

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-1-69-101>

УДК 551.515.6

## **Оценка чувствительности модели ICON-Ru к изменениям площади морского льда и температуры поверхности океана при прогнозе образования и развития полярных мезоциклонов**

***М.А. Никитин<sup>1</sup>, А.П. Ревокатова<sup>1,2</sup>, И.Р. Ломакин<sup>1,3</sup>,  
И.А. Розинкина<sup>1</sup>, Г.С. Ривин<sup>1</sup>***

*<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*<sup>2</sup>Институт глобального климата и экологии имени Ю.А. Израэля, г. Москва, Россия;*

*<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
географический факультет, г. Москва, Россия  
revokatova@gmail.com, Arhin@yandex.ru, ilja.lomakin2@yandex.ru*

Изучена чувствительность конфигурации ICON-Ru модели ICON (ICOsahedral Nonhydrostatic) с шагом 2,0 км к изменениям площади морского льда и температуры поверхности океана при прогнозировании образования и развития полярных мезоциклонов. Представлены результаты численных экспериментов для Норвежского и Баренцева морей для холодного периода 2022–2024 гг. на примере анализа жизненных циклов нескольких циклонов. Показано, что уменьшение площади морского льда и повышение температуры воды в арктических морях может повысить интенсивность полярных мезоциклонов.

*Ключевые слова:* полярные мезоциклоны, морской лед, баротропная неустойчивость, конвективная неустойчивость, численный детализированный прогноз погоды, модель ICON

## **Evaluation of the ICON-Ru model sensitivity to the changes in the sea ice extent and sea surface temperature in forecasting the formation and development of polar lows**

***M.A. Nikitin<sup>1</sup>, A.P. Revokatova<sup>1,2</sup>, I.R. Lomakin<sup>1,3</sup>,  
I.A. Rozinkina<sup>1</sup>, G.S. Rivin<sup>1</sup>***

*<sup>1</sup>Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;*

*<sup>2</sup>Yu.A. Israel Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia;*

*<sup>3</sup>Moscow State Lomonosov University, Geographical Faculty, Moscow, Russia  
revokatova@gmail.com, Arhin@yandex.ru, ilja.lomakin2@yandex.ru*

The paper deals with studying the sensitivity of the ICON-Ru model with a grid spacing of 2.0 km to changes in the sea ice extent and sea surface temperature when forecasting the formation and development of polar lows (PLs). The results of numerical experiments for the Norwegian and Barents seas for the cold season of 2022–2024 are presented by the example of analyzing the life cycles of several PLs. It is shown that decreasing sea ice extent and increasing water temperatures in the Arctic seas can increase the intensity of PLs.

*Keywords:* polar lows, sea ice, barotropic instability, convective instability, detailed numerical weather prediction, ICON model

## Введение

Короткое время жизни полярных мезоциклонов (ПМЦ), их малые размеры в совокупности с практически полным отсутствием наземных метеорологических наблюдений над арктическими морями создают трудности при их прогнозировании, которые нередко являются причиной экстремальных погодных явлений (снегопадов с низкой видимостью, штормового ветра), морских штормов и обледенения судов. Развитие и перемещение ПМЦ по арктическим морям может оказывать серьезное влияние на устойчивое функционирование Северного морского пути. Прогноз даже на ближайшие часы этих формирований представляется затруднительным при экстремально малом количестве наземных наблюдений в арктическом регионе, при этом численное негидростатическое моделирование несет в себе значимый потенциал повышения предсказуемости этих синоптических объектов. Практическая возможность реализовать такой прогноз при помощи конфигурации ICON-Ru модели ICON (ICOsahedral Nonhydrostatic) [22] консорциума COSMO (COnsortium for Small-scale MODeLLing) (<http://www.cosmo-model.org>) была показана ранее [16]. Данная статья посвящена дальнейшему изучению чувствительности конфигурации ICON-Ru с шагом 2,0 км к изменениям в структуре поля морского льда и температуры поверхности океана (ТПО) и их влияния на образование и развитие ПМЦ.

Среди механизмов образования полярных мезоциклонов над морской поверхностью обычно описываются три фактора: бароклинная неустойчивость, конвективная неустойчивость и баротропная неустойчивость. При этом роль разных факторов в формировании ПМЦ различается в зависимости от региона и других сопутствующих условий (например, наличие холодной высотной ложбины на высоте 500 гПа, близость струйного течения, циклоническая завихренность крупномасштабного потока). Свойства подстилающей поверхности, в первую очередь распределение морского льда и температура поверхности океана, во многом определяют условия формирования ПМЦ [5, 17]. Влияние того или иного фактора на образование ПМЦ можно отследить с использованием численного моделирования. Авторы работы [4], где разбирается подробно случай возникновения ПМЦ над Баренцевым морем, проводили три численных эксперимента: контрольный, с убраным в районе Шпицбергена льдом и с повышением температуры поверхности моря на 5 К (от 68° до 84° с. ш., от 18° до 50° в. д.). Анализ результатов этих экспериментов позволил сделать вывод о том, что факт формирования данного ПМЦ был обусловлен бароклинной неустойчивостью, в то время как конвективная неустойчивость была важна во время его развития.

Похожее исследование было проведено и для Гудзонова залива [5]. В одном из экспериментов температура поверхности океана была увеличена на 8 К, что привело к усилению скорости ветра в ПМЦ до ураганных значений. Роль баротропной неустойчивости в развитии ПМЦ также была предметом ряда исследований второй половины XX века [8, 12]. В последние годы были продолжены исследования влияния орографии и распределения морского льда на образование ПМЦ в Норвежском и Баренцевом морях [20]. Эти эксперименты показали, что ПМЦ в северо-восточной части Атлантического океана могут выдерживать большие изменения в маске «суша – море» (такие как «удаление» Шпицбергена). Таким образом, согласно результатам работы [20], орография Шпицбергена и окружающий его морской лед влияют на ПМЦ в Норвежском море, но они модулируют, а не являются доминирующим фактором возникновения ПМЦ.

Ранее с использованием модели COSMO-Ru уже проводились исследования влияния пространственно-временных вариаций температуры поверхности моря и параметров морского льда на эволюцию полярных циклонов [2, 3]. Также было показано, что мезомасштабные системы прогноза погоды COSMO-Ru (с шагами сетки 6,6 и 13,2 км) и ICON-Ru (с шагом сетки 6,6 км) способны предсказывать возникновение и эволюцию полярных циклонов, их стадии развития и траектории, а также успешно воспроизводить такие опасные погодные явления, как сильные осадки и порывистый ветер на масштабе времени до двух суток [16]. Результаты этих работ показали, что системы прогноза высокой детализации COSMO-Ru [6] и ICON-Ru [22] могут выступать как инструментом исследования свойств и механизмов зарождения полярных циклонов, так и средством их прогноза. В 2015 году консорциум COSMO перешел на модель ICON в качестве средства оперативного численного прогноза. Первое сравнение способностей двух моделей – COSMO-Ru и ICON-Ru – воспроизводить полярные мезоциклоны было приведено в [16]. Там было показано, что ICON позволяет более детально воспроизводить как положение самого циклона, так и метеопараметры в нём.

Целью настоящей работы является дальнейшее изучение возможностей модели ICON с шагом сетки 2,0 км для прогноза и изучения ПМЦ, в частности, подбор оптимальных конфигураций для Арктического региона, учитывающих состояние океана и морского ледяного покрова. Мы ставили перед собой следующие задачи: выявить наиболее интересные и разнообразные по своему генезису случаи ПМЦ за холодные периоды 2022–2024 гг., для каждого случая провести численные эксперименты при помощи ICON-Ru с шагом сетки 2 км, оценить чувствительность модели к изменению границы морского льда и повышению ТПО, выявить основные закономерности чувствительности модели к отсутствию льда в зависимости от природы образования ПМЦ, сделать выводы о целесообразности использования изменяющейся границы морского льда во время прогнозов ПМЦ с заблаговременностью 24–48 часов.

## 1. Методы

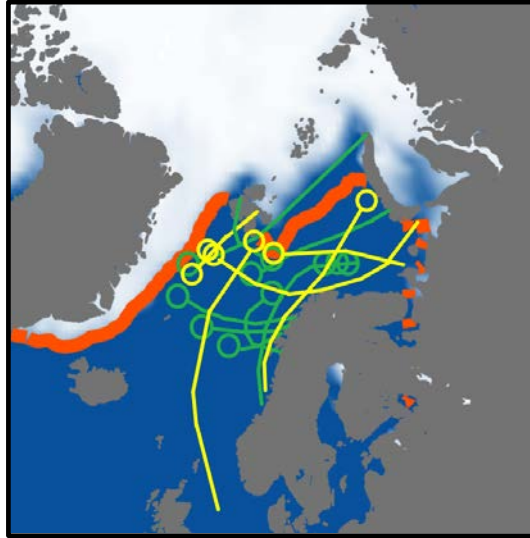
### 1.1. Исследуемая территория

Среди множества ПМЦ, возникающих по всему миру, наибольшее влияние на Россию оказывают вихри, образующиеся в Северной Атлантике, в Норвежском и Баренцевом морях. Известны также случаи образования ПМЦ над Карским морем, но они значительно более редкие, поскольку в течение всего холодного периода оно покрыто льдом. Максимум случаев возникновения приходится на Норвежское и Баренцево моря [18]. Кроме того, этот регион является наиболее исследованным [21]. ПМЦ могут влиять на морской транспорт, авиацию, условия работы на нефтяных и газовых месторождениях. Существует некоторое количество архивов ПМЦ, однако все они имеют существенную задержку по времени (от нескольких лет до десятилетий) [19]. Для отбора новых случаев возникновения ПМЦ требуется постоянный мониторинг спутниковых снимков (мы использовали архив *Antarctic Meteorological Research Center*, <https://amrc.ssec.wisc.edu/data/ftp/archive/>), прогнозов ветра над северными морями и предупреждений, которые выкладываются на сайте (<https://www.barentswatch.no/polarelavtrykk/>). На основании этих данных была составлена карта зарождения и перемещения основных ПМЦ за холодные сезоны 2022/2023 и 2023/2024 гг. (рис. 1). Видно, что основными регионами возникновения ПМЦ являются прибрежные районы к югу от Шпицбергена и области к востоку от Гренландии. В обеих областях в непосредственной близости располагается граница морского льда. Основными районами «затухания» ПМЦ являются север Скандинавского полуострова, Лофотенские острова, север Архангельской области, острова архипелага Новая Земля. Основное направление движения ПМЦ – с запада на восток, что определяется ведущим в этих широтах западным переносом, однако на картах отмечено несколько случаев образования ПМЦ над Баренцевым морем, при которых вихри начинали двигаться в западном направлении и достигали западных берегов Скандинавского полуострова.

### 1.2. Модель и выбор домена

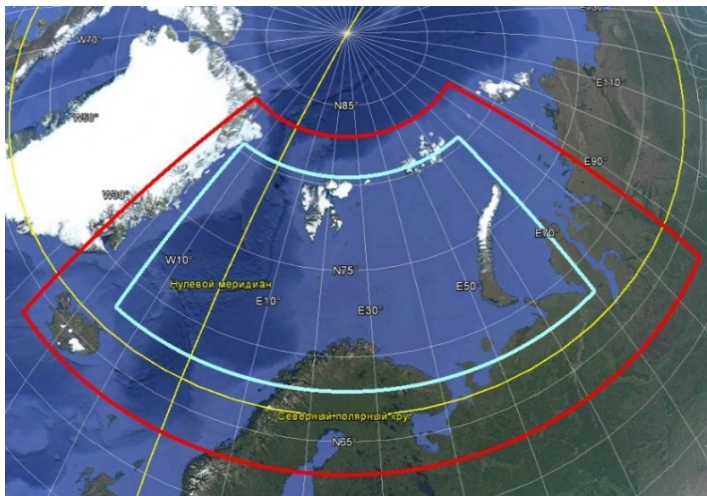
Для моделирования ПМЦ был выбран домен, который в дальнейшем будем именовать WestArctic. В этой конфигурации шаг сетки равняется 2,0 км, шаг по времени – 20 секунд, широтно-долготная область интегрирования располагается между 63° и 83° с. ш. и между 27° и 87° в. д. Таким образом, данная конфигурация охватывает акваторию Гренландского, Баренцева, а также часть Норвежского и Карского морей, что позволяет воспроизводить подавляющее большинство ПМЦ, наблюдавших в данном районе (рис. 2).

В качестве начальных и граничных условий для данного домена использовались результаты расчётов глобальной модели ICON-Ru (шаг сетки 13,2 км) с вложенным доменом N29.5 (шаг сетки 6,6 км, охватывает все территории к северу от 29,5° с. ш.).



**Рис. 1.** Карта траекторий ПМЦ за холодный период 2022/2023 (зеленые круги) и 2023/2024 гг. (желтые круги) на основе карты морского льда из архива National Snow and Ice Data Centre (<https://nsidc.org/home>) на дату 31.12.2023, оранжевая линия показывает среднюю многолетнюю границу льда за период 1981–2010 гг.

**Fig. 1.** Map of PLs trajectories for the cold period of 2022-2023 (green circles) and 2023-2024 (yellow circles) based on the sea ice map from the National Snow and Ice Data Centre archive (<https://nsidc.org/home>) on the date of 31.12.2023. The orange line shows the average multi-year ice boundary for 1981-2010.



**Рис. 2.** Конфигурация модели ICON-LAM WestArctic (зеленая) и область изменения характеристик льда и ТПО (голубая).

**Fig. 2.** Configuration of the ICON-LAM WestArctic model (red) and the region of ice and SST characteristics variation (blue).

В связи с прекращением в конце февраля 2022 года научно-технического сотрудничества между Гидрометцентром России и DWD (Deutscher Wetterdienst, Немецкая служба погоды), моделирование ПМЦ, наблюдавшихся во время холодного сезона 2022/2023 гг., оказалось невозможным. Однако с 30 июля 2023 г. был возобновлён выпуск прогнозов глобальной модели ICON-Ru в квазиоперативном режиме, что позволило возобновить численные эксперименты с ПМЦ, наблюдавшимися в холодный сезон 2023/2024 годов.

### 1.3. Конфигурации численных экспериментов

Одним из факторов, влияющих на возникновение и эволюцию ПМЦ, является состояние подстилающей поверхности: температура поверхности океана, доля льда, его толщина и температура. Численные эксперименты с параметрами льда позволяют понять, насколько велико это влияние и в чём именно оно проявляется.

Для того чтобы осуществить изменение этих параметров, была создана программа подготовки полей характеристик морского льда (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024680189). Она способна модифицировать (как увеличивать, так и уменьшать) все связанные со льдом и имеющиеся в начальных данных модели поля: температуру, высоту и долю льда в ячейке, а также температуру поверхности океана.

ПМЦ характеризуются широким набором мест возникновения и возможных траекторий. Таким образом, можно либо подбирать область изменения параметров льда для каждого конкретного случая, либо же сделать её достаточно обширной, покрывающей все траектории полярных мезоциклонов, рассматриваемых в данной серии экспериментов. С целью обеспечения однородности данных и возможности их корректного сравнения был выбран второй подход. В результате область изменений параметров льда располагается между  $68^{\circ}$  и  $80,5^{\circ}$  ш. и между  $15^{\circ}$  и  $70^{\circ}$  в. д., занимая существенную часть домена WestArctic (см. рис. 2).

В ходе исследования полярных мезоциклонов проводилась серия из четырёх экспериментов: в контрольном эксперименте температура воды и характеристики льда никак не изменялись, в IceCut лёд отсутствовал, в IceCutTemp5, помимо обнуления толщины льда, увеличивалась температура воды, а в IceBuild увеличивалась площадь льда. Подробнее параметры экспериментов приведены в таблице.

## 2. Выбор случаев для исследования

Так как одной из целей данной работы являлось выявление основных закономерностей восприимчивости модели к отсутствию льда в зависимости от природы образования ПМЦ, то представлялось необходимым отобрать случаи ПМЦ, различные по своему генезису, интенсивности, времени жизни, пройденному расстоянию и сезону возникновения.

**Таблица.** Параметры численных экспериментов в ходе исследования полярных мезоциклонов

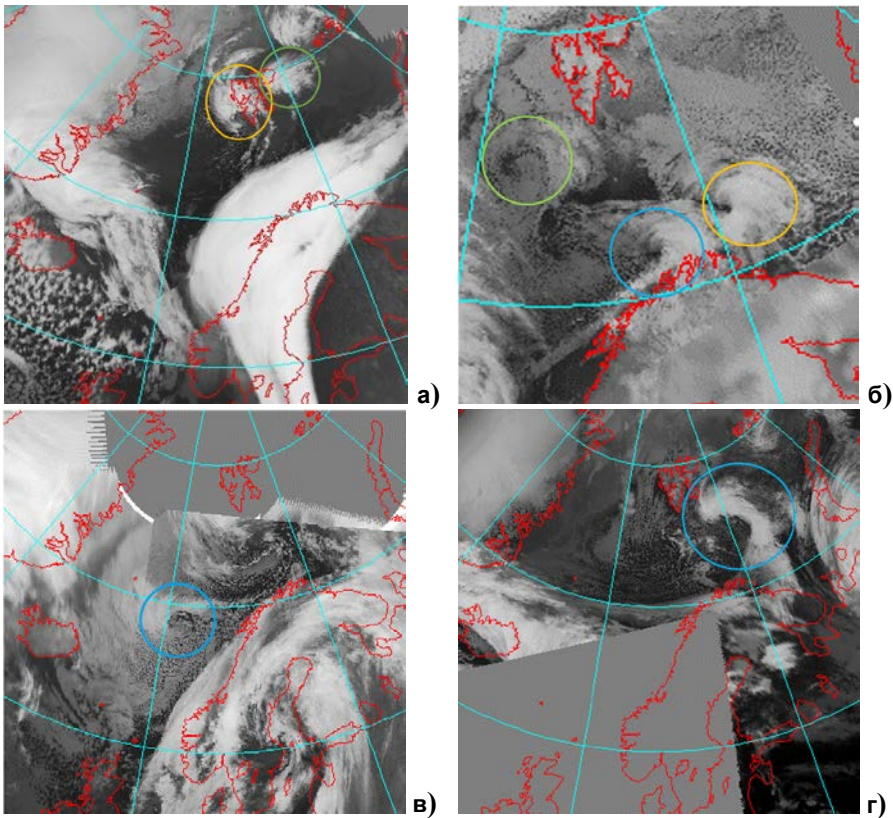
**Table.** Parameters of numerical experiments with varying sea ice boundary and sea surface temperature

Параметры ТПО и льда	Контрольный эксперимент	IceCut	IceCutTemp5	IceBuild
ТПО	Не изменялась	Минимум 273,15 К	Минимум 278,15 К	263,15 К
Толщина льда	Не изменялась	0	0	1,4 м
Доля льда в ячейке	Не изменялась	0	0	1
Область изменений параметров льда	Нет	Между 68° и 80,5°с.ш. и между 15°з.д. и 70°в.д.	Между 68° и 80,5°с.ш. и между 15°з.д. и 70°в.д.	Между 68° и 80,5°с.ш. и между 15°з.д. и 70°в.д.

Для этого все представленные на рис. 1 случаи оценивались по ряду факторов: наличие облачной «запятой» или другой структуры на спутниковых снимках в течение некоторого времени, позволяющее проследить путь ПМЦ; наличие области с повышенной скоростью ветра по данным прогнозов над северными морями или по данным реанализов (CARRA [<https://confluence.ecmwf.int/pages/viewpage.action?pageId=272321315>], NORA3 [<https://thredds.met.no/thredds/projects/nora3.html>]), а также архива на основе спутниковых данных CCMР (v3.1) (Cross-Calibrated Multi-Platform). Этот архив представляет собой комбинацию данных, полученных от нескольких типов спутниковых микроволновых датчиков, и фонового поля, полученного по данным реанализа. CCMР включает в себя большинство американских, японских и европейских спутников, запущенных на сегодняшний день, по которым определяется скорость и направление ветра. Сюда входят скаттерометры QuikScat, ASCAT-A и ASCAT-B, а также радиометры SSM/I, SSMIS, TMI, GMI, ASMR-E, AMSR2 и WindSat [10]. Важным фактором являлся выход ПМЦ на сушу, так как это позволяет провести верификацию прогнозов, используя стационарные данные наблюдений. Как было сказано выше, нас интересовала природа возникновения вихря и наличие связи со струйным течением, поэтому при отборе случаев мы также рассматривали карты AT500, T850 (доступные в архиве [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)) и синоптические карты. Для проверки, подпадают ли выбранные случаи под определение полярного циклона, в дополнение к наиболее распространённому критерию интенсивности (скорости ветра более 15 м/с) было рассмотрено несколько других критериев. Учитывая, что в атмосфере с малой статической устойчивостью формируется большое количество ПМЦ, в качестве критерия часто используется разница между температурой поверхности океана и температурой на поверхности 500 гПа (T500). Большинство авторов рассматривают пороговое значение ТПО – T500 > 43 К [11] или ТПО – T500 > 40 К [9].

В результате было отобрано 4 случая возникновения ПМЦ:

1) **16–18 марта 2022 г. (ПМЦ-1)**. Это самый долгоживущий ПМЦ, образовавшийся у западных берегов Гренландии и прошедший около 3000 км на восток до северной оконечности острова Новая Земля (рис. 3а). Этот случай представляется интересным по нескольким причинам: во-первых, скорость перемещения вихря и те расстояния, которые ему удалось преодолеть, указывают на связь ПМЦ со струйным течением; во-вторых, примерно половина пути вихря (от Шпицбергена до Новой Земли) пролегла над поверхностью, покрытой морским льдом, поэтому можно предположить, что изменение границы морского льда может оказать на траекторию ПМЦ заметное влияние.



**Рис. 3.** Спутниковые снимки ПМЦ: 16–18 марта 2022 г., 19 ч ВСВ 17.03.2022 (а); 6–8 января 2024 г., 9 ч ВСВ 07.01.2024; 18–19 января 2022 г., 9 ч ВСВ 19.01.2022 (в); 18–19 сентября 2023 г., 14 ч ВСВ 18.09.2023 (г). Желтым цветом показан ПМЦ-1, голубым ПМЦ-2, салатovým ПМЦ-3.

**Fig. 3.** Satellite images PL: March 16-18, 2022, 19:00 UTC March 17, 2022 (a); January 6-8, 2024, 9:00 UTC January 7, 2024 (б); January 18-19, 2022, 9:00 UTC January 19, 2022 (в); September 18-19, 2023, 14:00 UTC September 18, 2023 (г). Satellite images taken from The Antarctic Meteorological Research Center (AMRC, <https://amrc.ssec.wisc.edu/>). PL-1 is shown in yellow; PL-2 is blue, PL-3 is light green.

2) **6–8 января 2024 г. (ПМЦ-2).** Этот период примечателен появлением сразу трех ПМЦ, проходящих над акваторией Норвежского и Баренцева морей (рис. 3б). Первый ПМЦ (ПМЦ-1) образовался к югу от Шпицбергена в тыловой части обширного синоптического циклона с центром над Новой Землёй. Он двигался на восток и утром 7 января вышел на о. Колгуев, затем затронул о. Вайгач и юг Новой Земли. ПМЦ-2 и ПМЦ-3 возникли к юго-западу от Шпицбергена, где наблюдались большие горизонтальные контрасты между теплым морем и ледяной поверхностью архипелага.

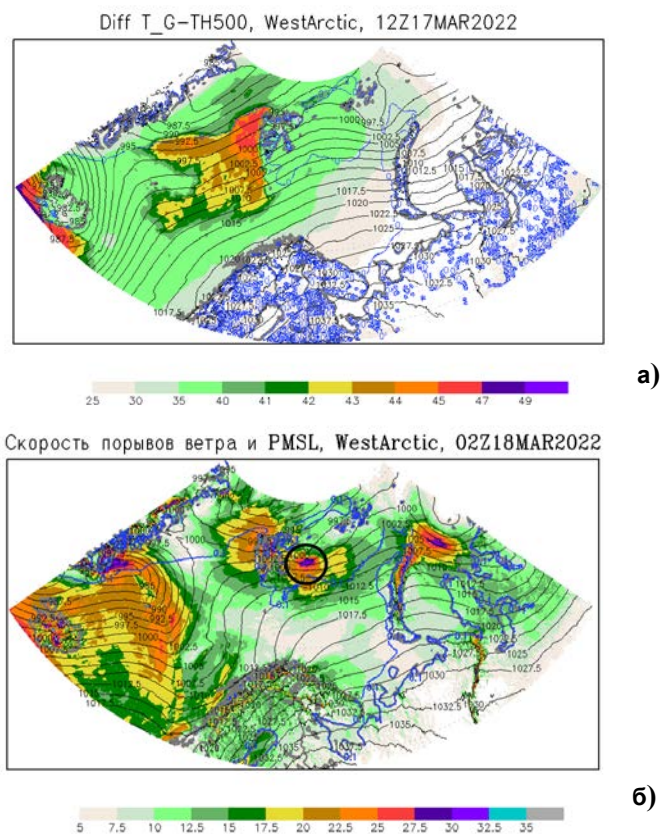
3) **18–19 января 2022 г. (ПМЦ-3).** 17 января над Гренландским и Норвежским морями проходил крупный синоптический циклон, в тылу у которого у восточного берега Гренландии в ночь с 17 на 18 января сформировался интенсивный ПМЦ. Вихрь смещался на юго-юго-восток, и в ночь на 19 января прошёл в непосредственной близости к острову Ян-Майен (рис. 3в).

4) **18–19 сентября 2023 г. (ПМЦ-4).** Полярный мезоциклон, возникший 18 сентября 2023 г. – это редкий случай образования ПМЦ в теплый период. Температура воды в районе его появления на спутниковых картах составляла 8–9 градусов, граница морского льда в этот период достаточно сильно удалена на север и проходит примерно по 81–82° с. ш. Хорошо сформированная в поле облачности «запятая» видна на спутниковых снимках 18.09 в 14 ч ВСВ (рис. 3г), разность температуры поверхности и H500 достигает 42 градуса.

### 3. Результаты численных экспериментов

#### 3.1 ПМЦ-1, 16-18 марта 2022 года

Одним из критериев возникновения полярных мезоциклонов является контраст между температурой поверхности и температурой на высоте 500 гПа. На рис. 4а приведена карта разностей температур, исходя из которой видно, что к востоку от Гренландии вблизи границы морского льда в период возникновения исследуемых ПМЦ параметр [ТПО – Т500] достигает 45 К, что превышает порог в 43 К, указанный в [11]. Можно заметить, что на спутниковом снимке (см. рис. 3а) присутствуют сразу две «запятые» – первая несколько слабее выражена, чем вторая. Модель ICON воспроизвела оба этих ПМЦ в поле ветра. В первом ПМЦ они достигают 25 м/с, а во втором доходят до 30 м/с. Оба ПМЦ подошли к Шпицбергену вечером 17 марта. Прохождение второго – более мощного ПМЦ проявилось в виде сильного ветра после 19 часов. При приближении к Шпицбергену и к границе морского льда первый, наименее активный из двух упомянутых полярных циклонов, ослаб и в конечном счете слился в единый ПМЦ со вторым вихрем.



**Рис. 4.** Прогностические данные по модели ICON: разница между температурой поверхности и температурой на высоте 500 гПа в 12 ч ВСВ 17.03.2022 (а); скорость порывов ветра и давление, приведенное к уровню моря по данным модели на 02 ч ВСВ 18.03.2022 (б). Прогноз от 02 ч ВСВ 17.03.2022.

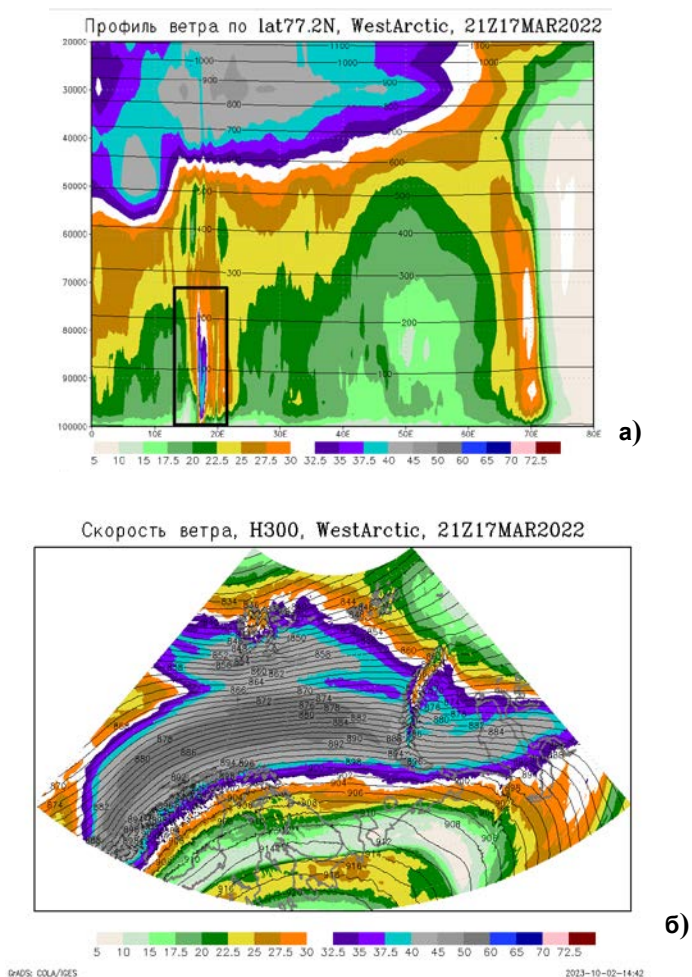
**Fig. 4.** ICON model forecast data: difference between SST and temperature at 500 hPa for 12 UTC on March 17, 2022 (a); wind gust speed and mean sea-level pressure at 02 UTC March 18, 2022 (б). Forecast started from 02 UTC on March 17, 2022.

Для верификации скорости ветра над морем, где отсутствуют метеорологические станции, можно использовать спутниковые данные. Нужными нам критериями обладает база данных о скорости ветра скаттерометра ASCAT со спутника Metop-B (разрешение 25 км). К сожалению, эти данные доступны вплоть до 75° с. ш, что не позволит проследить весь путь ПМЦ, уходящего севернее, к 77–78° с. ш. Однако в момент прохождения ПМЦ по южным районам Шпицбергена и через остров Медвежий, по данным скаттерометра ASCAT, скорость ветра повышалась до 18 м/с, а ближе к 75° с. ш. местами до 20,5 м/с. Это неплохо согласуется с модельными данными (на территории южнее о. Эдж скорости порывов ветра достигали 15–20 м/с).

На рис. 5а приведен вертикальный профиль скорости ветра вдоль 77,2° с. ш. (проходящий через юг Шпицбергена). На долготе 17–18° в. д. видно, что в 23 ч, когда центр ПМЦ проходил над островом, скорости ветра в слое 900–950 гПа достигали 40 м/с. На высотах 250–300 гПа хорошо видно струйное течение, скорость ветра в нём достигает 60 м/с (рис. 5а, б). Траектория исследуемого ПМЦ как раз располагается вдоль пути области максимальных скоростей в струйном течении на протяжении всего его перемещения через Баренцево море (рис. 5б). До 1980-х гг. считалось, что струйное течение не может оказать существенного влияния на образование небольших барических систем, которые развиваются над океанами зимой [8, 12]. Позже в [14] обсуждалось развитие полярных депрессий и связанных с ними зон сдвига к западу от Шпицбергена, и был сделан вывод о том, что полярные депрессии могут формироваться как «сдвиговые вихри», то есть в результате «низкоуровневой баротропной неустойчивости». Авторы работы [7] рассматривали баротропную неустойчивость как возможный механизм формирования полярных депрессий над заливом Аляска, но не смогли сделать окончательного вывода о роли этого эффекта. В [13], где исследовались полярные мезоциклоны над Японским морем, было выдвинуто предположение, что преимущественно баротропная сдвиговая неустойчивость будет способствовать развитию относительно небольших вихрей.

Для подтверждения того, что в энергетике развивающихся возмущений доминирует баротропный процесс, в [13] были рассчитаны скорости баротропного и бароклинного преобразования энергии вокруг вихря, основное зональное течение внутри полосы, а также потоки вихревого импульса. Авторы показали, что баротропное преобразование энергии доминирует в большей части зоны сдвига, где сконцентрирована вихревая кинетическая энергия, тогда как бароклинное преобразование энергии дает незначительный вклад. На основании результатов анализа преобразования энергии авторы [13] пришли к выводу, что вихри мезомасштаба развивались в основном из-за баротропной сдвиговой неустойчивости. В нашем случае, по всей вероятности, разность в температуре поверхности и на H500 в совокупности с наличием мощного струйного течения привела к формированию исследуемого ПМЦ.

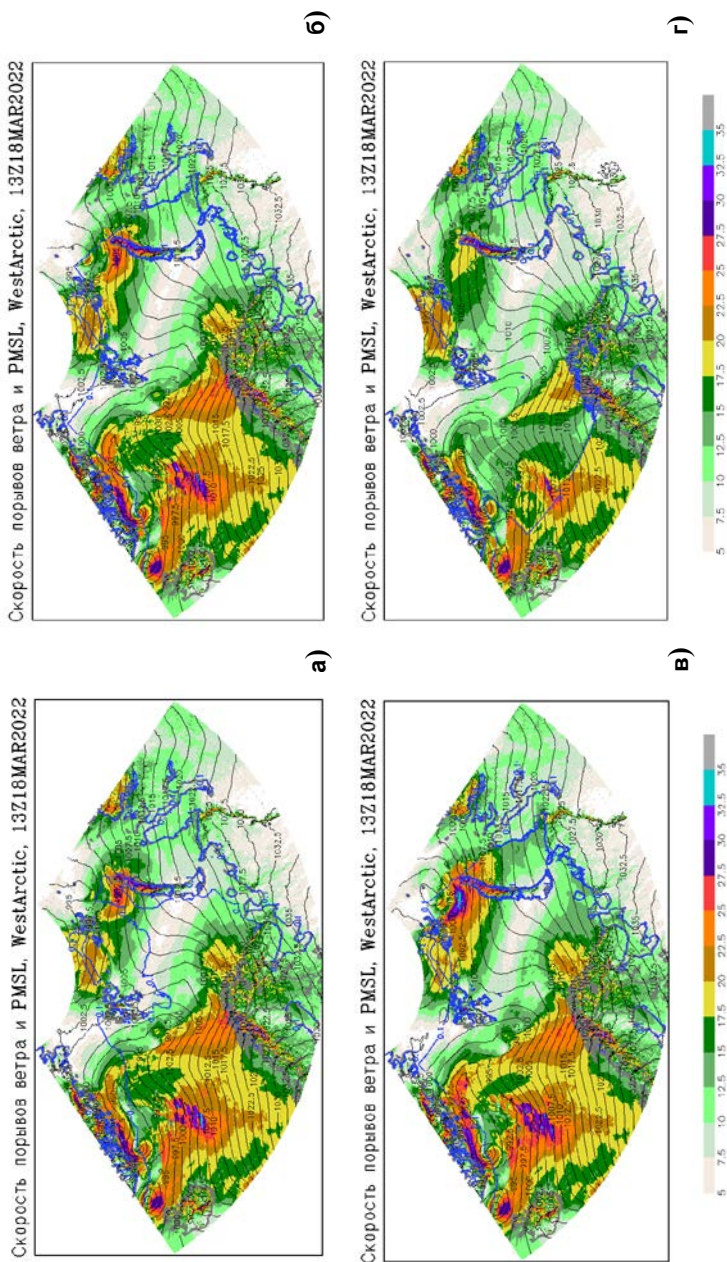
Для анализа чувствительности этого ПМЦ к изменению границы морского льда была проведена серия экспериментов (раздел 1.3). В контрольном эксперименте температура льда между Шпицбергенем и Новой Землей очень высокая (-2...-4 °С, температура поверхности в эксперименте IceCut в этой области составляла 0...-2 °С. Разность температур поверхности между контрольным экспериментом и IceCut на пути прохождения ПМЦ не превышает 2 °С, увеличиваясь до 6 °С лишь в отдельных ограниченных областях. На рис. 6 синей линией показана граница морского льда в контрольном эксперименте (рис. 6а) и в эксперименте с измененным льдом IceCut (рис. 6б).



**Рис. 5.** Вертикальный профиль скорости ветра вдоль  $77,2^\circ$  с. ш. (а); скорость ветра на высоте 300 гПа по данным модели ICON (б). Прогноз от 2 ч ВСВ 17.03.2022. Черный прямоугольник показывает положение ПМЦ в 21 ч ВСВ 17.03.2022.

**Figure 5.** Vertical wind speed profile along the  $77.2^\circ\text{N}$  (а); wind speed at 300 hPa based on ICON model data (б). Forecast for 02 UTC on March 17, 2022. The black rectangle marks the approximate location of the polar low for 21 UTC on March 17, 2022.

Можно видеть, что обширная зона между Шпицбергом и Новой Землей, занятая льдом в контрольном эксперименте, свободна от него в IceCut – был «убран» лед по пути движения ПМЦ. Было сделано предположение, что это должно отразиться на траектории перемещения вихря, поскольку во втором случае он проходит над открытой водой. Однако значимых изменений траектории вихря не произошло, впрочем, как и в скоростях ветра и в поле давления (рис. 6).



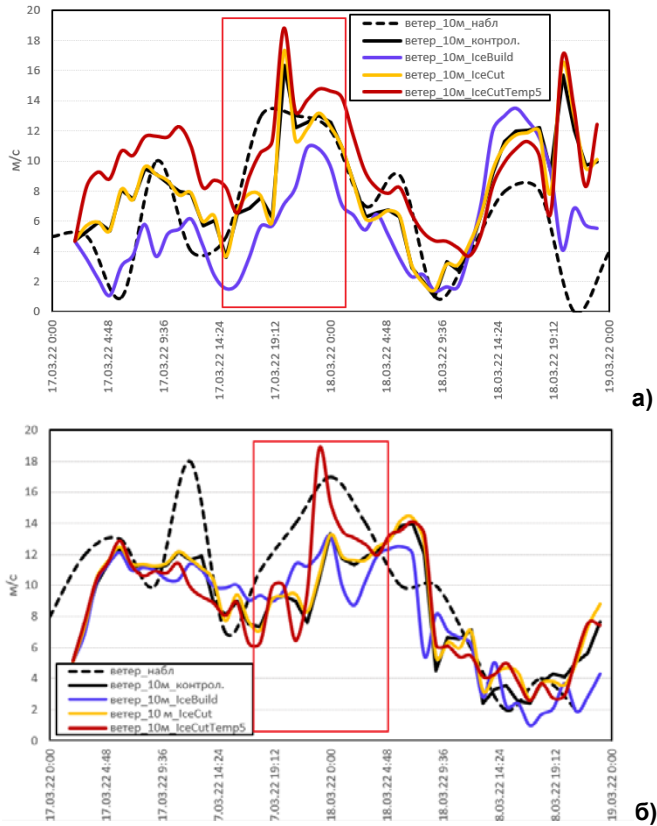
**Рис. 6.** Скорость порывов ветра и атмосферное давление, приведенное к уровню моря в 12 ч ВСВ 18.03.2022 в контрольном эксперименте (а); эксперименте IceCut (б); IceCutTemp5 (в); IceCutTemp5 (г). Тонкая синяя линия показывает границу морского льда в модели. Прогноз от 02 ч ВСВ 17.03.2022.

**Fig. 6.** Wind gust speed and mean sea-level pressure for 12 UTC on March 18, 2022 for control experiment(a); IceCut experiment (б); IceCutTemp5 (в); IceBuild (г). The thin blue line shows the sea ice boundary in the model. Forecast started for 2 UTC on March 17, 2022.

В контрольном эксперименте в 12 ч ВСВ скорости порывов ветра несколько больше в области выхода ПМЦ со льда на открытую водную поверхность (рис. 6а). Отсутствие каких-либо значимых изменений во время передвижения ПМЦ через Баренцево море связано, скорее всего, с температурой того льда, который присутствует в контрольном эксперименте (она составляет порядка  $-2^{\circ}\text{C}$ ), поэтому существенных градиентов между температурой льда и температурой воды нет. Температура водной поверхности в районе между Шпицбергенем и Новой Землей находится в диапазоне от  $-2^{\circ}$  до  $-4^{\circ}$ , при этом толщина льда в этом районе больше полуметра. В тоже время температура поверхности «модельного» льда в районе Гренландии и к западу от Шпицбергена существенно ниже: от  $-6^{\circ}$  до  $-12^{\circ}$ . Это предположение подтверждает и тот факт, что ПМЦ заметно интенсифицируется при повышении ТПО до  $5^{\circ}\text{C}$  – в эксперименте IceCutTemp5 (рис. 6в). Интересно отметить, что при «искусственном» повышении ТПО прогреваются и вышележащие слои атмосферы, прогрев составляет в среднем  $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$  и распространяется до высоты 900 гПа в начале прогноза и до 600 гПа спустя 30 часов прогноза в момент выхода на Новую Землю. Порывы ветра в ПМЦ в эксперименте IceCutTemp5 в среднем на 5 м/с превышают порывы ветра в контрольном эксперименте. Примечательно, что наиболее сильное влияние на траекторию и развитие ПМЦ оказывает искусственно заданный лёд в эксперименте IceBuild (рис. 6г): заметно снижаются скорости ветра, растет давление, во время выхода на Новую Землю порывы скорости ветра не превышают 20 м/с (в контрольном 30 м/с и более).

Для того чтобы иметь возможность оценить качество прогнозов скорости ветра и сравнить интенсивности циклонов в разных экспериментах с искусственно заданным льдом, были построены графики скорости ветра и давления по данным наблюдений на станциях и по результатам численных экспериментов. Для получения прогностических данных вблизи станции брались средние данные с ближайших пяти модельных узлов. На рис. 7 приведен ход скорости ветра в период прохождения ПМЦ и после его ухода на станциях Хорнсунд и Эдж. Также рассматривались данные на станции Хопен. Но поскольку она расположена южнее, на ней прохождение ПМЦ никак не отразилось. Как можно видеть из рис. 7а, начиная примерно с 18 ч 17.03.2022 на станции Хорнсунд начала расти скорость ветра, средние значения достигали 13 м/с, влияние ПМЦ сохранялось примерно до 2 ч ВСВ 18.03.2022. Модель ICON воспроизвела этот рост скорости ветра во всех экспериментах, при этом минимальный рост был в эксперименте с искусственно заданным льдом IceBuild, а максимальные значения скорости ветра (19 м/с) были получены в эксперименте IceCutTemp5. Примечательно, что в контрольном эксперименте и экспериментах без льда был спрогнозирован сначала очень кратковременный рост скорости ветра, а потом второй максимум. Во время второго максимума расхождения между экспериментами увеличились. В эксперименте с искусственно заданным льдом первый максимум в скорости ветра был практически не выражен.

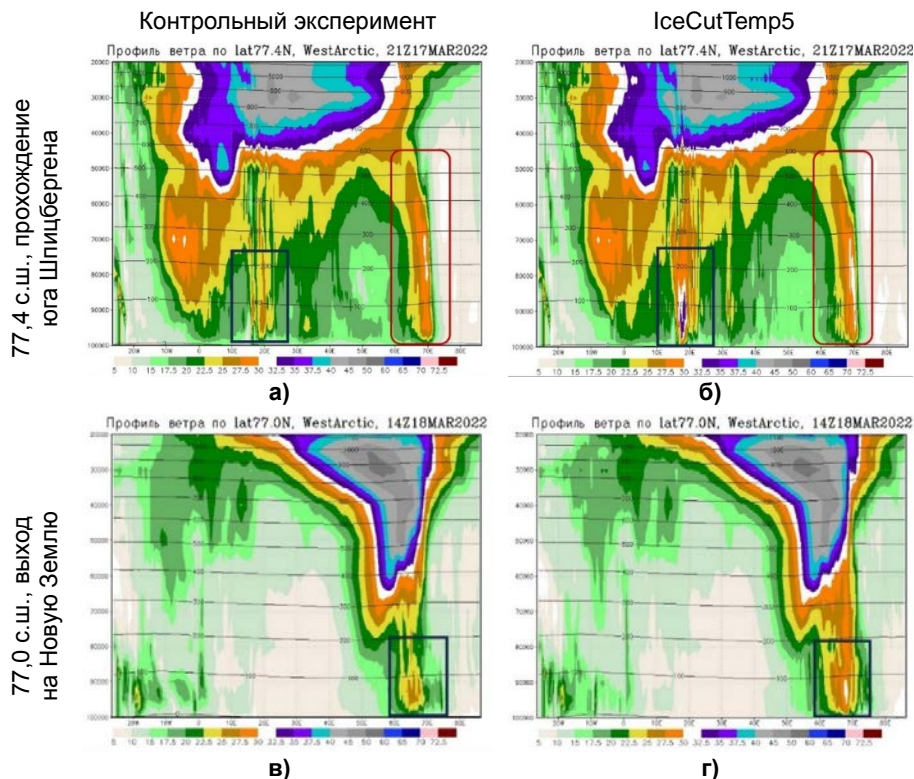
Район станции Эдж ПМЦ проходил на два часа позже, чем район станции Хорнсунд, и здесь средняя скорость ветра достигала 17 м/с. По модельным данным она была заметно меньше, около 13 м/с (однако в одном из модельных узлов вокруг станции модель давала 14 м/с). В эксперименте IceCutTemp5, где ПМЦ интенсифицировался по сравнению с контрольным экспериментом, скорость ветра достигала 19 м/с. Время прихода ПМЦ к острову Эдж во всех экспериментах, кроме IceCutTemp5, совпадает с реальным (которое видно из данных наблюдений). В целом, на станцию острова Эдж ПМЦ вышел в более активной стадии, чем на станцию Хорнсунд, что можно видеть и из карты прогнозов порывов скорости ветра (рис. 6а).



**Рис. 7.** Данные наблюдений и модельных экспериментов: скорость ветра на станции Хорнсунд (а); скорость ветра на станции Эдж (б). Прогноз от 2 ч ВСВ 17.03.2022. Красный прямоугольник обозначает примерный период влияния ПМЦ на метеоусловия станции.

**Fig. 7.** Observational and model experiments data: wind speed at Hornsund station (a); wind speed at Edge Island station (б). Forecast for 02 UTC on March 17, 2022. The red rectangle indicates the approximate period of the polar low's impact on the station's weather conditions.

В момент выхода на север Новой Земли ПМЦ начал затухать и практически сразу исчез со спутниковых снимков. На рис. 8 видно, что в контрольном эксперименте вихрь начинает терять свою связь со струйным течением, скорости ветра уже не превышают 27,5 м/с, в то время как в эксперименте IceCutTemp5 скорость ветра достигает 32,5 м/с, ПМЦ больше по размеру и имеет устойчивую связь со струйным течением.

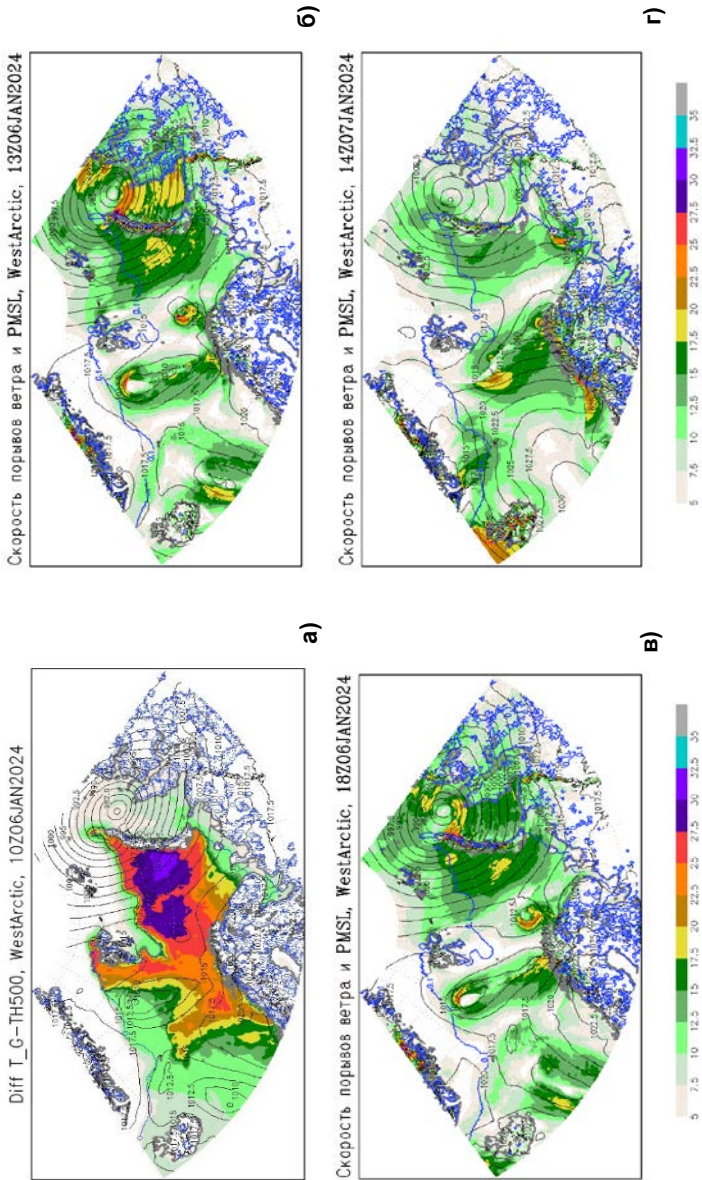


**Рис. 8.** Вертикальные профили скорости ветра для двух экспериментов: контрольный (слева), IceCutTemp5 (справа). Сверху профили в момент прохождения ПМЦ юга Шпицбергена, снизу – в момент его выхода на Новую Землю. Прогноз ICON от 2 ч ВСВ 17.03.2022. Чёрный прямоугольник показывает положение ПМЦ.

**Figure 8.** Vertical wind speed profile for control (left) and IceCutTemp5 (right). Top row is PL moving along Svalbard and bottom row is PL near Novaya Zemlya coast. Forecast for 02 UTC on March 17, 2022. The black rectangle marks the approximate location of the PL.

### 3.2. ПМЦ-2, 5–7 января 2024 г.

На спутниковом снимке рис. 3б представлены все три ПМЦ, образовавшиеся 5–7 января над акваторией Норвежского и Баренцева морей. Все эти вихри были воспроизведены моделью ICON в контрольном эксперименте (рис. 9б, в, г).

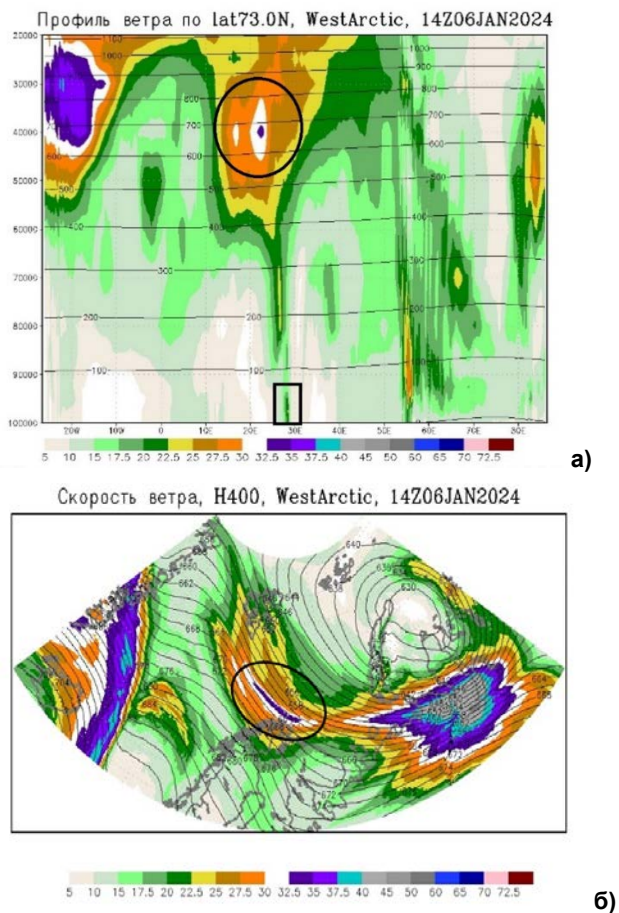


**Рис. 9.** Прогностические данные по модели ICON: разница между температурой поверхности и температурой на высоте 500 гПа в 10 ч ВСВ 06.01.2024 (а); скорость порывов ветра и давление, приведенное к уровню моря на 13 ч ВСВ 06.01.2024 (б); на 18 ч 06.01.2024 (в); на 14 ч 07.01.2024 (г). Прогноз от 12 ч ВСВ 05.01.2024.

**Fig. 9.** ICON model forecast data: difference between SST and temperature at 500 hPa for 10 UTC January 6, 2024 (a); wind gust speed and mean sea-level pressure fort 13 UTC on January 6, 2024 (б); 18 UTC on January 6, 2024 (в); 14 UTC on January 7, 2024 (г). Forecast started from 12 UTC on January 5, 2024.

По данным скаттерометра ASCAT со спутника Metop-B, в момент прохождения ПМЦ-1 вдоль севера Кольского полуострова и над акваторией Баренцева моря скорости ветра достигали 30 и 40 узлов соответственно, что эквивалентно 15 и 20 м/с. По прогнозам ICON, примерно в этот временной интервал скорость ветра составляла от 17,5 до 25 м/с.

На рис. 10а приведен вертикальный профиль скорости ветра вдоль  $73^\circ$  с. ш. в момент прохождения ПМЦ-2 вдоль побережья Норвегии и севера Кольского полуострова.



**Рис. 10.** Вертикальный профиль скорости ветра вдоль  $73^\circ$  с. ш. (а); скорость ветра на высоте 400 гПа по данным модели ICON, прогноз от 12 ч ВСВ 05.01.2024 (б). Черный прямоугольник обозначает примерное положение ПМЦ в 14 ч ВСВ 06.01.2024. Черные окружности обозначают положение струйного течения.

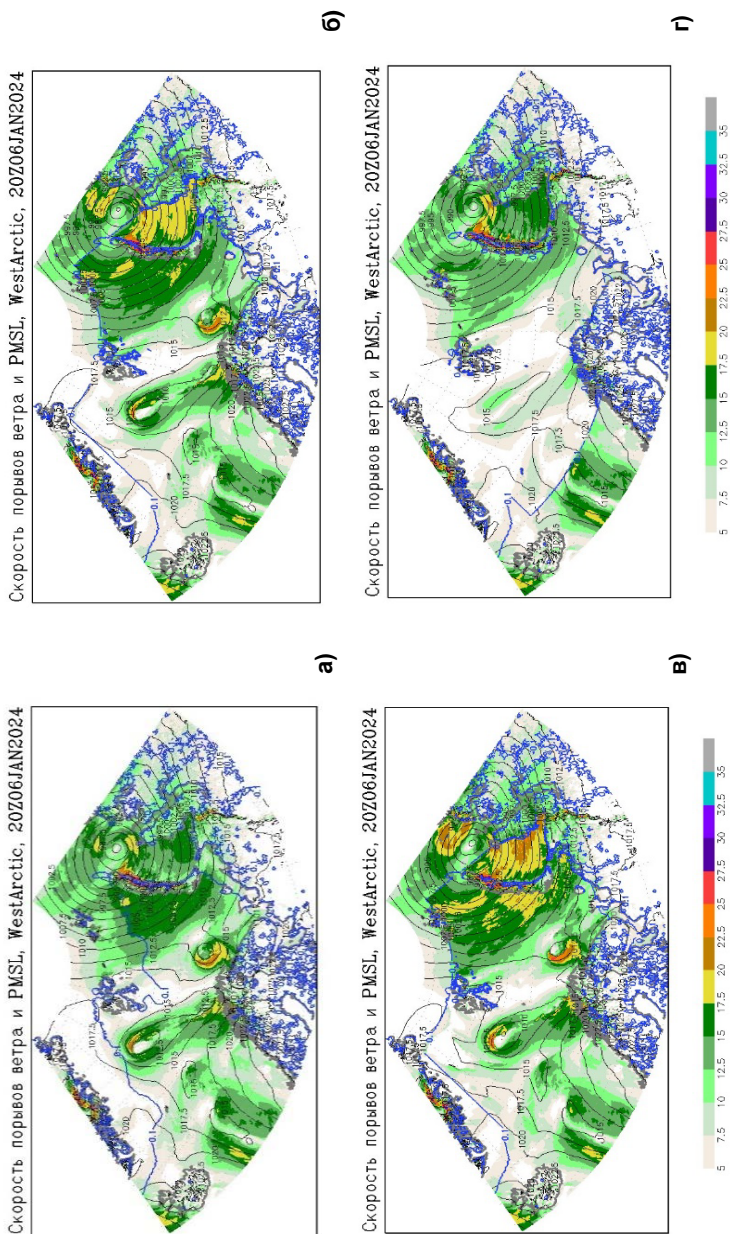
**Figure 10.** Vertical wind speed profile along the  $73^\circ$ N (а); wind speed at 400 hPa based on ICON model data. Forecast for 12 UTC on January 5, 2024 (б). The black rectangle marks the approximate location of the polar low for 14 UTC on January 6, 2024. Black circles mark jet stream location.

Можно увидеть, что вихрь довольно слабо выражен как в пространственном масштабе по ширине, так и по высоте: он достигает высот 925 гПа, а скорости ветра составляют около 20–25 м/с. Однако можно заметить (рис. 10а), что прослеживается небольшая связь со струйным течением, расположенным на высоте 400 гПа. Как видно из рис. 10б, как раз в момент прохождения ПМЦ над Баренцевым морем ветвь струйного течения со скоростями до 37,5 м/с протянулась с северо-запада на юго-восток от Шпицбергена. Восточнее эта ветвь оказывается связанной с синоптическим циклоном, образовавшимся на арктическом атмосферном фронте.

Для анализа чувствительности этого ПМЦ к изменению границы морского льда была проведена серия экспериментов, описанных в разделе 1.3. В эксперименте IceCut заметные изменения относительно контрольного эксперимента локализованы в зоне к югу от Шпицбергена, где в естественных условиях проходит граница довольно холодного (относительно предыдущего рассмотренного случая) льда с температурой поверхности  $-8\dots-12^\circ$ .

На картах на рис. 11 приведены прогностические значения порывов ветра при прогнозе на 20 ч ВСВ 06.01.2024, когда все три ПМЦ уже были достаточно хорошо развиты и видны как на спутниковых картах, так и в прогнозах ICON. Синей линией показана граница морского льда в контрольном эксперименте (рис. 11а) и в эксперименте со сдвинутым льдом IceCut (рис. 11б). Можно видеть, что при отодвигании границы морского льда к северу практически не происходит никаких значимых изменений в интенсивности (скорости ветра и атмосферном давлении) и в траектории исследуемых ПМЦ. Вероятнее всего, это связано с тем, что пути перемещения ПМЦ изначально проходили над поверхностью, свободной от морского льда, поэтому существенных различий в свойствах подстилающей поверхности в эксперименте IceCut не происходит, хотя из-за сдвига границы льда Гренландии может несколько уменьшаться горизонтальный контраст температур в месте возникновения ПМЦ-2 и ПМЦ-3. На рис. 11в показаны порывы ветра, прогнозируемые ICON при искусственном увеличении ТПО до  $+5^\circ\text{C}$ . Несмотря на то, что траектории ПМЦ остались неизменными, скорости ветра как в исследуемых ПМЦ, так и в вихре синоптического масштаба заметно возросли в среднем на 2,5 м/с. Но наиболее сильные изменения отражены на рис. 11г, где представлен эксперимент с искусственно заданным льдом IceBuild: можно видеть, что морской лёд практически полностью блокирует развитие ПМЦ. ПМЦ-1 не образуется совсем, а ПМЦ-2 и ПМЦ-3, имевшие некоторое возмущение в начальных данных, затухают спустя несколько часов прогноза. Примечательно, что на полярный мезоциклон, возникший 17 марта 2022 г., наращивание льда повлияло не так сильно: вихрь всё равно развился и прошел свой путь до Новой Земли, хотя был заметно слабее (рис. 6г).

Как можно видеть из спутникового снимка (рис. 3б), днем 7 января ПМЦ-1 проходил вдоль побережья Ненецкого округа к южной части Новой Земли.



**Рис. 11.** Скорость порывов ветра в 20 ч ВСВ 06.01.2024 в контрольном эксперименте (а); эксперименте IceCut (б); IceCutTemp5 (в); IceBuild (г). Тонкая синяя линия показывает границу морского льда в модели. Прогноз от 12 ч ВСВ 05.01.2024.

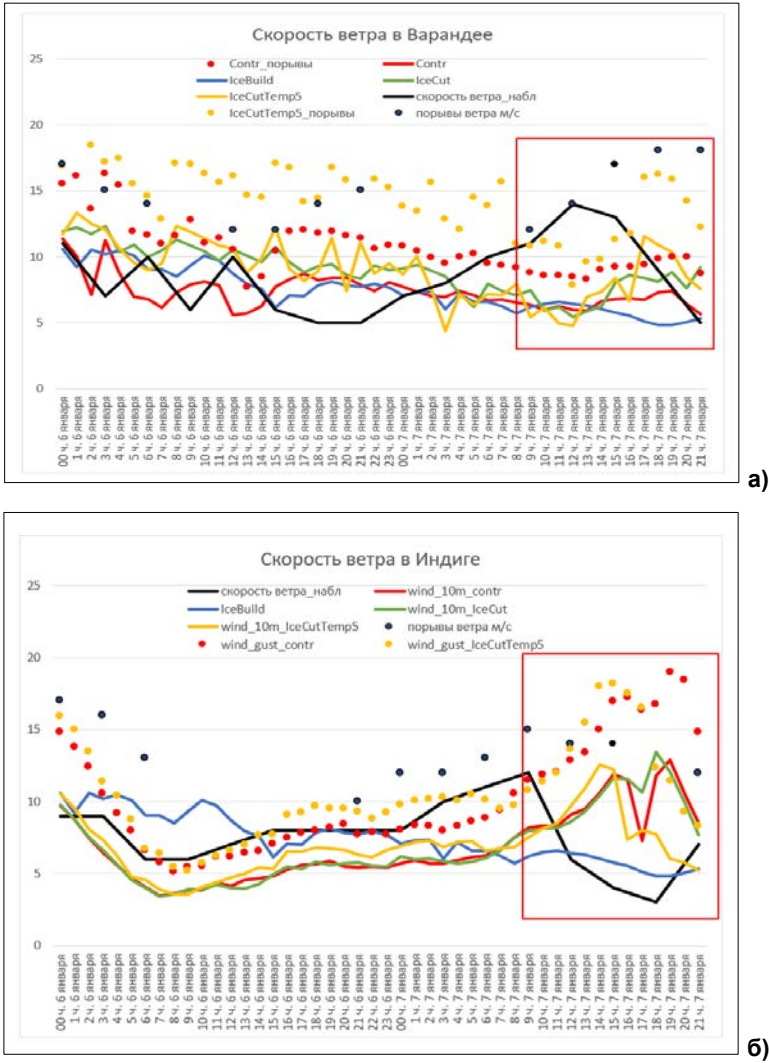
**Fig. 11.** Wind gust speed for 20 UTC on January 6, 2024 for control experiment (а), IceCut experiment (б), IceCutTemp5 (в) IceBuild (г). The thin blue line shows the sea ice boundary in the model. Forecast started for 12 UTC on January 5, 2024.

Мы посмотрели архивы погоды на нескольких метеостанциях региона и пришли к выводу, что только на станциях Индига и Варандей 07.01.2014 наблюдались характерные признаки прохождения ПМЦ: усиление ветра и его порывов, сильная снежная низовая метель. На рис. 12 приведены данные о скорости ветра и его порывах на метеостанциях Варандей и Индига, а также средние данные для всех четырех модельных экспериментов. Можно видеть (рис. 12а), что по модельным данным прохождение ПМЦ-1 района Варандея произошло позже, чем по данным наблюдений (на станции скорость ветра начала расти в 6 утра, а по модельным данным около 13 ч). Кроме того, в контрольном эксперименте скорости ветра были существенно ниже, чем на станции. Иначе проявилось прохождение ПМЦ в экспериментах IceCut и IceCutTemp5 – скорость ветра начинает расти с приходом ПМЦ, доходя до 9 и 12 м/с соответственно.

Порывы ветра в эксперименте с искусственно прогретой ТПО достигают 16 м/с, и эти значения являются близкими к наблюдаемым на метеостанции в этот период. В эксперименте IceCut, как и говорилось выше, возникновения ПМЦ зафиксировано не было, что видно и из хода скоростей ветра на рис. 12а. В целом, можно сделать вывод о неуспешном прогнозе затухания ПМЦ-1 в районе станции Варандей при старте прогноза от 12 ч ВСВ 05.01.2024 (48 часов прогноза). Район станции Индига ПМЦ проходил на несколько часов раньше, чем это спрогнозировала модель ICON. Расхождение составило около 4 часов (что при прогнозе за двое суток можно считать неплохим результатом). Скорости ветра на станции и по модельным данным хорошо согласовывались между собой и составляли около 12–13 м/с, порывы на станции достигали 15 м/с, а по модельным данным – 17–19 м/с. Интересно, что вне зависимости от вида эксперимента (контрольный, IceCut, IceCutTemp5) скорости ветра в Индиге были примерно одинаковые. Исключение составил эксперимент IceBuild, во время которого в модели не образовалось исследуемого ПМЦ (рис. 12б).

### 3.3. ПМЦ-3, 18–19 января 2022 года

Известно, что циклон синоптического масштаба 17 января перемещался вдоль границы морского льда (на рис. 13 показана синим цветом) на северо-восток. В его тыловой части, которая проходила по границе льда, формировались северные потоки. Именно в этой части Гренландского моря образовался полярный циклон. Таким образом, зарождение полярного циклона было связано со вторжением холодного воздуха на тёплую подстилающую поверхность (различия в температурах свободной ото льда и ледовой морской поверхности достигали 25 °С). На первых стадиях развития полярный циклон шёл на юго-юго-восток и в ночь на 19 января прошёл в непосредственной близости от острова Ян-Майен. К этому моменту над областью прохождения ПМЦ на высоте H200 видно струйное течение с максимальными скоростями 60 м/с.

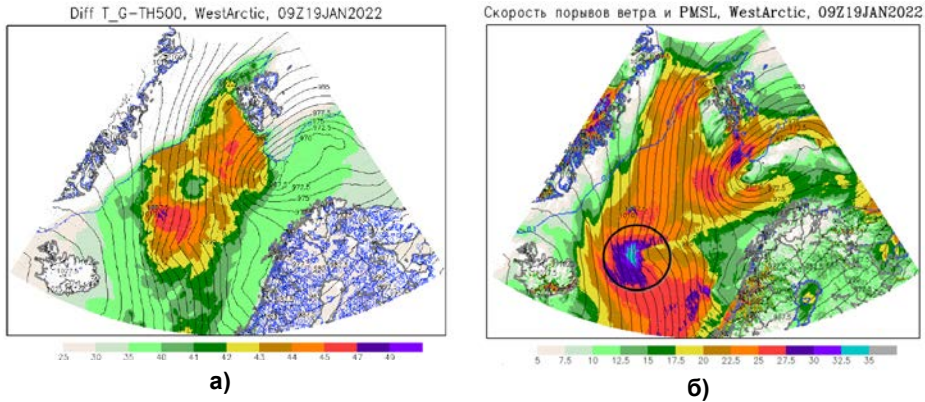


**Рис. 12.** Данные наблюдений и модельных экспериментов о скорости и порывах ветра на станции Варандей (а) и Индига (б). Прогностические данные получены при прогнозе по модели ICON от 12 ч ВСВ 05.01.2024. Красный прямоугольник обозначает примерное время влияния ПМЦ на станцию.

**Fig. 12.** Observational and model experiments data of wind speed and wind gust speed on stations Varandey (a) and Indiga (б). Forecast of ICON model started for 12 UTC on January 5, 2024. The red rectangle indicates the approximate period of the polar low's impact on the station's weather conditions.

Минимальное расстояние от острова до центра циклона наблюдалось в 0–1 ч ВСВ 19 января – около 100 км к восток-северо-востоку. В течение 19 января вихрь продолжил движение преимущественно на юг и к 21 ч достиг берега Норвегии на широте около 63° и с выходом на побережье

быстро заполнился. На рис. 13 показаны прогностические значения разности температуры поверхности и температуры на H500 (рис. 13а) и скорости ветра (рис. 13б).



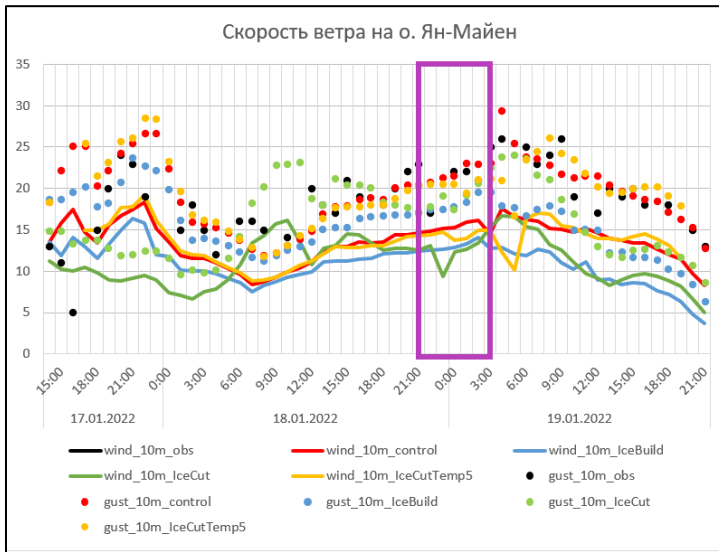
**Рис. 13.** Прогноз ICON на 9 ч ВСВ 19.01.2022: разность температуры поверхности и температуры на H500 (а); порывы ветра на высоте 10 м и давление, приведённое к уровню моря (б). Местоположение ПМЦ выделено окружностью.

**Fig. 13.** ICON model forecast data for 9 UTC on January 19, 2022: difference between SST and temperature at 500 hPa (a); wind gust speed and mean sea-level pressure (б). Black circle marks PL location. Forecast started for 14 UTC on January 17, 2024.

По данным скаттерометра ASCAT, в 18 ч 18 января к северу от острова на широтах 74–75° с. ш. заметна небольшая область скоростей ветра северного направления более 40–45 узлов (20–23 м/с), которая соответствует положению полярного циклона во всех прогнозах на 4, 16 и 28 ч. Также к востоку заметна область относительно слабого ветра северо-западного направления, характерная для передней части полярного циклона, что позволяет предположить, что в поле ветра по данным ASCAT есть полярный циклон. Таким образом, до 28 ч (с момента, когда мезоциклон возможно обнаружить на спутниковом снимке) прогноз с наибольшей заблаговременностью воспроизводит траекторию полярного циклона точно.

На графике (рис. 14) показан ход скорости, порывов ветра и атмосферного давления на уровне моря по станции Ян-Майен и по данным трех прогнозов ICON в ближайшем к станции узле сетки. Атмосферное давление во всех трех прогнозах близко к значениям по станции. Небольшое падение давления заметно с полуночи до 3 ч 18 января в прогнозе от 17 января (показан красным) – во время прохождения к западу от острова полярного циклона. Значительное падение скорости ветра в 3 ч 19 января в прогнозе от 17 января (на 37 ч) связано с тем, что в модели, на момент прохождения полярного циклона рядом с Ян-Майеном, остров оказывается в его передней части с характерными низкими относительно фоновых скоростями

ветра, в то время как в прогнозе на 13 и 25 ч скорость ветра в течение ночи росла. Максимум скорости ветра, связанный с прохождением полярного циклона, наблюдался на станции в 6 ч 18 января и составил 17 м/с. На поздней стадии по мере приближения к берегу Норвегии полярный циклон в прогнозе от 17 января сместился западнее его реального положения. Таким образом, наиболее точно траекторию полярного циклона спрогнозировала модель с более поздним начальным временем прогноза. Изучение особенностей суточного хода ветра на острове и их причин потребует более детального исследования. Следует учитывать, что Ян-Майен – остров вулканического происхождения со значительными перепадами высот, поэтому на модуль и направление ветра рельеф может влиять в более значительной степени, чем собственно атмосферные процессы, а модель с шагом сетки порядка 2 км способна воспроизводить локальные особенности поля ветра.

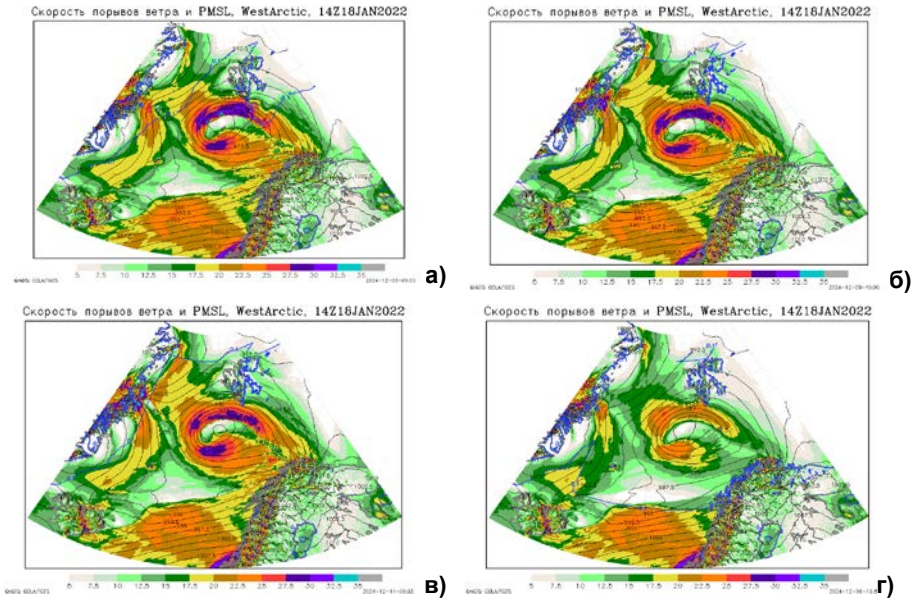


**Рис. 14.** Данные наблюдений и модельных экспериментов о скорости и порывах ветра на станции Ян-Майен. Прогностические данные получены при прогнозе по модели ICON от 14 ч ВСВ 17.01.2024. Сиреневый прямоугольник обозначает примерное время влияние ПМЦ на станцию.

**Fig. 14.** Observational and model experiments data of wind speed and wind gust speed on Jan Mayen stations. Forecast of ICON model started for 14 UTC on January 17, 2024. The purple rectangle indicates the approximate period of the polar low's impact on the station's weather conditions.

Для анализа чувствительности этого ПМЦ к изменению границы морского льда была проведена серия экспериментов, описанных в разделе 1.3. Во всех четырех экспериментах на шестом часу прогноза у берега Гренландии формируется ложбина на изобаре 987,5 гПа. Спустя 18 ч ложбина сохраняется, однако в экспериментах IceCut и IceCutTemp5 она сдвинута западнее по сравнению с контрольным экспериментом (рис. 15б, г). В этот

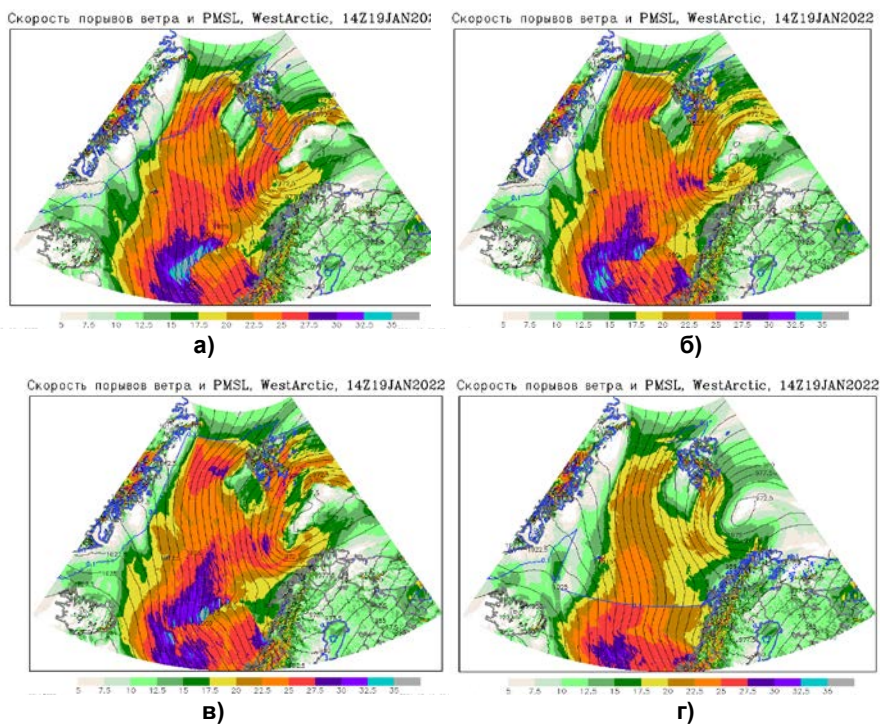
период времени в контрольном эксперименте порывы ветра достигают 27,5 м/с, в экспериментах IceCut и IceCutTemp5 – 35 м/с, при этом в IceCutTemp5 зона с сильным ветром охватывает большую территорию. В эксперименте IceBuild порывы ветра не превышают 25 м/с. Во всех экспериментах при движении циклона на юг давление быстро растёт.



**Рис. 15.** Скорость порывов ветра в контрольном эксперименте (а); эксперименте IceCut (б); IceCutTemp5 (в); IceBuild (г). Тонкая синяя линия показывает границу морского льда в модели. Прогноз по модели ICON на 14 ч ВСВ 18 января от 14 ч ВСВ 17 января 2022 г.

**Fig. 15.** Wind gust speed for 14 UTC on January 18, 2022: control experiment (a); IceCut experiment (б); IceCutTemp5 (в); IceBuild (г). The thin blue line shows the sea ice boundary in the model. Forecast of ICON model started for 14 UTC January 17, 2022.

Максимальные порывы в эксперименте IceCut уже на начальной стадии формирования полярного циклона (прогноз на 24 ч) достигают 40 м/с. Тем не менее по мере продвижения циклона на юг дальше от берега Гренландии порывы ветра в контрольном эксперименте усиливаются (33–36 против 30–33 м/с), атмосферное давление в экспериментах IceCut и IceCutTemp5 начинает расти быстрее, и полярный циклон ослабевает раньше, до выхода на берег. В обоих экспериментах с убраным льдом скорость перемещения ПМЦ снижается по сравнению с контрольным экспериментом. При искусственно заданном льде (рис. 16г) скорость веста в ПМЦ заметно ниже, однако смещается на юг примерно с той же скоростью, как и в контрольном эксперименте. После выхода со льда на морскую поверхность ПМЦ вновь активизируется, порывы ветра усиливаются до 32,5 м/с, но всё же он слабее, чем ПМЦ в остальных экспериментах, и разрушается раньше.



**Рис. 16.** Скорость порывов ветра в контрольном эксперименте (а); эксперименте IceCut (б); IceCutTemp5 (в); IceBuild (г). Тонкая синяя линия показывает границу морского льда в модели. Прогноз по модели ICON на 14 ч ВСВ 19 января от 14 ч ВСВ 17 января 2022 г.

**Fig. 16.** Wind gust speed at 14 UTC January 19, 2022 for control experiment (a); IceCut experiment (б); IceCutTemp5 (в); IceBuild (г). The thin blue line shows the sea ice boundary in the model. Forecast of ICON model started for 14 UTC on January 17, 2022.

Более раннее и интенсивное усиление полярного циклона при отсутствии льда связано, по-видимому, со значительным увеличением как разности температуры подстилающей поверхности и температуры воздуха на H500 (в контрольном эксперименте в момент формирования полярного циклона она не превышает 30 °С, при отсутствии льда разность температур преодолевает порог в 40 °С на 20 ч прогноза), так и близостью к Гренландии с её холодной ледовой поверхностью и, как следствие, более высокими горизонтальными градиентами температуры.

В обоих экспериментах область полярного циклона характеризуется разностью температуры поверхности и H500 более 47 °С, но эти значения разности достигается лишь спустя нескольких, 6–10 часов после образования вихря.

В зависимости от стадии развития ПМЦ мы получили разный отклик вихря на отсутствие льда. В частности, на начальной стадии развития, благодаря усилению неустойчивости атмосферы и усилению горизонтальных

градиентов температуры, вихрь быстро активизируется, скорость ветра и его порывов в нём выше. Затем же, в зрелой стадии наблюдается обратная картина и ПМЦ быстрее угасает.

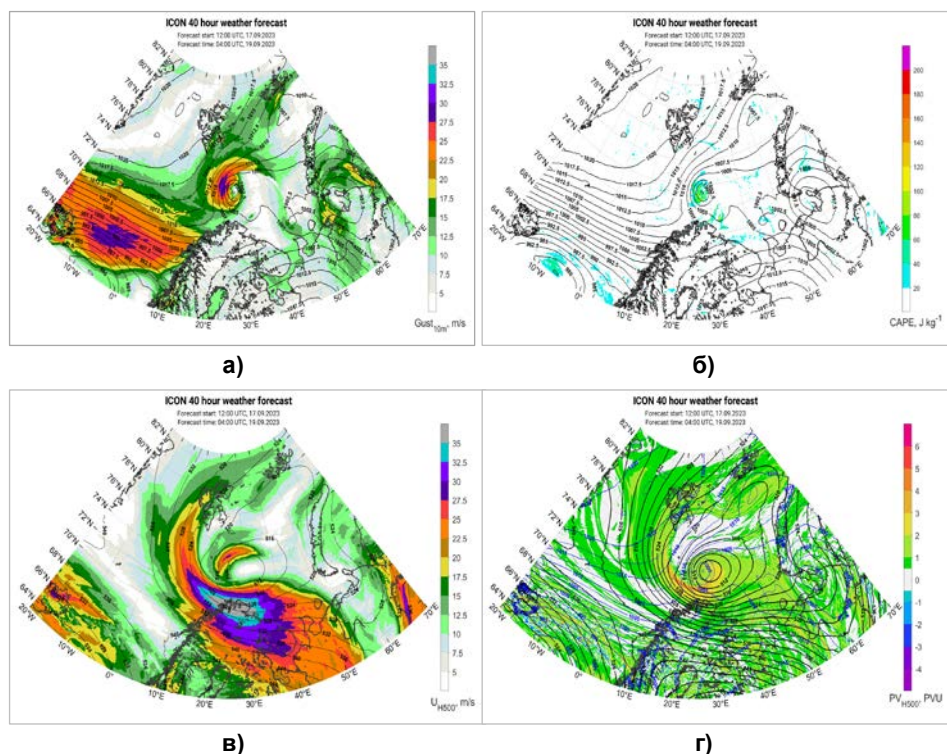
### 3.4. ПМЦ-4, 18–19 сентября 2023 года

Этот случай обратил на себя особое внимание, поскольку сформировался в довольно нетипичных условиях. Как известно, полярные циклоны преимущественно зимнее явление. По данным [18], в сентябре полярные циклоны в регионе за 14 лет с 1999 по 2013 год формировались лишь два раза. Температура поверхности Баренцева моря в районе формирования вихря (к югу от о. Шпицберген) составляла 6–8 °С, а граница морского льда проходила значительно севернее острова. На рис. 3 (г) хорошо заметна облачность сформировавшегося вихря. ПМЦ медленно смещался на юг и к полудню 19 сентября (по ВСВ) достиг побережья Кольского полуострова.

На рис. 17 показаны данные прогноза на 40 ч (стадии максимального развития мезоциклона) по модели ICON от полудня (по ВСВ) 17 сентября. Порывы ветра (рис. 17а) достигают максимальных значений в 30–33 м/с и по мере смещения вихря на юг постепенно ослабевают, но к моменту выхода на берег остаются высокими – 25–27 м/с. Максимум CAPE в мезоциклоне (рис. 17б) наблюдается к западу от центра и достигает 80–100 Дж/кг. Область формирования мезоциклона располагалась в тыловой части старого заполнившегося циклона с минимальным давлением 1010 гПа и малым градиентом давления, но к северу от Шпицбергена длительное время сохранялась обширная область низкого давления с ядром холода (минимальная геопотенциальная высота на 500 гПа – 512 гПдам). Именно её наличие сыграло большую роль в формировании циклона при слабом влиянии других факторов. И действительно, как видно на рис. 17в, местоположение мезоциклона с минимумом давления хорошо соотносится с изогипсами на 500 гПа – мезоциклон соотносится с высотной областью и получает от неё источник холодного воздуха. Максимальные скорости ветра (рис. 17г) также наблюдаются в западной части, занимают широкую полосу и достигают 27–32 м/с. После выхода мезоциклона на поверхность скорости на 500 гПа возрастут вплоть до 47 м/с, а область максимальных ветров продолжит смещаться на восток.

Как и с ранее описанными случаями, была проведена полная серия экспериментов (IceCut, IceCutTemp, IceBuild), однако задаваемые изменения в первых двух не оказали практически никакого влияния на цикл жизни и динамику полярного циклона. По всей видимости, это связано со значительно более мощным фактором, влияющим на формирование условий для развития мезоциклона. Действительно, как было описано в начале, в эксперименте IceCutTemp5 ТПО повышалась до 5 °С в районах, где наблюдались более низкие её значения, а в данном нетипичном случае ТПО была достаточно высокой, поэтому изменения в эксперименте коснулись лишь удалённых районов вдоль границы морского льда в северной части домена и никак

не отразились на мезоциклоне. В эксперименте IceCut граница льда лишь незначительно была сдвинута на север в области, значительно удалённой от района формирования ПМЦ. Лишь в эксперименте IceBuild изменения оказались достаточными, чтобы ослабить полярный циклон.

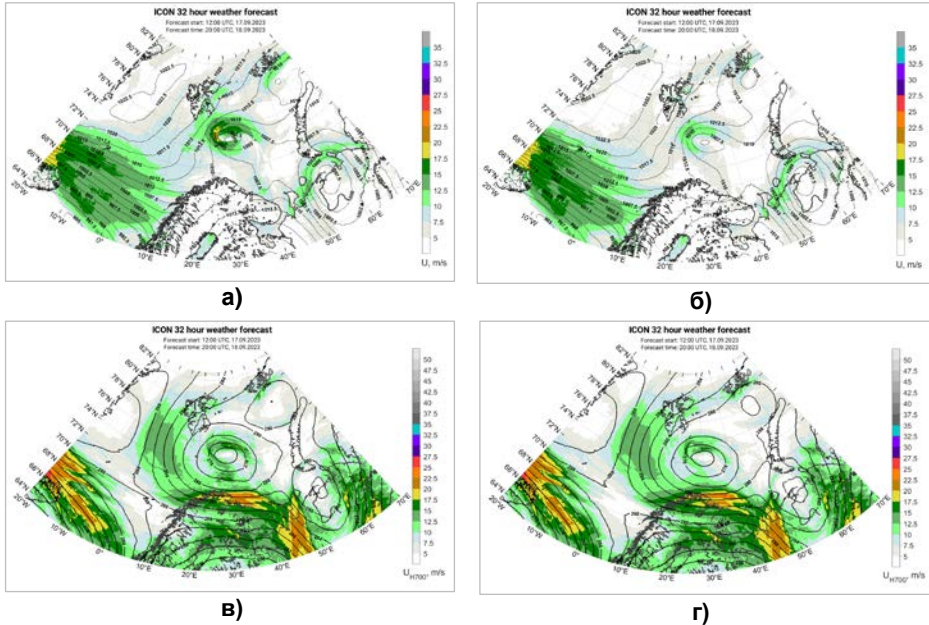


**Рис. 17.** Прогноз ICON на 4 ч ВСВ 19.09.2023 от 00 ч ВСВ 17.09.2023: порывы ветра на высоте 10 м и давление, приведённое к уровню моря (а); конвективная доступная потенциальная энергия (CAPE) (б); скорость ветра на 500 гПа (в); потенциальная завихренность на 500 гПа (чёрный цвет) и давление, приведённое к уровню моря (синий цвет) (г).

**Fig. 17.** ICON model forecast data for 4 UTC on September 19, 2023: wind gust speed and mean sea-level pressure (a); convective available potential energy (CAPE) (б); Wind speed at 500 hPa (в); Potential vorticity at 500 hPa (black) and mean sea-level pressure (blue) (г). Forecast started for 00 UTC on September 17, 2023.

В ходе эксперимента IceBuild изменения начинают проявляться уже с первого часа прогноза. ПМЦ по-прежнему формируется, однако он характеризуется более слабым ветром и более низким давлением, чем в контрольном эксперименте. Разница в давлении составляет от 2 до 5 гПа, в ветре – до 7–10 м/с (рис. 18а, б). «Отставание» от контрольного эксперимента в этом интервале значений сохраняется на протяжении всего периода

прогноза. На Н700 (рис. 18в, г) различия гораздо меньше, хотя и прослеживаются, и еще чуть более заметны на Н500, вплоть до 4–5 м/с. Таким образом, в определённых условиях в нижней и средней тропосфере даже ледовый покров не способен полностью подавить развитие ПМЦ.



**Рис. 18.** Скорость ветра на высоте 10 м (верхний ряд) и скорость ветра на 700 гПа (нижний ряд): контрольный эксперимент (а, в), эксперимент IceBuild (б, г). Прогноз ICON на 20 ч ВСВ 18 сентября 2023 г. от 00 ч ВСВ 17 сентября 2023 г.

**Fig. 18.** ICON model forecast data for 20 UTC on September 18, 2023: wind gust speed (top row) and wind speed at 700 hPa (bottom row): control experiment (a, v); IceBuild experiment (б, г). Forecast of ICON model started for 00 UTC on September 17, 2023.

## Выводы

В работе проанализированы различные случаи образования ПМЦ. ПМЦ от 17–18 марта 2022 г., возникший к востоку от Гренландии, имел существенную связь со струйным течением, поэтому даже в эксперименте с искусственно заданным льдом он продолжил существовать (несмотря на то, что его путь частично проходил надо льдом), однако скорости ветра в нём были значительно ниже, чем в контрольном эксперименте. Тем не менее вихрь преодолел путь в 3 тыс. км от востока Гренландии до Новой Земли. Само по себе отсутствие морского льда (IceCut) сильного влияния на ПМЦ не оказало. По всей вероятности, это произошло из-за существенной связи вихря со струйным течением. При искусственном повышении ТПО до 5 °С порывы ветра усиливаются на 12 м/с. В эксперименте IceCut порывы ветра в ПМЦ сильнее на 3–5 м/с, чем в контрольном эксперименте.

ПМЦ, возникшие 6–7 января 2024 г. в Норвежском и Баренцевом морях, также показали небольшую зависимость от морского льда во время эксперимента IceCut. Эти вихри образовались и проходили над свободной ото льда поверхностью и существенной связи со струйным течением не имели (за исключением ПМЦ-2). ПМЦ-1 зародился у границы морского льда к югу от Шпицбергена в тыловой части синоптического циклона. Вероятнее всего, основным механизмом его образования была бароклинная неустойчивость. Дополнительным фактором развития ПМЦ могло являться присутствие зоны несколько пониженного атмосферного давления. Поэтому в эксперименте IceCut заметных изменений в вихре не произошло, а в IceCutTemp5 отмечались ярко-выраженные перемены: выросли потоки скрытого тепла, порывы ветра в ПМЦ увеличились на 12 м/с. Таким образом, повышение ТПО увеличило интенсивность ПМЦ в тот период, когда бароклинная неустойчивость на него уже не влияла (вихрь ушел южнее от Шпицбергена). В IceBuild появление искусственно заданного льда полностью подавляет развитие ПМЦ, в отличие от такого же эксперимента для 17–18 марта 2022г., когда связь вихря со струйным течением способствовала его дальнейшему существованию.

В ходе рассмотрения третьего случая возникновения ПМЦ 18–19 января 2022 г. мы получили разный отклик вихря на отсутствие льда в зависимости от стадии его развития. В частности, в начале своего существования, благодаря усилению неустойчивости атмосферы и усилению горизонтальных градиентов температуры, вихрь быстрее активизируется, а в зрелой стадии наблюдается обратная картина, и ПМЦ быстрее угасает.

Анализ возникновения и динамики нетипичного сентябрьского случая ПМЦ показал, что на развитие вихря, скорее всего, оказала влияние обширная область низкого давления с ядром холода на изобарической поверхности 500 гПа. Так как вихрь развивался в довольно теплых условиях и вдали от границы морского льда, изменения, применяемые в экспериментах IceBuild и IceCut, не отразились на мезоциклоне. Однако искусственное наращивание льда привело к ослаблению ПМЦ: давление выросло на 2–5 гПа, а скорости ветра ослабли на 7–10 м/с.

В целом, эксперименты с границей морского льда показали, что присутствие искусственного льда в модели (IceBuild) оказывает гораздо более сильное влияние, чем его отсутствие (IceCut), в то время как прогрев ТПО до 5° с одновременным сдвигом границы льда к северу (IceCut) приводит к усилению ПМЦ, и степень этого усиления зависит от механизмов развития самого вихря. Нужно отметить, что используемые данные прогнозов ICON на момент выхода ПМЦ на поверхность и, соответственно, возможной верификации, имели заблаговременность более 2 суток, что является довольно хорошим результатом при прогнозе этого явления.

Во второй части работы, которая планируется к публикации, будут детально рассмотрены физические и динамические свойства полярных мезо-

циклонов, в первую очередь параметры, влияющие на образование и развитие ПМЦ. В частности, будут приведены оценки потоков скрытого и явного тепла, описана их роль в формировании полярных мезоциклонов и отклик на изменение в поле льда и ТПО. Кроме того, будет рассмотрена роль конвективной доступной потенциальной энергии в зависимости от природы образования ПМЦ, показаны прогностические поля завихренности в областях образования и развития мезоциклонов. Вторая часть работы станет прямым продолжением этого исследования, базируясь на результатах тех же конфигураций модели, численных экспериментов и случаев возникновения ПМЦ.

### Список литературы

1. *Нестеров Е.С.* Полярные циклоны: наблюдения, реанализ, моделирование // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 65-82. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-65-82>
2. *Никитин М.А., Ривин Г.С., Розинкина И.А., Чумаков М.М.* Использование прогностической системы COSMO-Ru для исследования свойств полярных циклонов: эпизод 25–27 марта 2014 года // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 361. С. 128-145.
3. *Никитин М. А., Ривин Г. С., Чумаков М. М.* Влияние пространственно-временных вариаций температуры поверхности моря на эволюцию полярных циклонов // Вести газовой науки. 2018. № 4 (36). С. 209-217.
4. *Adakudlu M, Barstad I.* Impacts of the ice-cover and sea-surface temperature on a polar low over the Nordic seas: a numerical case study // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2011. Vol. 137. P. 1716-1730. DOI:10.1002/qj.856
5. *Albright M.D., Reed R.J., Ovens D.W.* Origin and structure of a numerically simulated polar low over Hudson Bay // Tellus. 1995. Vol. 47A. P. 834-848. DOI:10.1034/j.1600-0870.1995.00123.x
6. *Baldauf M., Seifert A., Förstner J., Majewski D., Raschendorfer M., Reinhardt T.* Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: Description and sensitivities // Mon. Wea. Rev. 2011. Vol. 139(12). P. 3887-3905.
7. *Bond N.A., Shapiro M.A.* Polar Lows over the Gulf of Alaska in Conditions of Reverse Shear // Mon. Wea. Rev. 1991. Vol. 119. P. 551-572. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1991\)119<0551:PLOTGO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119<0551:PLOTGO>2.0.CO;2).
8. *Duncan C.A.* Numerical investigation of polar lows // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 1977. Vol. 103(436). P. 255-267. <https://doi.org/10.1002/qj.49710343604>
9. *Landgren O.A., Batrak, Y., Haugen, J.E., Støylen E., Iversen T.* Polar low variability and future projections for the Nordic and Barents Seas // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2019. Vol. 145. P. 3116-3128. DOI:10.1002/qj.3608
10. *Mears C.A., Scott J., Wentz F.J., Ricciardulli L.* A near-real-time version of the cross calibrated multiplatform (CCMP) ocean surface wind velocity data set // J. Geophys. Res. Oceans. 2019. Vol. 124, is. 10. P. 6997-7010. <https://doi.org/10.1029/2019JC015367>
11. *Moreno-Ibáñez M., Laprise R., Gachon P.* Recent advances in polar low research: Current knowledge, challenges and future perspectives // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2021. Vol. 73, no. 1. P. 1-31. <https://doi.org/10.1080/16000870.2021.1890412>
12. *Mullen S.L.* An Investigation of Small Synoptic-Scale Cyclones in Polar Air Streams // Mon. Wea. Rev. 1979. 107. P. 1636-1647. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1979\)107<1636:AI-OSSS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107<1636:AI-OSSS>2.0.CO;2)
13. *Nagata M.* Meso- $\beta$ -scale Vortices Developing along the Japan-Sea Polar-Airmass Convergence Zone (JPCZ) Cloud Band: Numerical Simulation // Journal of the Meteorological Society of Japan. 1993. Ser. II. Vol. 71, is. 1. P. 43-57. [https://doi.org/10.2151/jmsj1965.71.1\\_43](https://doi.org/10.2151/jmsj1965.71.1_43)
14. *Rasmussen E.A.* Review of Meso-Scale Disturbances in Cold Air Masses // In: Lilly, D.K., Gal-Chen, T. (eds) Mesoscale Meteorology / Theories, Observations and Models. NATO ASI Series. Vol 114. 1983. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-2241-4\\_13](https://doi.org/10.1007/978-94-017-2241-4_13)

15. Rasmussen E.A., Turner J. Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions // Cambridge University Press. 2003. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511524974>
16. Revokatova A., Nikitin M., Rivin G., Rozinkina I., Nikitin, A., Tatarinovich, E. High-Resolution Simulation of Polar Lows over Norwegian and Barents Seas Using the COSMO-CLM and ICON Models for the 2019–2020 Cold Season // Atmosphere. 2021. Vol 12(2). Vol. 137. <https://doi.org/atmos12020137>
17. Roch M., Benoit R., Parker N. Sensitivity experiments for polar low forecasting with the CMC mesoscale finite-element model // Atmosphere-Ocean. 1991. Vol. 29(3). P. 381-419. <https://doi.org/10.1080/07055900.1991.9649410>
18. Rojo M., Claud C., Mallet P.E., Noer G., Carleton A.M., Vicomte M. Polar low tracks over the Nordic Seas: a 14-winter climatic analysis // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2015. Vol. 67(1). <https://doi.org/10.3402/tellusa.v67.24660>
19. Rojo M., Noer G., Claud C. Polar Low tracks in the Norwegian Sea and the Barents Sea from 1999 until 2019 [dataset] // PANGAEA. 2019. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.903058>
20. Sergeev D., Renfrew I.A., and Spengler T. Modification of Polar Low Development by Orography and Sea Ice // Mon. Wea. Rev. 2018. Vol. 146. P. 3325-3341. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0086.1>
21. Stoll P.J., Graversen R.G., Noer G., Hodges K. An objective global climatology of polar lows based on reanalysis data // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2018. Vol. 144. P. 2099-2117. <https://doi.org/10.1002/qj.3309>
22. Zängl, D. Reinert, P. Rípodas, and M. Baldauf. The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core // Q. J. Roy. Meteor. Soc. 2015. Vol. 141(687). P. 563-579. <https://doi.org/10.1002/qj.2378>

### References

1. Nesterov E.S. Poljarnye ciklony: nabljudeniya, reanaliz, modelirovanie [Polar cyclones: observations, reanalysis, modeling]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydro-meteorological Research and Forecasting]*, 2020, vol. 375, no. 1, pp. 65-82. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-65-82> [in Russ].
2. Nikitin M.A., Rivin G.S., Rozinkina I.A., Chumakov M.M. Ispol'zovanie prognosticheskoy sistemy COSMO-Ru dlja issledovaniya svojstv poljarnyh ciklonov: jepizod 25-27 marta 2014 goda [Using COSMO-Ru prognostic system for research of polar lows characteristics: case study of 25-27 March, 2014]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossijskoy Federacii [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation]*, 2016, № 361, pp. 128-145 [in Russ].
3. Nikitin M.A., Rivin G.S., Chumakov M.M. Vlijanie prostranstvenno-vremennyh variacij temperatury poverhnosti morja na jevoljuciju poljarnyh ciklonov [Influence of spatio-temporal sea surface temperature variations on polar low evolution]. *Vesti gazovoj nauki [Gas Science News]*, 2018, № 4 (36), pp. 209-217 [in Russ].
4. Adakudlu M, Barstad I. Impacts of the ice-cover and sea-surface temperature on a polar low over the Nordic seas: a numerical case study. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2011, vol. 137, pp. 1716-1730. DOI:10.1002/qj.856
5. Albright M.D., Reed R.J., Ovens D.W. Origin and structure of a numerically simulated polar low over Hudson Bay. *Tellus*, 1995, 47A, pp. 834-848. DOI:10.1034/j.1600-0870.1995.00123.x
6. Baldauf M., Seifert A., Förstner J., Majewski D., Raschendorfer M., Reinhardt T. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: Description and sensitivities. *Mon. Wea. Rev.*, 2011, vol. 139 (12), pp. 3887-3905.
7. Bond N.A., Shapiro M.A. Polar Lows over the Gulf of Alaska in Conditions of Reverse Shear. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, vol. 119, pp. 551-572. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1991\)119<0551:PLOTGO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119<0551:PLOTGO>2.0.CO;2).
8. Duncan C.A. Numerical investigation of polar lows. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1977, vol. 103 (436), pp. 255-267. DOI: 10.1002/qj.49710343604
9. Landgren O.A., Batrak, Y., Haugen, J.E., Støylen E., Iversen T. Polar low variability and future projections for the Nordic and Barents Seas. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2019, vol. 145, pp. 3116-3128. DOI:10.1002/qj.3608

10. Mears C.A., Scott Joel, Wentz J. Frank, Ricciardulli L. A near real time version of the cross calibrated multiplatform (CCMP) ocean surface wind velocity data set. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, vol. 124, no. 10, pp 6997-7010. <https://doi.org/10.1029/2019JC015367>

11. Moreno-Ibáñez M., Laprise R., Gachon P. Recent advances in polar low research: Current knowledge, challenges and future perspectives. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2021, vol. 73, no. 1, pp. 1-31. <https://doi.org/10.1080/16000870.2021.1890412>

12. Mullen S.L. An Investigation of Small Synoptic-Scale Cyclones in Polar Air Streams. *Mon. Wea. Rev.*, 1979, vol. 107, pp. 1636-1647. DOI: 10.1175/1520-0493(1979)107<1636:AI-OSSS>2.0.CO;2

13. Nagata M. Meso- $\beta$ -scale Vortices Developing along the Japan-Sea Polar-Airmass Convergence Zone (JPCZ) Cloud Band: Numerical Simulation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1993, Ser. II, vol. 71, no. 1, pp. 43-57. DOI: 10.2151/jmsj1965.71.1\_43

14. Rasmussen E.A. Review of Meso-Scale Disturbances in Cold Air Masses. *Mesoscale Meteorology. Theories, Observations and Models*, NATO ASI Series, vol. 114, Springer, Dordrecht, 1983. DOI: 10.1007/978-94-017-2241-4\_13

15. Rasmussen E.A., Turner J. Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. *Cambridge University Press*, 2003. DOI: 10.1017/CBO9780511524974

16. Revokatova A., Nikitin M., Rivin G., Rozinkina I., Nikitin, A., Tatarinovich, E. High-Resolution Simulation of Polar Lows over Norwegian and Barents Seas Using the COSMO-CLM and ICON Models for the 2019–2020 Cold Season. *Atmosphere*, 2021, vol. 12 (2), 137 p. DOI: [atmos12020137](https://doi.org/10.3390/atmos12020137)

17. Roch M., Benoit R., Parker N. Sensitivity experiments for polar low forecasting with the CMC mesoscale finite-element model. *Atmosphere-Ocean*, 1991, vol. 29(3), pp. 381-419. DOI: 10.1080/07055900.1991.9649410

18. Rojo M., Claud C., Mallet P.E., Noer G., Carleton A.M., Vicomte M. Polar low tracks over the Nordic Seas: a 14-winter climatic analysis. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2015, vol. 67 (1). DOI: 10.3402/tellusa.v67.24660

19. Rojo M.; Noer G., Claud C. Polar Low tracks in the Norwegian Sea and the Barents Sea from 1999 until 2019 [dataset]. *PANGAEA*, 2019. DOI: 10.1594/PANGAEA.903058

20. Sergeev D., Renfrew I.A., Spengler T. Modification of Polar Low Development by Orography and Sea Ice. *Mon. Wea. Rev.*, 2018, vol. 146, pp. 3325-3341. DOI: 10.1175/MWR-D-18-0086.1.

21. Stoll P.J., Graverson R.G., Noer G., Hodges K. An objective global climatology of polar lows based on reanalysis data. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2018, vol. 144, pp. 2099-2117. DOI: 10.1002/qj.3309

22. Zängl D. Reinert P. Rípodas, Baldauf M. The ICON (ICOsahedral Non- hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2015, vol. 141 (687), pp. 563-579. DOI: 10.1002/qj.2378

Поступила 24.10.2025; принята в печать 17.03.2026.  
Submitted 24.10.2025; accepted for publication 17.03.2026.