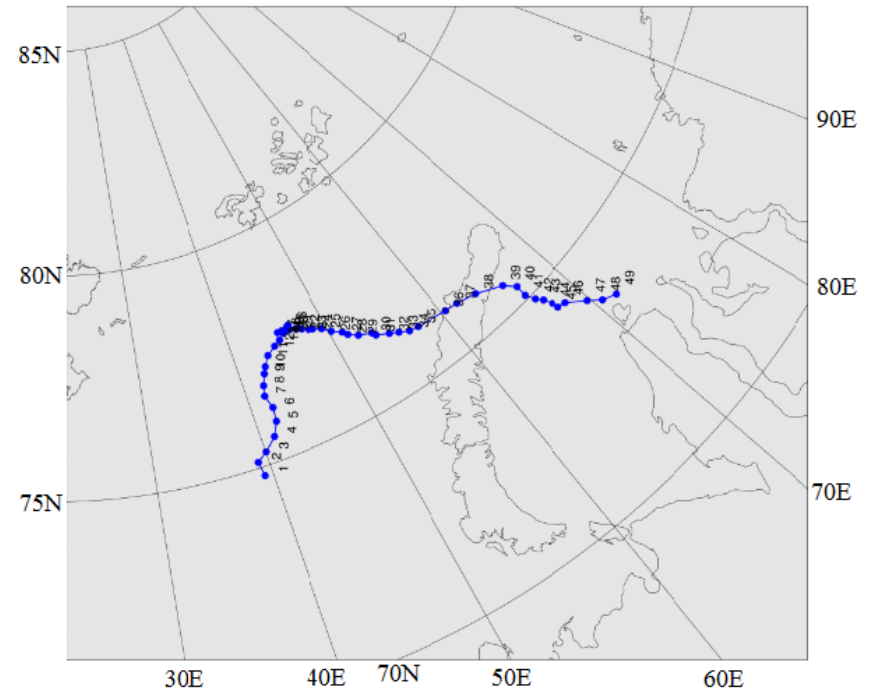


Рисунок 13. Прогностическая траектория перемещения ПМЦ от 00 ч UTC 13.08.23 г. с 00 ч UTC 13.08.23 г. до 00 ч UTC 15.08.23 г.

Оценка качества прогноза

В 2023 году были проведены авторские испытания всей разработанной технологической линии построения прогнозов возникновения и перемещения полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России. В ходе этих испытаний осуществлялись ежедневные прогностические расчеты на 48 часов возможного зарождения и перемещения ПМЦ в пределах выделенной акватории, выбранной в качестве испытательного полигона. Параллельно анализировались космические изображения, публикуемые на сайте ФГБУ «НИЦ космической гидрометеорологии «Планета». Также для идентификации ПМЦ использовались обработанные спутниковые изображения с сайта Метео-Сибирь (<https://geosib.rcpod.ru/>), полученные со спутника Арктика-М №1.

По результатам авторских испытаний были получены предварительные оценки общей оправдываемости прогноза ПМЦ, величина которой составила около **70%**.

После авторских испытаний была проведена дополнительная корректировка параметров работы технологии и определен порядок проведения дальнейших независимых испытаний при участии специалистов Арктического и Антарктического научно-исследовательского института Росгидромета (ААНИИ).

По согласованию с ААНИИ испытания проходили в три этапа: с 01.04.2024 г. по 15.05.2024 г., с 01.07.2024 г. по 15.08.2024 г. и с 01.10.2024 г. по 15.11.2024 г. Результаты прогностических расчетов выкладывались на ежедневной основе на FTP-сервере НПО «Тайфун». Верификация прогнозов производилась на базе спутниковых изображений с сайта Метео-Сибирь (Арктика-М №1 и №2), оценки качества прогнозов фиксировались в специальном журнале. По результатам трех этапов проведенных независимых испытаний общая оправдываемость прогноза оценивается в 75%, доля ложных прогнозов – 5%, пропуск ПМЦ – 19% и 1% составили неверифицируемые прогнозы, из-за отсутствия на это время спутниковых данных. Очевидно, что пока основной проблемой требующей решения является снижение числа пропусков ПМЦ (повышение предупрежденности ПМЦ).

В дальнейшем предполагается продолжить работу по совершенствованию разработанной технологии прогноза ПМЦ. В частности планируется повысить качество прогноза за счет непосредственного усвоения спутниковой информации в блоке расчета метеопараметров.

Ссылки

1. *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.
2. *Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Дурнева Е.А.* О критериях идентификации полярных мезоциклонов. / *Метеорология и Гидрология*. – 2022. – № 4. – С. 20-33.
3. *Гончаров Р.И., Караваяев 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.
4. *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
5. *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.
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. *Петриченко С. А., Калмыкова О. В., Козлов С. В., Кулижникова Л.К.* Прогноз зарождения полярных мезоциклонов на основе индексов конвективной неустойчивости с региональными пороговыми значениями и построение прогностических траекторий их перемещения / Материалы V Всероссийской научно-практической конференции "Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России". Иркутск. 23-25 ноября 2022 г. - Изд. ИГУ. - 2023. - ISBN 978-5-9624-2119-3. - С. 258-267.
8. *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. – DOI: 10.24412/2658-4255- 2023-2-54-64. – EDN: EAJGFJ
9. *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.
10. *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.
11. *Rasmussen E., Turner J.* Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions / Cambridge University Press, 2003. – 612p.

Спасибо за внимание