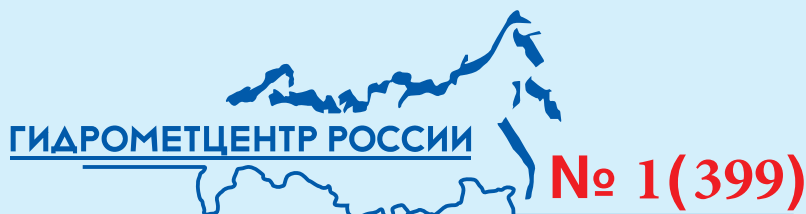


ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗЫ



ISSN 2618-9631 (Print)
ISSN 2782-6716 (Online)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Федеральное государственное бюджетное учреждение
"ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ"

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗЫ

Продолжение серии периодического журнала
«Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра
Российской Федерации»

№ 1 (399)

Под редакцией
д-ра геогр. наук Е.С. Нестерова

HYDROMETEOROLOGICAL RESEARCH and FORECASTING

No. 1 (399)

Москва
2026

Гидрометеорологические исследования и прогнозы – научный рецензируемый журнал, продолжает серию периодического журнала «Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации» (ISSN 0371-7089). Издается с 1947 года.

Излагаются результаты исследований в различных областях гидрометеорологии. Для оперативно-го метеообеспечения авиации рассматриваются различные подходы к определению характеристик тропопазы, рассчитанных на основе выходных данных глобальной модели численного прогноза погоды. Дается оценка качества воспроизведения замерзающих осадков климатической моделью INM-CM5 на территории России. Приводятся результаты исследования крупномасштабных метеорологических особенностей летнего сезона 2025 года в Северном полушарии. Изучается чувствительность конфигурации модели ICON-Ru с шагом 2 км к изменениям площади морского льда и температуры поверхности океана при прогнозировании образования и развития полярных мезоциклонов. Исследуются причины колебаний уровня Каспийского моря в периоды его подъема (1978–1995 гг.) и понижения (1950–1977 и 1996–2023 гг.). Представлен анализ изменения температуры воды в заливе Анива Охотского моря по данным инструментальных наблюдений с 1949 по 1994 г. и по спутниковым данным с 1981 по 2025 г., а также по данным измерений в 2023 г. Получена оценка качества прогнозов хода уровней воды в период весеннего половодья 2025 г. по методике ПАО «Сбербанк» для 1083 речных створов России. Предложены усовершенствованная модель формирования стока и сверхдолгосрочный прогноз метеорологических характеристик по модели INM-CM5. Выполнена оценка возможности применения методов машинного обучения для прогноза ледовых явлений на реках Кольского полуострова.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР: *Вильфанд Р.М.*, д-р техн. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА: *Васильев А.А.*, д-р геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Болгов М.В., д-р техн. наук, Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

Бориц С.В., канд. геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Васильев П.П., д-р физ.-мат. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Володин Е.М., д-р физ.-мат. наук, Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва, Россия

Гельфан А.Н., член-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, г. Москва, Россия

Займских Г.А., канд. техн. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия (секретарь редколлегии)

Зайцева Н.А., д-р геогр. наук, Отделение наук о Земле РАН, г. Москва, Россия

Иванова А.Р., д-р физ.-мат. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Калинин Н.А., д-р геогр. наук, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

Клещенко А.Д., д-р геогр. наук, ВНИИСХМ Росгидромета, г. Обнинск, Россия

Кузнецова И.Н., д-р геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Логинов В.Ф., академик НАН Беларуси, д-р геогр. наук, Центр климатических исследований НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

Мотовилов Ю.Г., д-р геогр. наук, Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

Муравьев А.В., д-р физ.-мат. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Нестеров Е.С., д-р геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Полонский А.Б., член-корр. РАН и НАН Украины, д-р геогр. наук, Институт природно-технических систем, г. Севастополь, Россия

Реснянский Ю.Д., д-р физ.-мат. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Ривин Г.С., д-р физ.-мат. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Симонов Ю.А., д-р геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Страйная А.И., канд. геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Толстых М.А., д-р физ.-мат. наук, Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва, Россия

Успенский А.Б., д-р физ.-мат. наук, НИЦ «Планета», г. Москва, Россия

Хан В.М., д-р геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Христофоров А.В., д-р геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Шакина Н.П., д-р физ.-мат. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Caio Augusto dos Santos Coelho, Senior Scientist, Center For Weather Forecasts And Climate Studies CPTEC/INPE – BRAZIL, Brazil

Simon O. Krichak, Research Professor, Porter School of the Environment and the Earth Sciences, Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel

Hydrometeorological Research and Forecasting – the scientific peer-reviewed journal continues the series «Proceedings of the Hydrometeorological center of Russia» established in 1947.

The results of studies in various fields of hydrometeorology are presented. For the operational meteorological support of aviation, various approaches to determining the tropopause characteristics calculated on the basis of output data of the global numerical weather prediction model are considered. An assessment of the quality of simulating freezing precipitation in Russia with the INM-CM5 climate model is given. The results of studying large-scale meteorological features of the 2025 Northern Hemisphere summer season are presented. The sensitivity of the ICON-Ru model configuration with grid spacing of 2 km to changes in sea ice extent and sea surface temperature in predicting the formation and development of polar lows is investigated. The causes for the fluctuations in the Caspian Sea level during the periods of its rise (1978–1995) and fall (1950–1977 and 1996–2023) are studied. The analysis of changes in water temperature in the Aniva Bay (the Sea of Okhotsk) based on instrumental observations in 1949–1994 and satellite data for 1981–2025, as well as on measurements in 2023 is presented. A skill of forecasts of water level variations during the 2025 spring flood is evaluated by the Sberbank methodology for 1083 river gauges in Russia. An improved runoff formation model and a long-term forecast of meteorological characteristics based on the INM-CM5 model are proposed. A possibility of using machine learning methods to predict ice phenomena on the Kola Peninsula rivers is evaluated.

EDITOR IN CHIEF: *Roman M. Vilfand*, Doctor of Engineering Sciences, Hydrometeorological center of Russia, Moscow, Russia

EDITORIAL BOARD:

Vasiliev A.A., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometeorological center of Russia, Moscow, Russia

Bolgov M.V., Doctor of Engineering Sciences, Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Borsch S.V., PhD in Geography, Hydrometeorological center of Russia, Moscow, Russia

Vasiliev P.P., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometeorological center of Russia, Moscow, Russia

Volodin E.M., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Marchuk Institute of Numerical Mathematics of RAS, Moscow, Russia

Gelfan A.N., Associate Member of RAS, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

Zaimskikh G.A., PhD in Engineering Sciences, Hydrometeorological center of Russia, Moscow, Russia

Zaytseva N.A., Doctor of Geographical Sciences, Department of Earth Sciences of the Russian Academy of Sciences (RAS), Moscow, Russia

Ivanova A.R., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometeorological center of Russia, Moscow, Russia

Kalinin N.A., Doctor of Geographical Sciences, Perm State University, Perm, Russia

Kleshchenko A.D., Doctor of Geographical Sciences, All-Russian Scientific-Research Agricultural Institute, Obninsk, Kaluga region

Kuznetsova I.N., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometeorological center of Russia, Moscow, Russia

Loginov V. F., Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Center of Climate Research, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Motovilov Yu.G., Doctor of Geographical Sciences, Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia

Muraviev A.V., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometeorological center of Russia, Moscow, Russia

Nesterov E.S., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometeorological center of Russia, Moscow, Russia

Polonsky A.B., Associate Member of RAS and National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Geographical Sciences, Institute of Natural-Technical Systems, Sevastopol, Russia

Resnyansky Yu.D., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometeorological center of Russia, Moscow, Russia

Rivin G.S., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometeorological center of Russia, Moscow, Russia

Simonov Yu.A., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometeorological center of Russia, Moscow, Russia

Strashnaya A.I., PhD in Geography, Hydrometeorological center of Russia, Moscow, Russia

Tolstykh M.A., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Marchuk Institute of Numerical Mathematics of RAS, Moscow, Russia

Uspensky A.B., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, State Research Center "Planeta", Moscow, Russia

Khan V.M., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometeorological center of Russia, Moscow, Russia

Khristorov A. V., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometeorological center of Russia, Moscow, Russia

Shakina N.P., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometeorological center of Russia, Moscow, Russia

Caio Augusto dos Santos Coelho, Senior Scientist, Center For Weather Forecasts And Climate Studies CPTEC/INPE – BRAZIL, Brazil

Simon O. Krichak, Research Professor, Porter School of the Environment and the Earth Sciences, Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel

СОДЕРЖАНИЕ

Метеорологические прогнозы, математическое моделирование

- Концепция глобального прогноза тропопаузы в Российском центре зональных прогнозов 6
Иванова А.Р., Соколова У.О., Комасько Н.И., Скриптунова Е.Н., Шакина Н.П., Завьялова А.А.
- Оценка изменений повторяемости замерзающих осадков на территории России в XX–XXI веке с использованием модели INM-CM5 ... 30
Гибадуллина А.И., Леонов И.И., Кислов А.В., Соколиксина Н.Н.
- Крупномасштабная атмосферная циркуляция летом 2025 года в Северном полушарии и ее роль в формировании экстремальных погодных условий на территории России 51
Сумерова К.А., Хан В.М., Тищенко В.А., Вильфанд Р.М.

Расчеты и прогнозы элементов режима морей и океанов

- Оценка чувствительности модели ICON-Ru к изменениям площади морского льда и температуры поверхности океана при прогнозе образования и развития полярных мезоциклонов 69
Никитин М.А., Ревокатова А.П., Ломакин И.Р., Розинкина И.А., Ривин Г.С.
- Связь уровня и составляющих водного баланса Каспийского моря с индексами крупномасштабной атмосферной циркуляции (1950–2023 гг.) ... 102
Островская Е.В., Павлова А.В.
- Климатические изменения температуры воды в заливе Анива 123
Мысленков С.А., Пицальник В.М., Архипкин В.С., Латковская Е.М.

Гидрологические прогнозы

- Анализ результатов прогнозирования весеннего половодья 2025 года с помощью модели искусственного интеллекта 140
Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Колий В.М., Ковалев К.А., Малыгин Е.В., Осипцов А.А., Сотириади Н.С.
- Адаптация модели формирования стока для некоторых рек юга Европейской территории России 159
Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Шатохин М.В.
- Прогнозирование сроков формирования первичных ледовых явлений на реках Кольского полуострова 171
Канашин С.А., Банищикова Л.С., Сумачев А.Э.

CONTENTS

Meteorological forecasts, mathematical modeling

- A concept of global tropopause prediction in the Russian Area Forecast Center 6
Ivanova A.R., Sokolova U.O., Komasko N.I., Skriptunova E.N., Shakina N.P., Zavialova A.A.
- An evaluation of changes in the frequency of freezing precipitation in Russia in the 20th–21st centuries using the INM-CM5 model 30
Gibadullina A.I., Leonov I.I., Kislov A.V., Sokolikhina N.N.
- Large-scale Atmospheric Circulation over the Northern Hemisphere in Summer of 2025 and Its Contribution to Extreme Weather in Russia 51
Sumerova K.A., Khan V.M., Tishchenko V.A., Vilfand R.M.

Computing and forecasting of the marine environment parameters

- 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 69
Nikitin M.A., Revokatova A.P., Lomakin I.R., Rozinkina I.A., Rivin G.S.
- Relationship of the Caspian Sea level and water balance components with large-scale atmospheric circulation indices (1950–2023) 102
Ostrovskaya E.V., Pavlova A.V.
- Climatic changes in water temperature in Aniva Bay 123
Myslenkov S.A., Pishchal'nik V.M., Arkhipkin V.S., Latkovskaya E.M.

Hydrological forecasts

- Analysis of the spring flood of 2025 forecasting using an artificial intelligence model 140
Simonov Yu.A., Khristoforov A.V., Koliy V.M., Kovalev K.A., Malygin E.V., Osiptsov A.A., Sotiriadi N.S.
- Adaptation of the runoff formation model for several southern rivers of Russia 159
Semenova N.K., Simonov Yu.A., Shatokhin M.V.
- Forecasting the dates of initial ice formation on the Kola Peninsula rivers 171
Kanashin S.A., Banshchikova L.S., Sumachev A.E.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-1-6-29>

УДК 551.510.528

Концепция глобального прогноза тропопаузы в Российском центре зональных прогнозов

***А.Р. Иванова, У.О. Соколова, Н.И. Комасько,
Е.Н. Скриптунова, Н.П. Шакина, А.А. Завьялова***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
ivanova@mecom.ru*

В статье рассматриваются различные подходы к определению тропопаузы (ВМО, PTGT, динамическая) для оперативного метеобеспечения авиации этой информацией, рассчитанной на основе выходных данных глобальной модели численного прогноза погоды. Обсуждаются ограничения каждого подхода, представлено обоснование смены знака потенциального вихря Эртеля при переходе через экватор. Приводится аргументация выбора изэртелической поверхности, отождествляющей тропопаузу во внетропической зоне, и изэнтропической поверхности – для прогноза тропопаузы в тропиках. Представлен пример прогноза характеристик тропопаузы на базе комбинирования двух концепций для всего земного шара.

Ключевые слова: Российский центр зональных прогнозов, тропопауза, глобальная модель ЧПП, радиозондирование атмосферы, потенциальный вихрь Эртеля, изэнтропическая поверхность

A concept of global tropopause prediction in the Russian Area Forecast Center

***A.R. Ivanova, U.O. Sokolova, N.I. Komasko,
E.N. Skriptunova, N.P. Shakina, A.A. Zavialova***

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;
ivanova@mecom.ru*

The paper examines various tropopause definitions (WMO, PTGT, and dynamic) for operational weather information support for aviation based on the output of a global numerical weather prediction model. The limitations of each approach are discussed, and a rationale for a change in the sign of the Ertel's potential vorticity upon crossing the equator is presented. The validity for choosing an isertelic surface identifying the extratropical tropopause and an isentropic surface for forecasting the tropical tropopause is presented. An example of a forecast of tropopause characteristics based on a combination of two concepts for the entire globe is given.

Keywords: Russian Area Forecast Center, tropopause, global NWP model, radiosonde observations, Ertel's potential vorticity, isentropic surface

Введение

Российский центр зональных прогнозов был создан Приказом Руководителя Росгидромета от 31.10.2023 для решения задач импортозамещения продукции Всемирной системы зональных прогнозов, прекратившей поставлять с 11 марта 2022 г. прогнозы для метеообеспечения отечественной авиации, в том числе глобальные поля особых явлений (SigWX). Эта информация, помимо прочего, включает прогнозы характеристик тропопаузы (значения высоты и температуры) [5].

В отделе авиационной метеорологии Гидрометцентра России существует опыт оперативного прогнозирования компонентов карт SigWX на базе моделей численного прогноза погоды (ЧПП) по Северному полушарию. Это позволило для решения задачи импортозамещения сразу определиться с концепцией прогноза глобальной тропопаузы. Вне тропиков этот прогноз может быть основан на использовании идеи «динамической» тропопаузы [9], аппроксимируемой поверхностью равных значений вертикальной составляющей потенциального вихря Эртеля (ПВЭ). Однако, поскольку параметр Кориолиса, используемый при расчете ПВЭ, меняет знак при переходе через экватор, потребовалась тщательная и кропотливая работа по калибровке значений высоты тропопаузы с привлечением данных сети радиозондирования в Южном полушарии. Затем было выполнено сопоставление результатов с откалиброванной подобным образом информацией над территорией Северного полушария. Для прогноза характеристик тропопаузы вблизи экватора по данным радиозондирования была определена изэнтропическая поверхность, высота которой соответствует высоте тропопаузы.

В данной статье описываются используемые материалы, различные концепции тропопаузы, на базе которых производились расчеты ее характеристик, оценен вклад составляющих потенциального вихря Эртеля при расчете высоты динамической тропопаузы, сформулирован подход прогнозирования глобального поля тропопаузы на основе комбинации двух концепций с обоснованно выбранными пороговыми значениями критериев.

Некоторые подходы к определению тропопаузы, используемые в оперативной практике

Хотя тропопауза была открыта еще в начале прошлого века Тейсереном де Бором, представившим в 1904 г. в Санкт-Петербурге на конференции по метеорологии доклад «О характеристике температуры в свободной атмосфере выше 10 км», в настоящее время, как подчёркивалось в [18], определение положения тропопаузы остается по-прежнему в фокусе внимания наук об атмосфере. Идентификация границы между тропосферой и стратосферой может быть проведена на основании различий характеристик

этих «сфер» с точки зрения динамического и термического режимов, а также химического состава [3]. Именно эти различия позволили сформулировать ряд предположений для определения тропопаузы, которую аппроксимируют, в зависимости от задач, либо поверхностью, либо слоем определенной толщины. Однако не все подобные подходы пригодны для решения задачи оперативного метеообеспечения авиации, где требуется однозначность в определении положения тропопаузы. Приведем краткое описание некоторых вариантов, которые могут быть использованы для целей ее оперативного прогнозирования на базе моделей ЧПП с высоким вертикальным разрешением.

Классическое определение тропопаузы (определение ВМО)

Классическое определение тропопаузы было сформулировано в 1957 г. Всемирной метеорологической организацией (ВМО) [19]: «это минимальная высота, на которой вертикальный градиент температуры падает до $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ (или ниже) и среднее значение этого параметра в вышележащем слое толщиной 2 км не превышает $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$. В некоторых случаях наблюдается вторая тропопауза, если вертикальный градиент над первой тропопаузой превышает $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ ». Такая тропопауза обычно определяется по данным радиозондирования, и сведения о ней входят в сводки ТАЭ, передаваемые по коду КН-03 [1, 7], а успешный прогноз ее возможен при использовании моделей ЧПП с достаточным количеством вертикальных уровней в верхней тропосфере и нижней стратосфере. Недостатки этого определения были обозначены уже через пару лет после его опубликования, в том числе это касалось идентификации тропопаузы в полярных районах [7]. Анализ характеристик тропопаузы в Южном полушарии по данным радиозондирования был проведен ранее в [4, 6]. Были обнаружены некоторые специфические черты тропопаузы над Антарктидой, связанные с особенностями циркуляции над этим ледовым континентом и приводящие к некой асимметрии распределения значений её высоты на глобальном масштабе.

Определение тропопаузы по градиенту потенциальной температуры

Проблема недостаточно изученной до сих пор тропопаузы в Южном полушарии, особенно над Антарктидой в период полярной ночи, внесла свои коррективы в использование данных радиозондирования. Еще в 1942 г. по данным американской метеорологической экспедиции в Антарктиду была опубликована работа «Исчезновение тропопаузы антарктической зимой», где подтверждалась невозможность по профилю температуры определить в это время уровень радиационного равновесия, которым является тропопауза [11]. Анализ экстремумов высоты «классической» тропопаузы, выполненный в [6], показал, что минимальные значения на любой станции могут находиться вблизи нижнего уровня отсчета градиента

температуры, а максимальные – превышать 16–17 км даже над Южным полюсом. По этой причине, наряду с данными радиозонда об обычной температуре, было предложено использовать информацию о потенциальной температуре, а положение тропопаузы устанавливалось согласно [18], где сформулирована концепция PTGT (potential temperature gradient at tropopause, градиент потенциальной температуры на тропопаузе):

«Первая тропопауза — это самый низкий уровень, при котором градиент потенциальной температуры увеличивается до 10 К/км, при условии, что градиент потенциальной температуры между этим уровнем и всеми более высокими уровнями в пределах 2 км не опускается ниже 10 К/км; и если выше первой тропопаузы градиент потенциальной температуры между любым уровнем и всеми более высокими уровнями в пределах 1 км опускается ниже 10 К/км, то вторая тропопауза может быть определена аналогично первой, но с использованием порогового значения градиента потенциальной температуры 15 К/км». Авторы [18] проводили подробные исследования, привлекая для определения положения тропопаузы, помимо радиозондовых данных, информацию со спутников и озонзондов. Оказалось, что нижняя («первая») тропопауза весьма близка по своему положению к озонопаузе и находится чаще всего под тропопаузой, определенной по критерию ВМО.

Динамическая тропопауза

Эта концепция наиболее пригодна для целей оперативного обеспечения авиации, где требуется однозначное определение тропопаузы с указанием высоты и температуры, в отличие от определений, представленных выше. Проблема «множественности» и «разрывов» тропопаузы в этом случае исключается. Динамическая тропопауза отождествляется квазиматериальной поверхностью, которая претерпевает не разрывы, а деформацию с образованием областей понижений («воронки», «стримеры») или подъемов («купола») [2, 14].

Динамическая тропопауза использует в качестве критерия определенную пороговую величину потенциального вихря Эртеля, q (чаще всего, его вертикальной составляющей), значения которого в стратосфере на порядок выше, чем в тропосфере:

$$q = -g(\zeta + f) \partial \theta / \partial p.$$

Здесь g – ускорение свободного падения; ζ – относительная завихренность; f – параметр Кориолиса; θ – потенциальная температура; p – давление. Единицей измерения является 1 pvu (potential vorticity unit) = $10^{-6} \text{ К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{кг}^{-1}$. Следует отметить, что в приэкваториальной зоне, где параметр Кориолиса стремится к нулю, этот подход не используется. Динамическую тропопаузу во внетропических широтах обычно аппроксимируют изэртелической поверхностью в диапазоне 1–4 pvu. Это зависит как от поставленной задачи, так и от свойств модели ЧПП, по которой дается

прогноз. Многочисленные исследования доказали, что поверхность 2 рvи в Северном полушарии практически совпадает с озонопаузой, а поверхность, соответствующая определению ВМО, лежит несколько выше – в области 3–4 рvи [3]. Для того, чтобы «откалибровать» динамическую тропопаузу в Южном полушарии и найти изэртлическую поверхность, максимально приближенную к тропопаузе ВМО, требуется провести сравнение температурных профилей, полученных путем аэрологического зондирования, с вертикальными профилями ПВЭ в узлах сетки по данным модели ЧПП или реанализа.

Используемые материалы

Данные радиозондирования

Для выполнения работы авторами были использованы данные станций радиозондирования Всемирной службы погоды, расположенных в Северном и Южном полушариях (по 2 станции в 10-градусной широтной полосе) за период с 2015 по 2024 год (рис. 1). Выбор станций был обусловлен их репрезентативностью, регулярностью проведения зондирования, качеством и полнотой данных. Контроль информации обнаружил, что в тропической зоне не всегда можно выбрать хотя бы одну такую станцию в Западном или Восточном полушарии (рис. 1).

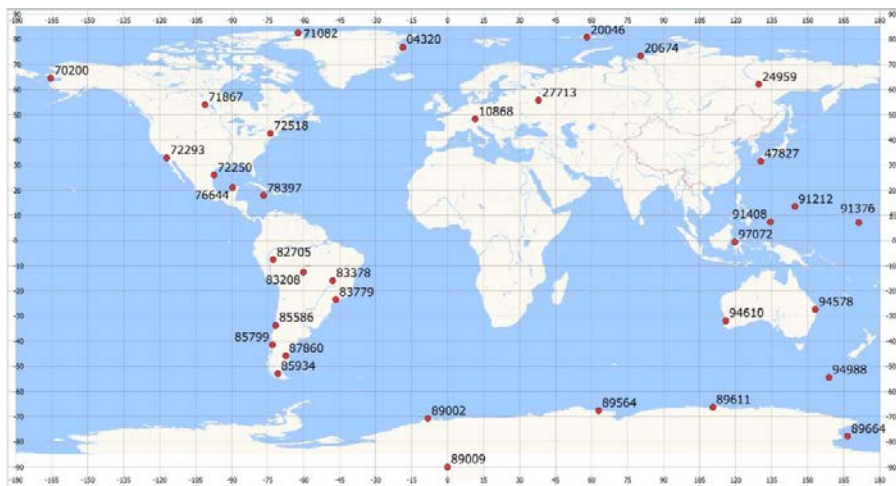


Рис. 1. Расположение станций радиозондирования.

Fig. 1. Position of upper-air sounding stations under consideration.

Координаты пунктов наблюдений представлены в табл. 1. Область вокруг полюсов (80–90° широты) оказалась обеспечена данными в нужном объеме только в Северном полушарии. В Антарктиде этой территории соответствует единственная станция, расположенная на Южном полюсе (Амундсен-Скотт).

Таблица 1. Координаты станций радиозондирования, данные которых использованы в работе**Table 1.** Location of upper-air sounding stations under consideration

Широтная зона, град	Южное полушарие	Северное полушарие
0–10	97072 WAML Palu (0.68° ю. ш., 119.73° в. д.)	91376 PKMJ Majuro (7.07° с. ш., 171.29° в. д.)
	82705 Cruzeiro Do Sul (7.62° ю. ш., 72.67° з. д.)	91408 PTRO Babeldaob (7.37° с. ш., 134.54° в. д.)
10–20	83208 SBVH Vilhena (Aeroporto) (12.70° ю. ш., 60.10° з. д.)	91212 PGUM Guam Intl Arpt (13.48° с. ш., 144.79° в. д.)
	83378 SBBR Brasilia (Aeroporto) (15.86° ю. ш., 47.93° з. д.)	78397 MKJP Kingston (17.93° с. ш., 76.78° з. д.)
20–30	83779 SBMT Marte Civ (23.52° ю. ш., 46.63° з. д.)	76644 MMMD Aerop.Internacional Yuc (20.98° с. ш., 89.65° з. д.)
	94578 YBBN Brisbane Airport (27.38° ю. ш., 153.13° в. д.)	72250 Brownsville Intl, TX (BRO) (25.91° с. ш., 97.41° з. д.)
30–40	94610 YPPH (31.93° ю. ш., 115.96° в. д.)	47827 Kagoshima (31.55° с. ш., 130.55° в. д.)
	85586 SCSN (33.65° ю. ш., 71.61° з. д.)	72293 NKX San Diego (32.85° с. ш., 117.12° з. д.)
40–50	85799 SCTE (41.43° ю. ш., 73.10° з. д.)	72518 ALB Albany (42.69° с. ш., 73.83° з. д.)
	87860 SAVC (45.78° ю. ш., 67.50° з. д.)	10868 Muenchen-Oberschleissheim (48.25° с. ш., 11.55° в. д.)
50–60	85934 SCCI (53.00° ю. ш., 70.85° з. д.)	71867 YQD The Pas Observations (53.97° с. ш., 101.09° з. д.)
	94998 YMMQ (54.50° ю. ш., 158.95° в. д.)	27713 Dolgoprudny (55.75° с. ш., 37.95° в. д.)
60–70	89611 Casey (66.28° ю. ш., 110.52° в. д.)	24959 UEEE Yakutsk (62.01° с. ш., 129.71° в. д.)
	89564 Mawson (67.60° ю. ш., 62.88° в. д.)	70200 PAOM Nome (64.50° с. ш., 165.43° з. д.)
70–80	89002 Neumayer (70.66° ю. ш., 8.25° з. д.)	20674 Ostrov Dikson (73.50° с. ш., 80.40° в. д.)
	89664 McMurdo (77.85° ю. ш., 166.66° в. д.)	04320 BGDH Danmarkshavn (76.76° с. ш., 18.66° з. д.)
80–90	89009 Amundsen-Scott (90.00° ю. ш., 0.00 д.)	20046 Polargmo Im. Krenkelja, DK (80.61° с. ш., 58.05° в. д.)
		71082 Alert, NT (VLT) (82.50° с. ш., 62.35° з. д.)

Начальные и выходные данные глобальной полулагранжевой модели ЧПП

Модель численного прогноза погоды ПЛАВ (ПолуЛагранжева, основанная на уравнении Абсолютной завихренности) в настоящее время используется преимущественно для прогнозирования на средние сроки, однако исторически, с момента появления ее первой версии, на основе выходной продукции полулагранжевой модели оперативно производились расчеты компонентов для карты SigWX по Северному полушарию.

Глобальная модель ПЛАВ10 была создана в Институте вычислительной математики РАН и Гидрометцентре России [8] и является развитием предыдущих версий. Шаг горизонтальной сетки варьируется в зависимости от широты и составляет около 10–13 км в средних широтах. Для решения авиационных задач начальные и выходные данные модели были переинтерполированы на сетку с шагом 0.25 градуса, как того требует регламент ИКАО [5]. Размерность сетки модели, таким образом, составила 1440×361 узлов. Отсчет долготы идет от Гринвичского меридиана, отсчет широты – от Южного полюса. Модель имеет 104 вертикальных уровня с верхней границей на 0.05 гПа. В слое наиболее вероятного положения тропопauses (100–400 гПа) находятся 6 расчетных уровней модели.

Для расчета характеристик тропопauses использовались следующие начальные и выходные поля модели на стандартных изобарических поверхностях 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70 гПа:

- температура,
- геопотенциальная высота,
- зональная и меридиональная составляющие скорости ветра.

Поля реанализа ERA5

Поскольку поля объективного анализа Гидрометцентра России, используемые для создания начальных полей модели ПЛАВ, с 2022 г. формируются на основе ограниченной информации, их качество (следовательно, и качество выходной продукции) не всегда является удовлетворительным. По этой причине дополнительно использовался «эталонный» реанализ ERA5. Это реанализ пятого поколения глобальных атмосферных наблюдений, созданный Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды. Были использованы данные на сетке 0.25 градуса на стандартных изобарических поверхностях – таких же, как и в модели ПЛАВ, за исключением последнего уровня (вместо отсутствующей в реанализе изобарической поверхности 70 гПа использовались данные на поверхности 50 гПа).

Количественные характеристики тропопauses, определенной по температурному градиенту

Поиск условий, соответствующих положению тропопauses, производился пошагово на профиле температуры (потенциальной температуры), полученном путем сплайн-аппроксимации данных радиозондирования, начиная с высоты 3 км (на Южном полюсе – с 4.5 км [6]). Оказалось, что в среднем практически всегда тропопause, определенная по градиенту потенциальной температуры, располагается ниже классической тропопauses ВМО (табл. 2). Это закономерно, поскольку при разработке концепции РТГТ тропопause калибровалась по данным измерений озонозондов, а озонопause, как указывалось ранее, расположена ниже тропопauses ВМО.

Таблица 2. Средние значения высоты (м) тропопаузы ВМО и РТГТ за 2015–2024 гг.**Table 2.** Average WMO tropopause and PTGT tropopause heights, m (2015–2024)

Широтная зона, град	Станция	Южное полушарие			Станция	Северное полушарие		
		ВМО	РТГТ	Разница		ВМО	РТГТ	Разница
0–10	97072	16403	15591	811	91376	16197	15625	572
	82705	16308	15445	863	91408	16222	15610	612
10–20	83208	15932	15125	806	91212	16164	15570	594
	83378	15395	14856	539	78397	15877	14943	934
20–30	83779	15317	14088	1229	76644	15836	14624	1211
	94578	14276	13004	1273	72250	14742	13694	1048
30–40	94610	12980	11811	1169	47827	13898	12947	951
	85586	12361	11311	1050	72293	13012	12228	784
40–50	85799	10868	10350	518	72518	11142	10746	397
	87860	10498	10020	478	10868	10960	10474	487
50–60	85934	9920	9477	444	71867	9892	9505	387
	94998	9713	9293	420	27713	10305	9835	471
60–70	89611	8863	8400	463	24959	9183	8779	404
	89564	9116	8565	551	70200	9158	8853	306
70–80	89002	9345	8653	692	20674	9054	8611	443
	89664	8681	8105	576	04320	9135	8700	435
80–90	89009	9308	8566	742	20046	8818	8391	427
					71082	8559	8158	401

В обоих полушариях можно наблюдать понижение двух типов тропопаузы от экватора к полюсам. Исключение составляет Южный полюс, для которого характерно некоторое повышение тропопаузы, что связано с особенностями циркуляции в этом районе, о чем упоминалось ранее в [6]. Разница высот тропопауз ВМО и РТГТ по анализируемым станционным данным в Северном полушарии оказалась меньше, чем в Южном (в среднем примерно 600 и 740 м соответственно). Максимальное различие высот в обоих полушариях имеет место в широтной полосе 20–30°, в области среднего положения мощного субтропического струйного течения. Детали этого обстоятельства требуют дополнительного исследования.

Как и следовало ожидать, разность значений температуры в Северном полушарии между двумя типами тропопаузы также меньше, чем в Южном (в среднем 3.5 и 3.8 °С соответственно), и достигает максимальных значений на станциях, расположенных в полосе 20–30° широты (табл. 3). Однако с изменением температуры на уровне тропопаузы от экватора к полюсам оказалось не все однозначно. Самые высокие значения температуры (выделено желтым цветом) на уровне тропопаузы ВМО зафиксированы на станциях в широтной полосе 50–60°, а на уровне тропопаузы РТГТ в Северном полушарии – в полосе 60–70°.

Таблица 3. Средние значения температуры на уровне тропопаузы ВМО и тропопаузы РТГТ (°С)**Table 3.** Average temperature values at WMO tropopause and at PTGT tropopause (°C)

Широтная зона, град	Станция	Южное полушарие			Станция	Северное полушарие		
		ВМО	РТГТ	Разница		ВМО	РТГТ	Разница
0–10	97072	-82.5	-77.3	-5.2	91376	-81.2	-77.2	-4.0
	82705	-80.5	-75.6	-4.9	91408	-81.1	-77.0	-4.1
10–20	83208	-77.6	-73.5	-4.1	91212	-80.6	-76.6	-4.0
	83378	-72.9	-71.0	-1.9	78397	-75.5	-70.8	-4.7
20–30	83779	-71.5	-66.0	-5.5	76644	-75.2	-69.1	-6.1
	94578	-64.8	-59.1	-5.7	72250	-69.6	-64.1	-5.5
30–40	94610	-60.0	-54.7	-5.3	47827	-63.7	-59.2	-4.6
	85586	-59.3	-54.1	-5.2	72293	-62.1	-58.0	-4.1
40–50	85799	-57.2	-54.0	-3.2	72518	-56.7	-54.1	-2.6
	87860	-57.9	-54.7	-3.2	10868	-58.4	-55.3	-3.1
50–60	85934	-58.3	-55.4	-2.9	71867	-55.2	-52.6	-2.6
	94998	-56.5	-53.7	-2.8	27713	-57.3	-54.4	-2.9
60–70	89611	-59.6	-57.0	-2.6	24959	-57.8	-55.4	-2.4
	89564	-61.8	-59.1	-2.7	70200	-54.3	-52.1	-2.2
70–80	89002	-63.1	-60.7	-2.4	20674	-57.2	-54.5	-2.7
	89664	-61.7	-59.0	-2.8	04320	-56.8	-54.1	-2.8
80–90	89009	-66.5	-63.1	-3.4	20046	-56.6	-54.0	-2.6
					71082	-55.3	-53.0	-2.4

Вклад параметра Кориолиса и относительной завихренности в формирование значений потенциального вихря Эртеля

Проблема с подбором единого алгоритма для прогноза динамической тропопаузы по всему глобусу заключается в смене знака параметра Кориолиса f при переходе через экватор: в Северном полушарии его значения положительны, в Южном – отрицательны. При этом знак относительной завихренности ζ , участвующей в определении потенциального вихря Эртеля, не зависит от полушария: горизонтальная ось x при расчете производных компонент скорости ветра направлена от Южного полюса к Северному, а ось y – с запада на восток в обоих полушариях. Была поставлена задача оценить, какой вклад в величину абсолютного вихря вносят его составляющие f и ζ . Оценка проводилась по данным реанализа ERA5 за 2024 год в центральные месяцы сезонов – январь, апрель, июль и октябрь – в начале для опорных (референсных) меридианов – 0, 90, 180, 270° долготы (рисунки не приводятся). Оказалось, что значения параметра Кориолиса везде, за исключением узкой полосы в приэкваториальной зоне, существенно превышают относительную завихренность. Особенно велики эти различия в умеренных широтах Северного полушария (хорошо заметно на меридиане 90°), а также в нижней стратосфере приполюсных зон,

где f оказывается на порядок больше завихренности. Что касается слоя 400–200 гПа, где чаще всего вне тропиков фиксируется тропопауза, в среднем за год диапазон значений $|f/\zeta|$ составляет от 2 до 4 единиц. Этим и объясняется тот факт, что в Южном полушарии ПВЭ практически везде меняет знак на отрицательный. Но из-за того, что направление осей x и y не зависит от полушария, можно предположить некоторую асимметрию относительно экватора при выборе изэртелической поверхности, соответствующей тропопаузе.

Что касается области вблизи экватора, то здесь концепция динамической тропопаузы может не сработать, поскольку из-за стремящегося к нулю параметра Кориолиса значения завихренности тоже малы и вычисление ПВЭ может оказаться некорректным из-за операций с малыми величинами.

Идея осреднения результатов по всему меридиональному диапазону была вначале отброшена во избежание получения «смазанной» картины. Однако, поскольку ситуации для отдельных меридианов все же значительно различались и необходимость глобального прогноза требовала унификации, такие расчеты были проведены: на рис. 2 представлено изображение глобально осредненных разрезов для центральных месяцев сезонов. Хорошо заметно увеличение отношения $|f/\zeta|$ над полюсом в стратосфере в летний сезон соответствующего полушария. В промежуточные сезоны это соотношение в стратосфере больше над Северным полюсом, чем над Южным.

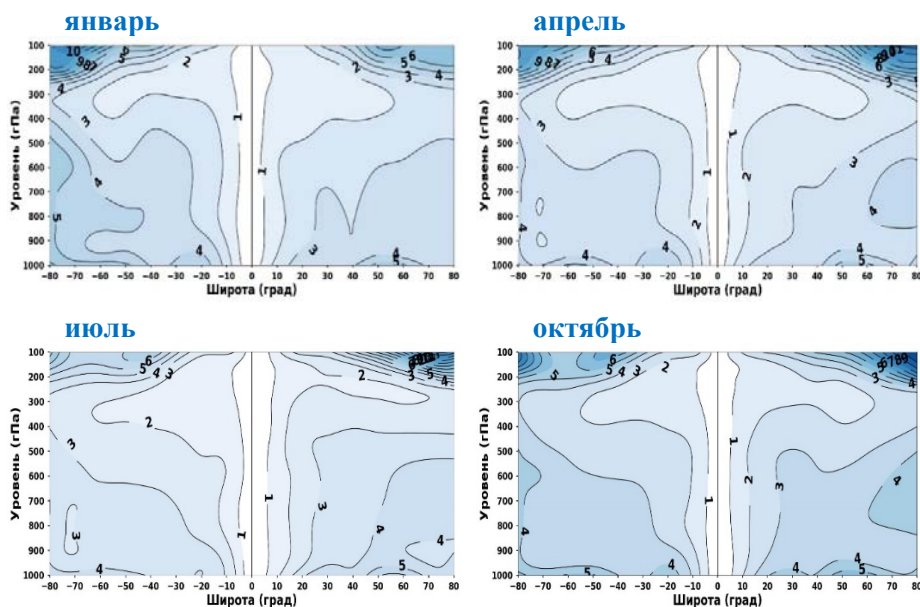


Рис. 2. Вертикальный разрез $|f/\zeta|$ по данным ERA5 за 2024 г.

Fig. 2. Pole-to-pole cross-section of $|f/\zeta|$ values based on ERA5 data, 2024.

Поиск оптимальной изэртелической поверхности, соответствующей тропопаузе. Калибровка динамической тропопаузы на основе данных радиозондирования

Для того, чтобы определить, какой изэртелической поверхностью можно аппроксимировать тропопаузу, прежде всего хотелось бы получить представление о среднем распределении высот таких поверхностей в обоих полушариях. Для этого были использованы данные реанализа ERA5. На рис. 3 изображены высоты поверхностей 1, 2, 3, 3.5, 4, 5, 6 pvu в Северном и Южном полушариях (учащенный диапазон в интервале 3–4 pvu связан с тем, что, как правило, именно в этом промежутке обнаруживается совпадение с классической тропопаузой ВМО). Анализ показал, что в январе в Северном полушарии имеет место более крутой наклон поверхностей ПВЭ примерно до 40° широты.

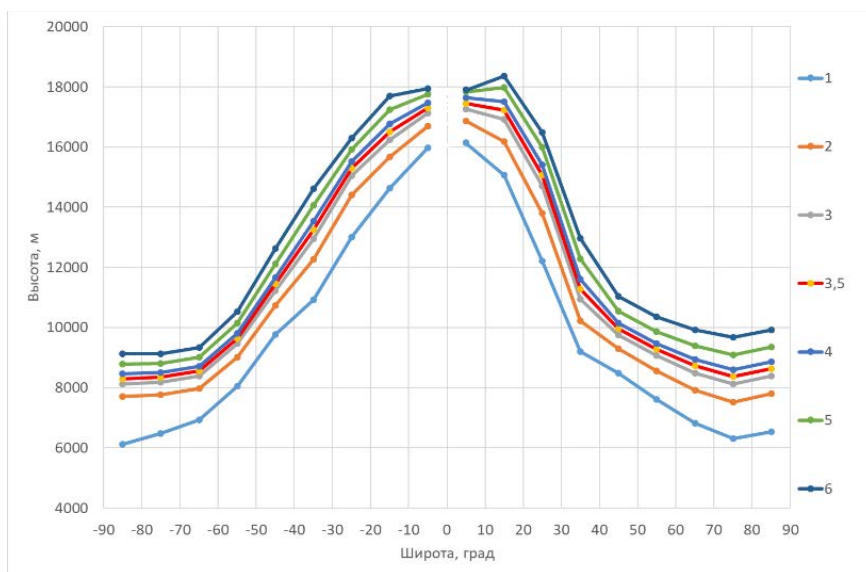


Рис. 3. Вертикальный разрез высот изэртелических поверхностей от 1 до 6 pvu (по модулю) по данным ERA5 за январь 2024 г.

Fig. 3. Pole-to-pole cross-section of 1-6 pvu isertelic surfaces (in modulo) based on the ERA5 data, January 2024.

Сравнение двух типов тропопауз (ВМО и динамической) производилось на основе расчетов по аэрологическим данным и по данным реанализа в узлах, максимально приближенных по координатам к станциям радиозондирования. Сопоставление высоты динамической тропопаузы с «термической» версией, определенной по градиенту температуры, оказалось весьма неоднозначным. В табл. 4 приведена повторяемость тропопаузы ВМО вблизи различных изэртелических поверхностей в области $20\text{--}80^\circ$

широты для обоих полушарий. Оказалось, что чаще всего она лежит гораздо выше 6 рvu (-6 рvu в Южном полушарии), хотя иногда оказывается вблизи поверхности 1(-1) рvu. Такое нехарактерное распределение можно объяснить множественностью тропопауз ВМО и довольно грубым алгоритмом для определения температурного градиента. В [6] было показано, что диапазон высоты тропопаузы ВМО на любой станции радиозондирования составляет от 3 до 17–18 км.

Таблица 4. Повторяемость, Р (%), высоты тропопаузы ВМО вблизи изэртельческих поверхностей над станциями в 2024 г.

Table 4. Occurrence frequency, P (%), of WMO tropopause height near isertelic surfaces above upper-air sounding stations in 2024

Широты	Номер станции	Модуль значения потенциального вихря Эртеля, рvu											P _{max} / ПВЭ
		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	
20–30° с. ш.	72250	16.3	10.4	11.2	10.9	8.7	8.6	8.0	7.2	5.4	3.3	10.0	16.3/1
	76644	10.5	8.3	8.7	9.3	10.5	11.0	8.8	6.1	7.5	4.1	15.1	15.1/6
20–30° ю. ш.	83779	17.1	5.9	9.2	8.3	9.1	9.4	7.6	6.5	6.3	3.1	17.6	17.6/6
	94578	7.3	5.6	6.6	6.8	6.6	6.5	6.3	6.6	5.1	6.3	36.2	36.2/6
30–40° с. ш.	47827	11.3	6.0	7.9	8.5	7.0	7.2	7.0	8.4	8.2	6.2	22.2	22.2/6
	72293	10.2	6.5	9.5	10.1	11.2	10.8	8.4	9.1	6.5	4.3	13.2	13.2/6
30–40° ю. ш.	85586	11.8	11.1	10.8	12.0	8.8	10.4	7.9	5.4	4.5	4.4	12.9	12.9/6
	94610	5.3	5.9	10.2	9.2	7.5	9.5	7.4	7.1	5.9	5.6	26.4	26.4/6
40–50° с. ш.	10868	12.8	7.0	7.8	11.3	9.5	10.7	10.0	6.6	6.3	5.6	12.4	12.8/1
	72518	12.0	8.0	8.3	11.7	9.5	9.9	9.6	7.6	5.0	4.2	14.3	14.3/6
40–50° ю. ш.	87860	11.3	10.7	11.3	15.8	12.8	11.6	6.9	6.3	2.7	5.1	5.4	15.8/2.5
	85799	9.4	10.3	9.1	15.3	12.4	10.0	8.2	8.2	5.9	2.9	8.2	15.3/2.5
50–60° с. ш.	27713	9.8	5.3	6.7	9.8	10.1	11.1	11.9	9.9	7.3	4.5	13.8	13.8/6
	71867	11.5	9.1	7.6	10.4	9.8	11.3	10.2	7.3	6.2	6.2	10.5	11.5/1
50–60° ю. ш.	85934	10.2	9.9	13.1	11.1	14.2	9.1	10.2	8.2	3.7	2.6	7.7	14.2/3
	94998	7.9	7.3	8.5	13.4	14.9	11.1	9.8	10.4	5.3	4.4	7.2	14.9/3
60–70° с. ш.	24959	9.9	6.6	11.2	11.4	14.5	11.8	8.2	8.1	5.2	4.2	8.8	14.5/3
	70200	12.1	9.6	9.8	14.2	12.1	9.3	7.4	5.3	6.8	3.1	10.4	14.2/2.5
60–70° ю. ш.	89564	5.8	2.9	6.4	11.3	10.1	13.0	11.3	8.1	11.0	3.8	16.5	16.5/6
	89611	4.6	4.6	7.5	11.8	12.8	13.5	12.8	10.1	8.4	4.3	9.5	13.5/3.5
70–80° с. ш.	04320	4.4	6.1	9.3	9.1	10.4	11.4	9.7	9.1	8.5	5.9	16.1	16.1/6
	20674	3.4	3.0	4.9	9.3	14.4	13.8	10.8	8.8	9.0	6.7	15.9	15.9/6
70–80° ю. ш.	89512	1.6	2.0	4.3	7.2	13.4	14.4	13.4	12.8	8.5	5.9	16.4	16.4/6
	89664	4.2	4.4	6.8	8.7	14.0	13.1	11.6	11.6	9.5	5.9	10.2	14.0/3

По этой причине была реализована другая стратегия выбора подходящей изэртелической поверхности для идентификации тропопаузы. Она заключалась в поиске минимума абсолютного значения разности высот между тропопаузой ВМО и поверхностью равных значений ПВЭ. В табл. 5 представлен пример таких минимумов, обозначенных желтой заливкой, для одной из станций Южного полушария – 87860 SAVC (45.78° ю. ш., 67.50° з. д.). Очевидно, что в течение года динамическая тропопауза, наиболее близко расположенная к тропопаузе ВМО, лежит в диапазоне от -2 до -4 рву, но чаще всего ее можно отождествить с изэртелической поверхностью -3.5 рву.

Таблица 5. Среднее значение модуля разности (м) между значениями высоты тропопаузы ВМО на станции 87860 и высоты изэртелических поверхностей в узле, ближайшем к координатам станции, за 2024 г.

Table 5. Mean absolute difference (m) between WMO tropopause height at 87860 upper-air sounding station and isertelic surface height values (in the reanalysis grid point nearest to station) in 2024

Месяц	Поверхности ПВЭ, рву										
	-1	-1.5	-2	-2.5	-3	-3.5	-4	-4.5	-5	-5.5	-6
1	2148	1564	995	870	795	576	482	670	822	971	1143
2	1277	974	805	702	629	614	653	712	801	910	1060
3	1737	1388	846	678	620	567	541	606	711	964	1096
4	1369	1106	897	769	680	594	496	559	573	736	867
5	1057	827	554	458	462	475	543	652	826	929	1147
6	1089	867	612	511	369	352	376	464	598	776	1020
7	1696	1144	862	728	649	645	666	788	882	993	1195
8	1351	765	589	655	603	596	661	748	842	1002	1495
9	1140	758	489	397	369	390	464	572	727	998	1505
10	1241	1137	831	722	651	596	699	864	1146	1373	1719
11	1510	1018	760	613	505	490	497	538	736	1040	1408
12	1546	1135	878	656	600	587	636	686	871	1115	1407
Год	1391	1028	745	632	564	537	563	654	793	986	1264

Опираясь на значения минимальных различий по высоте между тропопаузой, рассчитанной по термическому градиенту, и поверхностью ПВЭ, мы провели подобное сравнение на данных реанализа, а также на начальных и выходных данных модели ПЛАВ. В табл. 6 и 7 представлены результаты для 2024 года.

В табл. 6 приведено обобщение подобных данных для внетропических 12 станций в Южном и 12 станций в Северном полушарии (приполюсные станции решено было не учитывать из-за возможного искажения при расчетах горизонтального градиента скорости ветра в формуле ПВЭ).

Оказалось, что диапазон средних ПВЭ на станциях для тропопауз ВМО и PTGT составляет, соответственно, от -3 до -5 рvu и от -2 до -3.5 рvu в Южном полушарии. Севернее экватора эти диапазоны составляют, соответственно, от 3.5 до 4 рvu и от 2 до 3 рvu, то есть можно говорить о большей «устойчивости» концепции динамической тропопаузы во внетропических широтах Северного полушария. При этом разброс значений ПВЭ в течение года может быть довольно велик: например, от 2 до 6 рvu при сравнении с тропопаузой ВМО для станции 47827 в Северном полушарии или от -2 до -6 для станции 94578 в Южном. Отметим также, что среднее значение ПВЭ не всегда самое часто повторяющееся, при большой изменчивости значений оно может реально наблюдаться всего пару месяцев в году (например, для станции 72518 в табл. 6).

Таблица 6. Среднее значение ПВЭ, рассчитанное по данным ERA5 и соответствующее высоте тропопаузы ВМО/PTGT за 2024 г., и диапазон изменения значений в течение года (рvu)

Table 6. Average value of Ertel's potential vorticity (EPV) according ERA5 data for 2024 and corresponding WMO/PTGT tropopause height and based ERA5 data the range of EPV values (pvu)

Номер станции	Широта	Средний ПВЭ для тропопаузы ВМО/PTGT	Диапазон ПВЭ (месяц) на тропопаузе ВМО/PTGT
Южное полушарие			
83779	20-30	-3.5/-2.5	-2.5(8)...-6 (1)/-1.5(5,6,12)...-3(2,3)
94578	20-30	-4.5/-3	-3(7)...-6(1-4,12)/-2(8,10,11)...-4.5(2)
85586	30-40	-3.5/-2	-2(8)...-5(2)/-1.5(3,7)...-2.5(2,5,9,12)
94610	30-40	-4/-3	-3(5-8,10)...-6(1-3,12)/-1.5(5,9)...-4.5(12)
87860	40-50	-3.5/-2.5	-2(8)...-4(1,3,4)/-1.5(2)...-3.5(4)
85799	40-50	-3.5/-2.5	-2.5(9)...-4(2,5-7,12)/-2(8-11)...-3(3,4,6,7)
85934	50-60	-3.5/-2.5	-2.5(10)...-4.5(6,7,12)/-1.5(11)...-3(2,6)
94998	50-60	-4/-2.5	-3(6,9,10)...-4.5(2,3)/-2(5,6)...-3.5(12)
89564	60-70	-4.5/-3.5	-4(1,4,5,11,12)...-6(9)/-2.5(6,12)...-4.5(9)
89611	60-70	-4/-3.5	-4(5,6,8,10-12)...-5(3)/-2.5(10,11)...-4(3)
89512	70-80	-5/-3.5	-3.5(5)...-6(10)/-2.5(5,12)...-4(3,8,11)
89664	70-80	-4/-3	-3.5(5,6)...-5(3,8)/-2.5(5)...-3.5(3,4,7-10)
Северное полушарие			
72250	20-30	3.5/2	2(2,5)...5.5(8)/1.5(2,5)...3.5(8,10)
76644	20-30	4/2	2.5(1,12)...5.5(9,10)/1(12)...3(7,9-11)
47827	30-40	3.5/2.5	2(12)...6(8-10)/2(4,6,11,12)...4.5(8,9)
72293	30-40	4/3	2(12)...5.5(9)/1(2)...3.5(9)
10868	40-50	3.5/2.5	3(7,8,10)...5(5)/2(4,8,12)...3.5(5)
72518	40-50	4/2.5	3.5(1,2,4-6,10,12)...4.5(9)/2(6)...3.5(2,9)
27713	50-60	4/2.5	3.5(4)...4.5(2,3,8,11,12)/2(8,9)...3.5(2)
71867	50-60	3.5/3	2.5(10)...5(6,8)/2(4)...4(6)
24959	60-70	3.5/2.5	3(2)...5(7,8)/2(2)...3.5(7)
70200	60-70	3.5/3	2.5(3)...5(8,9)/2.5(2-4,6,9,12)...3.5(10,11)
04320	70-80	4/2.5	3(3)...6(7-9)/2(3)...3.5(9)
20674	70-80	4/3	3.5(3)...6(8)/2.5(5,9,10)...3.5(1)

Разброс значений определяется циркуляцией, чаще всего он увеличивается в ситуациях, когда вертикальные градиенты ПВЭ велики, то есть изэртелические поверхности расположены довольно близко.

Сравнение тропопауз по данным радиозондирования (ВМО и РТГТ) с рассчитанной «динамической» по ERA5 показало, что в среднем для всех представленных в таблице станций Южного и Северного полушария значение ПВЭ для тропопаузы ВМО составляют -3.96 и 3.75 рву соответственно, то есть ближе всего тропопауза находится к поверхности, на которой модуль значения ПВЭ равен 4 рву (но некоторая полушарная «асимметрия», которая упоминалась выше, все же прослеживается). Для тропопаузы РТГТ эти значения равны, соответственно, -2.83 и 2.58 рву, то есть в Южном полушарии она ближе к поверхности -3 рву, а в Северном – к 2.5 рву.

Разность между средними значениями высоты классической тропопаузы ВМО и тропопаузы РТГТ по шкале ПВЭ изменяется от 1 до 2 рву (чаще всего 1.5 рву) и в среднем примерно одинакова в Северном и Южном полушариях. Границы диапазона ПВЭ демонстрируют, что месяцы, в которые отмечаются экстремальные значения ПВЭ, чаще всего не совпадают для двух типов тропопаузы, то есть топография соседних изэртелических поверхностей различна.

Что касается расчетов по данным модели ПЛАВ10 (табл. 7), то в сравнении с данными реанализа положение тропопаузы определяется более низкой изэртелической поверхностью в анализе и тем более – в прогнозе. Однако разница между высотой модельной тропопаузы в начальный момент времени и спрогнозированной за 24 ч в целом невелика и составляет всего 0.08 рву для станций Северного и 0.17 рву для станций Южного полушария. В среднем положение тропопаузы ближе к поверхности 3.5 рву к югу от экватора и 3 рву – к северу.

Стоит отметить, что полученные результаты могут измениться, поскольку в настоящее время разработчики модели ПЛАВ проводят работы по внедрению новой параметризации есRAD в радиационный блок модели. Это почти гарантировано приведет к изменению вертикального профиля температуры и, таким образом, повлияет на воспроизведение тропопаузы.

Аппроксимация тропопаузы изэнтропической поверхностью вблизи экватора

Как указывалось ранее, использование «динамической» концепции вблизи экватора нежелательно. Часто при переходе от умеренных широт к тропикам применяют понятие «слой тропической тропопаузы» [12, 13], который, в свою очередь, может подразделяться на подслои – нижний, средний и верхний. Границы этих подслоев представлены, соответственно, диапазонами изэнтроп 350–360, 360–380, 380–420 К [17].

Аппроксимация тропопаузы не слоем, а именно поверхностью, более целесообразна с точки зрения обеспечения этой информацией авиации,

которая требует однозначного определения положения границы между тропосферой и стратосферой. Выбор исследователями наиболее подходящей изэнтропической поверхности чаще всего склоняется к 380 К [3, 10, 15]. Однако анализ данных радиозондирования, проведенный ранее [16], позволил заключить, что такая поверхность располагается немного ниже, примерно на высоте изэнтропы 370 К.

Таблица 7. Среднее значение ПВЭ, рассчитанное по начальным (А) и прогностическим (П) с заблаговременностью 24 ч полям модели ПЛАВ10 и соответствующее высоте тропопаузы ВМО за 2024 г., и диапазон изменения значений (рву)

Table 7. Average value of Ertel's potential vorticity (EPV) corresponding WMO tropopause height and based on the initial (A) and output data (П) of PLAV10 model and the range of EPV in 2024 (pvu)

Номер станции	Широта	Средний ПВЭ (А/П)	Диапазон ПВЭ (месяц) (А/П)
Южное полушарие			
83779	20-30	-3/-3.5	-2.5(5-8)...-4.5(1)/-2.5(5,8)...-5(1,2)
94578	20-30	-4.5/-4	-3(10)...-6(3,12)/-3(7,10)...-6(4,5,12)
85586	30-40	-3/-3	-2(6-8)...-4.5(2)/-2.5(4,6,8)...-5(2)
94610	30-40	-4/-3.5	-2.5(5,8)...-6(1,3,12)/-2(5)...-6(1,3,12)
87860	40-50	-3/-3	-2(9)...-3.5(1,11)/-2.5(2,5,6,8,9)...-3.5(1,11)
85799	40-50	-3/-3	-2.5(3,8,9,11)...-3.5(1,4,5,10,12)/ -2(3,6,9)...-3.5(2,4)
85934	50-60	-3/-3	-2.5(4,5,7,10)...-4(6)/-2(10)...-4(6)
94998	50-60	-3.5/-3	-3(1,5,6,9,10)...-4.5(3)/-2.5(4,5,10)...-4(2)
89564	60-70	-4/-4	-3(1)...-6(9)/-3(1,12)...-5.5(9)
89611	60-70	-4/-3.5	-3(2)...-4.5(4)/-3(10,12)...-4(1,3,4,7,9)
89512	70-80	-4.5/-4	-3.5(5,12)...-5.5(9)/-3(12)...-6(10)
89664	70-80	-4/-4	-3(6)...-5(8)/-3(6)...-4.5(7-9)
Среднее по полушарию		-3.63/-3.46	
Северное полушарие			
72250	20-30	3/3	2(2,5)...5(8)/2(2,3,12)...4.5(8)
76644	20-30	3/3	2(12)...4.5(9)/1.5(12)...5(9)
47827	30-40	3/3	1.5(12)...6(8)/1(12)...5.5(8)
72293	30-40	3.5/3	1.5(2)...4.5(8,9)/1.5(2)...5(10)
10868	40-50	3/3	2.5(8)...4(5)/2.5(8)...3.5(2,5,6,9,10)
72518	40-50	3.5/3.5	3(1-4,10,12)...4(7,8,11)/2.5(10)...4(8,9,11)
27713	50-60	3.5/3.5	3(10)...4(2,3)/3(8)...4(2,6,9)
71867	50-60	3.5/3	2.5(2,9-11)...4(6-8)/2(2,9)...4.5(7)
24959	60-70	3/3	2.5(1)...4.5(8)/ 3(1-3,5,9,11,12)...3.5(4,6-8,10)
70200	60-70	3/3	2(3)...4(6,7,9)/2(3)...4(6,8,10)
04320	70-80	3.5/3.5	2.5(3)...6(8)/2.5(3)...5(8)
20674	70-80	3.5/3.5	3(3)...5.5(8)/3(3)...5(9)
Среднее по полушарию:		3.25/3.17	

Изучение распределения потенциальной температуры на уровне тропопаузы ВМО в тропической зоне (табл. 8) позволило сделать следующее заключение. В целом как для Северного, так и для Южного полушария положение тропопаузы ВМО примерно соответствует положению изэнтропы 365 К. Сезонный ход показывает минимум потенциальной температуры на тропопаузе в обоих полушариях, как правило, в период с июня по сентябрь (за исключением станции 97072 с минимумом в декабре). При удалении от экватора увеличивается диапазон изменения потенциальной температуры на тропопаузе. Проведенные эксперименты с различными границами перехода от изэртелической (динамической) тропопаузы к изэнтропической показали целесообразность смены концепции в прогнозе вблизи 15° широты.

Таблица 8. Сезонный ход потенциальной температуры (К) на уровне тропопаузы ВМО в тропической зоне по данным радиозондирования за период 2015–2024 гг.

Table 8. Seasonal variation of potential temperature (K) at WMO tropopause level according to radiosonde data for 2015–2024

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ср	Δ
Северное полушарие														
91376	366	364	364	364	363	361	360	359	360	361	364	365	363	6
91408	364	363	364	366	367	362	360	361	361	363	364	364	363	6
91212	365	363	364	365	366	362	359	358	359	363	366	366	363	8
78397	374	375	375	371	368	361	363	367	364	364	367	374	368	14
Южное полушарие														
97072	364	365	365	368	368	365	363	364	363	364	363	362	364	6
82705	368	367	367	367	368	363	364	366	366	366	366	369	366	6
83208	367	365	366	367	367	364	364	364	364	365	366	366	365	3
83378	370	368	368	369	366	358	358	359	364	366	367	369	365	12

На рис. 4–7 представлены глобальные поля высоты и температуры тропопаузы, рассчитанные путем комбинации двух подходов для всего глобуса по начальным и прогностическим данным модели ПЛАВ10. Высота тропопаузы, согласно требованиям ИКАО, представлена в гектофутах. Очевидно, что переход от изэртелической поверхности к изэнтропической не приводит к формированию склонов или разрывов. В тропической зоне поле получается довольно гладким, а его значения в этой области вполне соответствуют данным радиозондовых измерений.

Заключение

Глобальный прогноз характеристик тропопаузы для метеобеспечения авиации в Российском центре зональных прогнозов целесообразно давать на базе выходных данных глобальной модели численного прогноза погоды. В настоящее время в Гидрометцентре России эксплуатируются две такие модели – модель ICON-Ru и модель ПЛАВ.

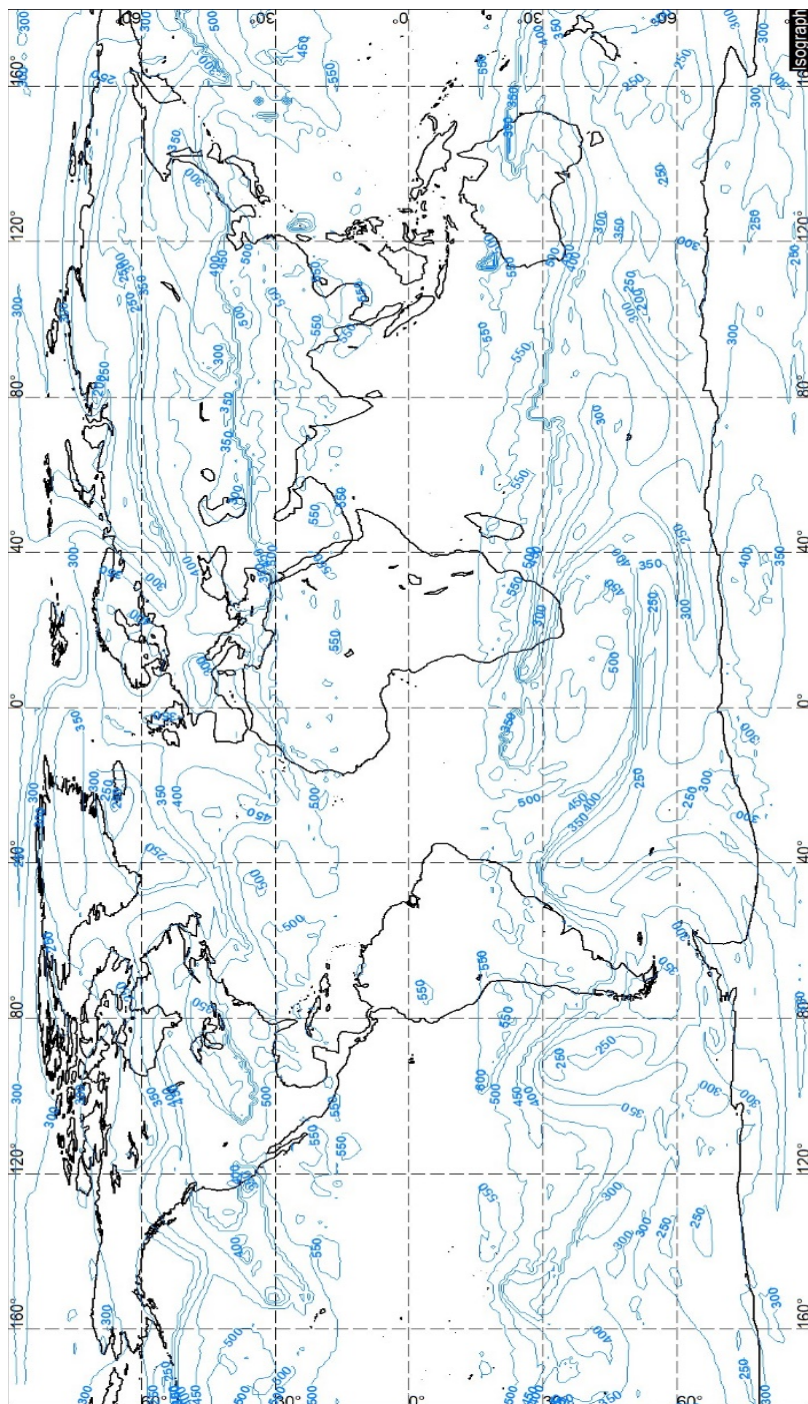


Рис. 4. Глобальное поле высоты тропопазы (в гектофутах), рассчитанное по начальным данным модели ПЛАВ10 25.09.2025 00 ч ВСВ.

Fig. 4. Global tropopause height (in hft) calculated using the initial PЛАV10 data on 25/09/2025 00 UTC.

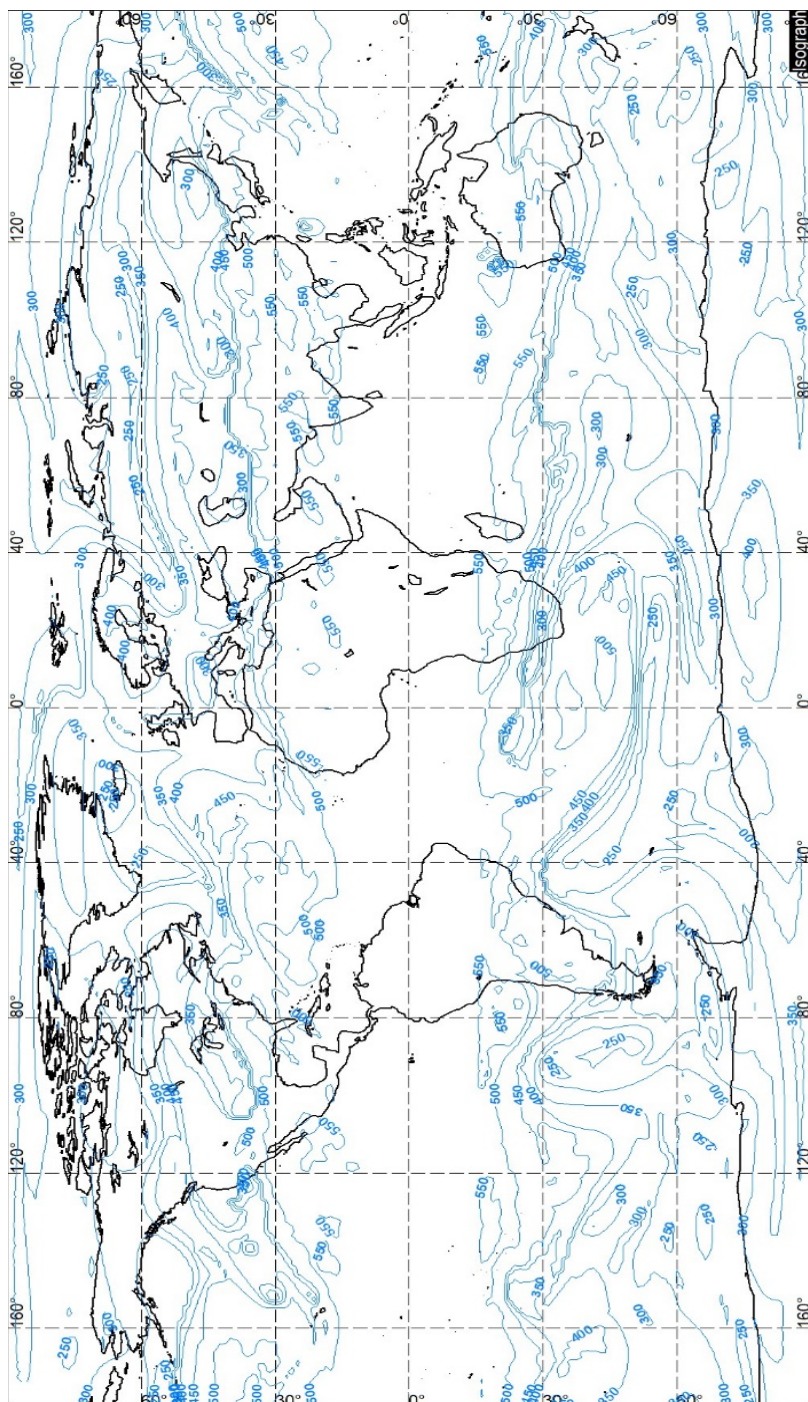


Рис. 5. Глобальное поле высоты тропоплаузы (в гектофутах), рассчитанное по выходным (заблаговременность 24 ч) данным модели ПЛАВ10 25.09.2025 00 ч ВСВ.

Fig. 5. Global tropopause height (in hft) calculated using the output (24-hour projection) PLAV10 data on 25/09/2025 00 UTC.

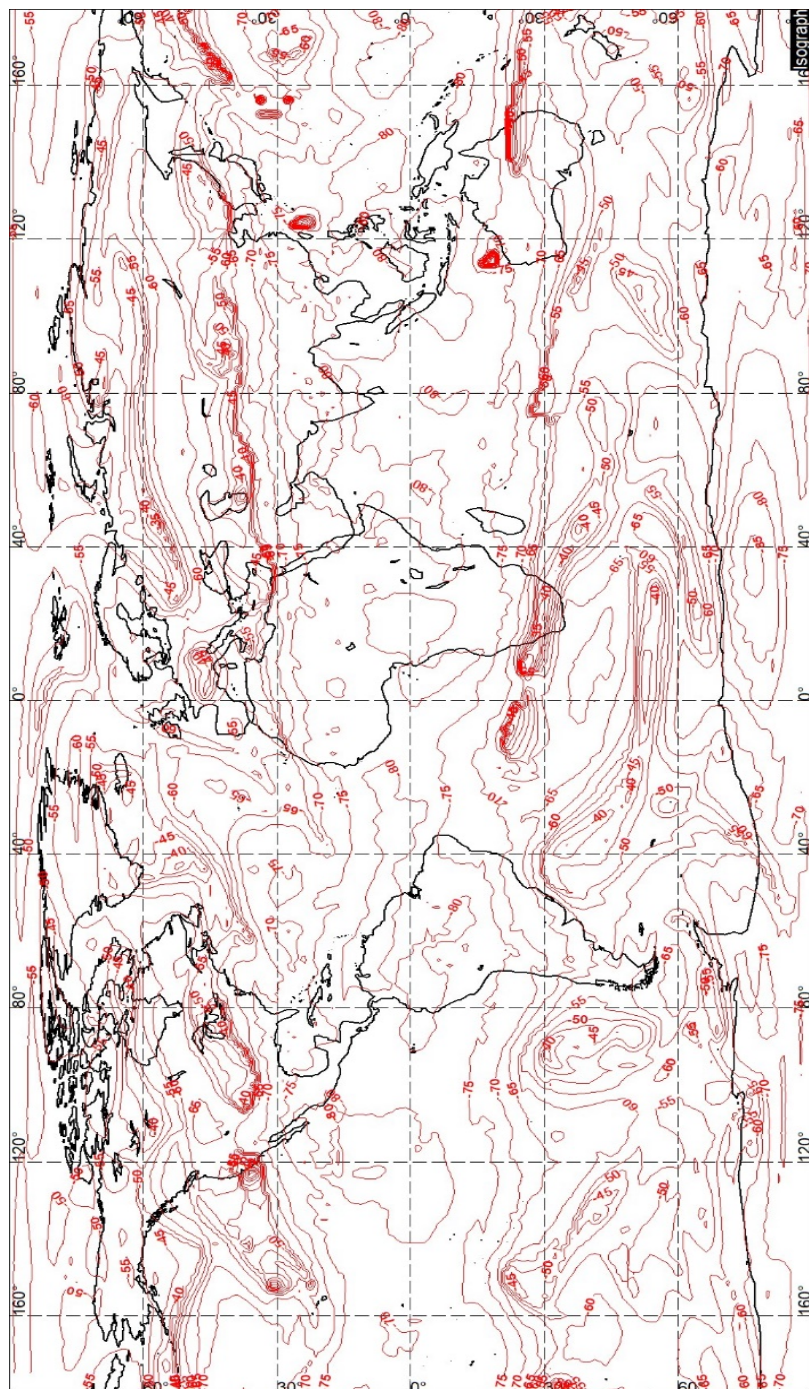


Рис. 6. Глобальное поле температуры тропопазы (в °C), рассчитанное по начальным данным модели ПЛАВ10 25.09.2025 00 ч ВСВ.

Fig. 6. Global tropopause temperature (in °C) calculated using the initial PLAV10 data on 25/09/2025 00 UTC.

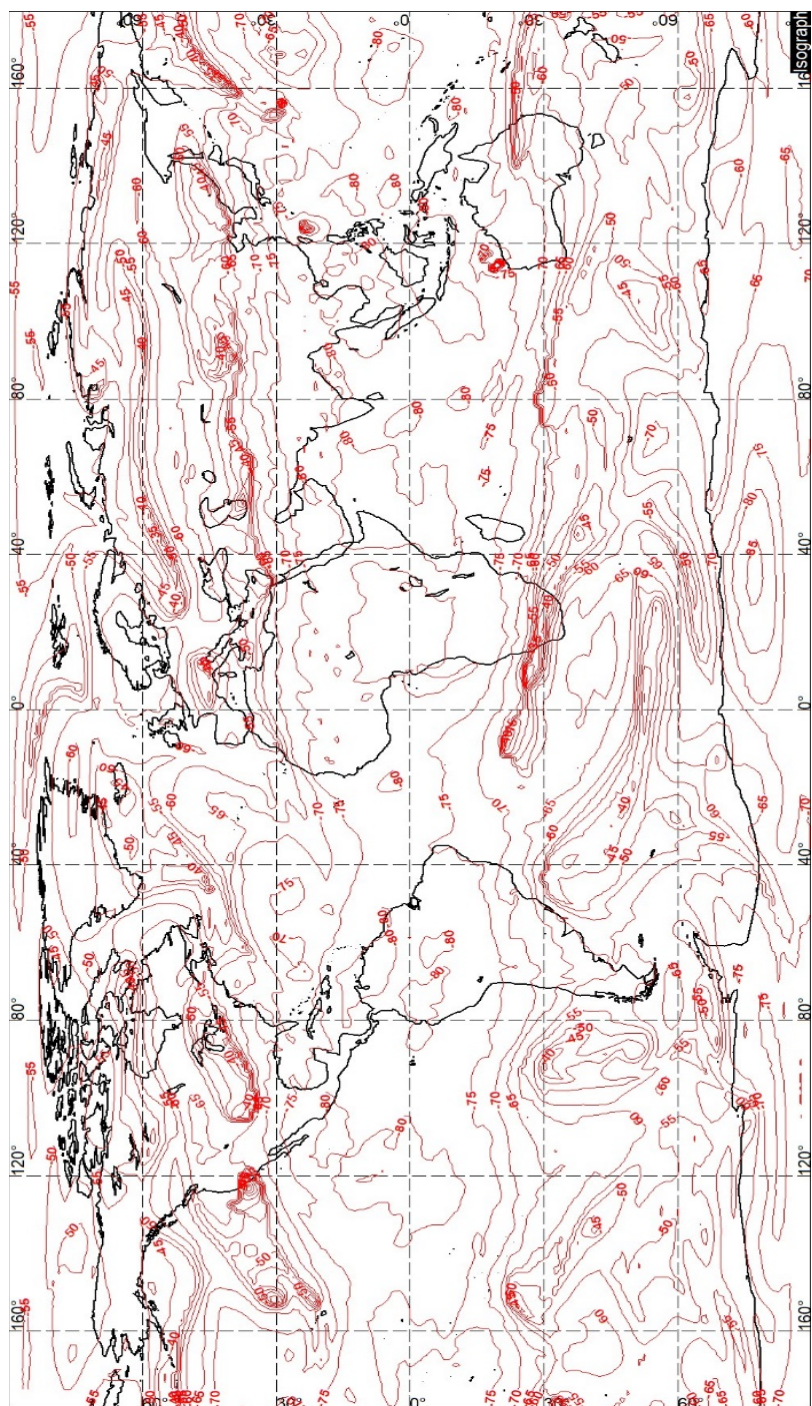


Рис. 7. Глобальное поле температуры тропопаузы (в °С), рассчитанное по выходным (заблаговременность 24 ч) данным модели ПЛАВ10 25.09.2025 00 ч ВСВ.

Fig. 7. Global tropopause temperature (in °C) calculated using the output (24-hour projection) PLAV10 data on 25/09/2025 00 UTC.

На сегодняшний день выбор в качестве основы для расчетов модели ПЛАВ10 обусловлен ее «экономичностью» по отношению к задействованным вычислительным ресурсам в сравнении с моделью ICON-Ru.

Однако полулагранжевая модель, широко используемая в оперативной практике для среднесрочных прогнозов погоды, уже несколько лет не показывает существенного прогресса в развитии с точки зрения авиационного постпроцессинга. Ожидается, что предстоящая модификация радиационного блока с заменой параметризаций радиационных потоков будет способствовать улучшению прогноза температуры на всех уровнях и, как следствие, повышению качества прогноза тропопаузы. Возможно, выбранная для интерпретации тропопаузы изэртелическая поверхность 3.5 p_{vh} (по модулю), рассчитанная по модельным данным, после этого будет заменена другой, более близкой к той, что получена по данным реанализа ERA5 (4 p_{vh}).

Прогноз тропопаузы в тропиках, как показал анализ данных радиозондирования, целесообразно реализовывать через модельный прогноз изэнтропической поверхности 365 К, принадлежащей средней части слоя тропической тропопаузы. Это несколько ниже, чем широко известные приближения 380 и 370 К, однако, как показали эксперименты, находится в соответствии с откалиброванными по данным радиозондирования результатами расчета тропопаузы с использованием выходных данных полулагранжевой модели.

Список литературы

1. Восканян К.Л., Екатериничева Н.К., Кузнецов А.Д., Саенко А.Г., Сероухова О.С., Симакина Т.Е. Практикум по аэрологическим методам зондирования окружающей среды. СПб.: РГТМУ, 2020. 268 с.
2. Иванова А.Р. Наклон тропопаузы как характеристика ее деформации // Метеорология и гидрология. 2011. № 2. С. 17-28.
3. Иванова А.Р. Тропопауза: многообразие определений и современные подходы к идентификации // Метеорология и гидрология. 2013. № 12. С. 23-36.
4. Иванова А.Р. Некоторые особенности циркуляции в свободной атмосфере Южного полушария, влияющие на полеты воздушных судов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. № 2 (396). С. 8-27. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-8-27>
5. Метеорологическое обеспечение международной авионавигации. Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации. Международная организация гражданской авиации. Издание двадцатое. Июль 2018.
6. Соколова У.О., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Характеристики внетропической тропопаузы в Южном полушарии по данным аэрологического зондирования // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. № 3 (397). С. 32-48. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-3-32-48>
7. Тарасенко Д.А. О критериях определения уровня и характера тропопаузы, рекомендованных ВМО // Труды ЦАО. 1964. Вып. 59. С. 40-51.
8. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Гойман Г.С., Зарипов Р.Б., Мизяк В.Г., Рогутев В.С., Алипова К.А., Бирючева Е.О. Глобальная модель ПЛАВ10 для среднесрочного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. 2025. № 6. С. 56-66. DOI: [10.52002/0130-2906-2025-6-56-66](https://doi.org/10.52002/0130-2906-2025-6-56-66)

9. Шакина Н.П., Борисова В.В. Опыт применения потенциального вихря для расчета высоты и температуры тропопаузы // *Метеорология и гидрология*. 1992. № 9. С. 57-65.
10. Corti T., Luo B.P., Vomel H., Peter T. The impact of cirrus clouds on tropical troposphere-to-stratosphere transport // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. Vol. 6. P. 2539-2547.
11. Court A. Tropopause disappearance during Antarctic winter // *Bull. Amer. Met. Soc.* 1942. Vol. 23. P. 220-238.
12. Dacie S., Kluft L., Schmidt H., Stevens B., Buehler S.A., Dietmuller S., Nowack P.J., Abraham N.L., Birner T. A 1D RCE Study of Factors Affecting the Tropical Tropopause Layer and Surface Climate // *J. Clim.* 2019. Vol. 32, is. 20. P. 6769-6782. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0778.1
13. Fueglistaler S., Dessler A.E., Dunkerton E.J., Folkins I., Fu Q., Mote P.W. Tropical tropopause layer // *Review of Geophysics*. 2009. Vol. 47, is. 1. P. 1-31. <https://doi.org/10.1029%2F2008RG000267>
14. Kohma M., Mizukoshi M., Sato K. Dynamical Analysis of Tropopause Folding Events in the Coastal Region of Antarctica // *J. Clim.* 2022. Vol. 35.P. 4687-4700.
15. Liu C., Zipser E.J. Global distribution of convection penetrating the tropical tropopause // *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110. P. D23104. DOI:10.1029/2005JD006063
16. Reid G.C., Gage K.S. On the annual variation in height of the tropical tropopause // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1981. Vol. 38. P. 1928-1938.
17. Sunikumar S.V., Muhsin M., Venkat Ratman M., Parameswaran K., Krishna Murthi B.V., Emmanuel M. Boundaries of tropical tropopause layer (TTL): A new perspective based on thermal and stability profiles // *Geophys. Res. Atmos.* 2016. Vol. 122. P. 741-754. DOI: 10.1002/2016JD025217.
18. Tinney E.N., Homeyer C.R., Elizalde L., Hurst D.F., Thompson A.M., Stauffer R.M., Vomel H., Selkirk H.B. A Modern Approach to a Stability-Based Definition of the Tropopause // *Monthly Weather Review*. 2022. Vol. 12. P. 3151-3174. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-22-0174.1>
19. WMO. Definition of the tropopause // *WMO Bull.* 1957. Vol. 6. 136 p.

References

1. Voskanjan K.L., Ekaterinicheva N.K., Kuznecov A.D., Saenko A.G., Serouhova O.S., Simakina T.E. Praktikum po ajerologicheskim metodam zondirovaniya okružhajushhej sredy. Saint Petersburg: RGGMU Publ., 2020. 268 p. [in Russ.].
2. Ivanova A.R. The tropopause slope as a characteristic of its deformation. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36, no. 2, pp. 82-90.
3. Ivanova A.R. The tropopause: variety of definitions and modern approaches to identification. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 12, pp. 808-817.
4. Ivanova A.R. Some features of the Southern Hemisphere circulation in the free atmosphere affecting aircraft flights. *Gidrometeorologičeskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2025, vol. 396, no. 2, pp. 8-27. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-8-27> [in Russ.].
5. *Meteorologičeskoe obespečenie mezhdunarodnoj ajeronavigacii*. Prilozhenie 3 k Konvencii o mezhdunarodnoj grazhdanskoj aviacii. Mezhdunarodnaja organizacija grazhdanskoj aviacii. Izdanie dvadcatoe. Ijul' 2018.
6. Sokolova U.O., Ivanova A.R., Skriptunova E.N. Extratropical tropopause features in the Southern Hemisphere based on the upper-air sounding data. *Gidrometeorologičeskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2025, vol. 397, no. 3, pp. 32-48. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-3-32-48> [in Russ.].
7. Tarasenko D.A. O kriterijah opredelenija urovnja i haraktera tropopauzy, rekomendovannyh VMO. *Trudy CAO*, 1964, vyp. 59, pp. 40-51.
8. Tolstykh M.A., Fadeev R.Yu., Shashkin V.V., Goyman G.S., Zaripov R.B., Mizyak V.G., Rogutov V.S., Alipova K.A., Biryucheva E.O. Global SLAV10 Model for Medium-range Weather Prediction. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2025, vol. 50, no. 6, pp. 473-481. DOI: 10.3103/S1068373925060032

9. *Shakina N.P., Borisova V.V.* Opyt primenenija potencial'nogo vihrja dlja rascheta vysoty i temperature tropopauzy. *Meteorologija i gidrologija [Meteorology and Hydrology]*, 1992, no. 9, pp. 57-65 [in Russ.].
10. *Corti T., Luo B.P., Vomel H., Peter T.* The impact of cirrus clouds on tropical troposphere-to-stratosphere transport. *Atmos. Chem. Phys.*, 2006, vol. 6, pp. 2539-2547.
11. *Court A.* Tropopause disappearance during Antarctic winter. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 1942, vol. 23, pp. 220-238.
12. *Dacie S., Kluft L., Schmidt H., Stevens B., Buehler S.A., Dietmuller S., Nowack P.J., Abraham N.L., Birner T.* A 1D RCE Study of Factors Affecting the Tropical Tropopause Layer and Surface Climate. *J. Clim.*, 2019, vol. 32, is. 20, pp. 6769-6782. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0778.1
13. *Fueglistaler S., Dessler A.E., Dunkerton E.J., Folkins I., Fu Q., Mote P.W.* Tropical tropopause layer. *Review of Geophysics*, 2009, vol. 47, is. 1, pp. 1-31. <https://doi.org/10.1029%2F2008RG000267>.
14. *Kohma M., Mizukoshi M., Sato K.* Dynamical Analysis of Tropopause Folding Events in the Coastal Region of Antarctica. *J. Clim.*, 2022, vol. 35, pp. 4687-4700.
15. *Liu C., Zipser E.J.* Global distribution of convection penetrating the tropical tropopause. *J. Geophys. Res.*, 2005, vol. 110, pp. D23104. DOI: 10.1029/2005JD006063
16. *Reid G.C., Gage K.S.* On the annual variation in height of the tropical tropopause. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1981, vol. 38, pp. 1928-1938.
17. *Sunikumar S.V., Muhsin M., Venkat Ratman M., Parameswaran K., Krishna Murthi B.V., Emmanuel M.* Boundaries of tropical tropopause layer (TTL): A new perspective based on thermal and stability profiles. *Geophys. Res. Atmos.*, 2016, vol. 122, pp. 741-754. DOI: 10.1002/2016JD025217.
18. *Tinney E.N., Homeyer C.R., Elizalde L., Hurst D.F., Thompson A.M., Stauffer R.M., Vomel H., Selkirk H.B.* A Modern Approach to a Stability-Based Definition of the Tropopause. *Monthly Weather Review*, 2022, vol. 12, pp. 3151-3174. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-22-0174.1>
19. WMO. Definition of the tropopause. *WMO Bull.*, 1957, vol. 6, 136 p.

Поступила 23.10.2025; принята в печать 17.03.2026.
Submitted 23.10.2025; accepted for publication 17.03.2026.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-1-30-50>

УДК 556.582

Оценка изменений повторяемости замерзающих осадков на территории России в XX–XXI веке с использованием модели INM-CM5

***А.И. Гибадуллина, И.И. Леонов,
А.В. Кислов, Н.Н. Соколикхина***

*Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
naytask@mail.ru*

Проведена оценка качества воспроизведения замерзающих осадков климатической моделью INM-CM5 на территории России. Для верификации данных моделирования использованы данные основных срочных наблюдений и визуальных наблюдений за атмосферными явлениями за период с 1979 по 2014 год. С использованием климатической модели INM-CM5 получено пространственное распределение среднего годового числа дней с замерзающими осадками за период с 1979 по 2014 г. Сделан прогноз изменения повторяемости замерзающих осадков на территории России для периодов 2015–2100 и 2071–2100 гг. по трем возможным социально-экономическим климатическим сценариям SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Наибольшие изменения повторяемости замерзающих осадков ожидаются при реализации сценария SSP5-8.5. Увеличение повторяемости замерзающих осадков на территории России более чем в 5 раз к концу XXI века прогнозируется на севере Европейской территории, южной и центральной части Западной Сибири, восточной части Чукотского АО. Уменьшение повторяемости замерзающих осадков прогнозируется в районе островов и побережий Северного Ледовитого океана, а также Берингова и Охотского морей.

Ключевые слова: изменения климата, прогноз климата, опасные явления погоды, замерзающие осадки, гололед, обледенение, реанализ, модель INM-CM5, CMIP6

An evaluation of changes in the frequency of freezing precipitation in Russia in the 20th–21st centuries using the INM-CM5 model

***A.I. Gibadullina, I.I. Leonov,
A.V. Kislov., N.N. Sokolikhina***

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
naytask@mail.ru*

The quality of simulating freezing precipitation by the INM-CM5 climate model is assessed for Russia. The modeling data were verified using main 3-hour observations and visual observations of atmospheric events during 1979–2014. The INM-CM5 climate model was used to obtain the spatial distribution of the average annual number of days with

freezing precipitation for this period. Forecasts of changes in the frequency of freezing precipitation in Russia were prepared for 2015–2100 and 2071–2100 based on three possible socioeconomic climate scenarios: SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5. The greatest changes in the frequency of freezing precipitation are expected under the SSP5-8.5 scenario. It is predicted that the frequency of freezing precipitation in Russia in the northern European part of Russia, southern and central Western Siberia, and the eastern part of the Chukotka Autonomous Okrug will increase by more than five times by the end of the 21st century. A decrease in the frequency of freezing precipitation is predicted in the areas of the islands and coasts of the Arctic Ocean, as well as the Bering and Okhotsk seas.

Keywords: climate change, climate forecast, severe weather events, freezing precipitation, glaze ice, icing, reanalysis, INM-CM5 model, CMIP6

Введение

Замерзающие осадки могут приводить к возникновению чрезвычайных ситуаций, а также к угрозе здоровью и жизни людей. Ущерб, причиненный отложениями льда на поверхности дорог, линиях электропередачи и деревьях, может быть очень значительным [36].

В настоящее время повышенное внимание исследователей направлено на регионы, расположенные в высоких широтах [15]. Это объясняется тем, что увеличение среднегодовых температур в высоких широтах происходит значительно быстрее, чем в целом по земному шару [7]. С ростом среднегодовой температуры также возрастает повторяемость некоторых опасных явлений. К одним из наиболее опасных гидрометеорологических явлений относятся гололедно-изморозевые отложения, толщина которых превышает 20 мм [12].

Замерзающие осадки наблюдаются во многих регионах мира, но наиболее часто встречаются в странах, расположенных в высоких широтах: России, Канаде, США и странах Скандинавии [20, 24]. Объекты инфраструктуры могут получить существенные повреждения в ходе нарастания атмосферного льда, образовавшегося в результате выпадения замерзающих осадков. Несколько десятилетий назад при проектировании зданий, линий электропередач не всегда уделялось значительное внимание возможным изменениям климата [27]. Следовательно, значительное число построенных объектов инфраструктуры в настоящее время находится в уязвимом положении. Важно иметь представление о повторяемости замерзающих осадков и их пространственном распределении как в нынешнее время, так и в будущем [23].

В работе [24] использовались данные наземных станций на территории Северной Америки и Северной Евразии с 1975 по 2014 год. Было показано, что на Европейской территории России (ЕТР) и на территории Западной Сибири повторяемость замерзающих осадков в последние десятилетия увеличивается, за исключением некоторых южных (степных районов) и северных (арктических) территорий. По данным срочных наблюдений повторяемость выпадения замерзающих осадков на ЕТР имеет неоднородное распределение. Реже всего замерзающие осадки были

зафиксированы на севере ЕТР, на Кавказе вдоль государственной границы Российской Федерации, восточнее Уральских гор и на территории Калининградской области [11].

В рамках представленной статьи рассматриваются результаты расчета повторяемости замерзающих осадков на территории Российской Федерации по данным климатической модели INM-CM5 [4, 34]. Исследования проводились как для текущего периода современного климата («historical») с 1979 по 2014 г., так и для будущего климата (прогнозы по сценариям SSP). В настоящее время разработано несколько сценариев развития общества и окружающей среды до конца XXI века, известных как Shared Socioeconomic Pathways (SSP). Сценарий SSP1-2.6 характеризуется масштабными вложениями в социальную сферу, а также предполагает динамичное развитие экономики при эффективной работе государственных институтов. SSP5-8.5 описывает модель развития, где экономика остается высокочрезвычайно затратной в плане энергопотребления и продолжает опираться на традиционные ископаемые источники энергии. При сценарии SSP2-4.5 глобальные тенденции следуют исторически сложившемуся курсу без резких изменений или отклонений от текущей траектории развития [33]. В данной работе для расчета будущих изменений до 2100 г. использовались три климатических сценария: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5.

Новизна работы заключается в оценке возможности воспроизведения моделью INM-CM5 климатологии замерзающих осадков и получения прогноза их пространственного распределения на территории России в XXI веке.

Материалы и методика исследования

Исследования проводились для территории России с 40° по 85° с. ш. и с 15° в. д. по 165° з. д. Этот выбор обусловлен тем, что для отдельных регионов страны характерна высокая повторяемость замерзающих осадков [20]. Кроме того, значительная часть территории России расположена в высоких широтах, где изменение климата происходит быстрее, чем в среднем по земному шару, вследствие чего важно рассмотреть изменение климатологии замерзающих осадков на фоне современных и будущих изменений климата.

В качестве метеорологических данных для получения пространственного распределения замерзающих осадков в период XX–XXI вв. были выбраны расчеты, проведенные в рамках проекта CMIP6, с использованием климатической модели INM-CM5. Модель INM-CM5 является российской моделью, разработанной в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН. Данная модель имеет шаги сетки 1.5° по широте, 2° по долготе и 73 вертикальных уровня [4, 34]. Использовались расчеты модели для двух периодов: с 1979 по 2014 г. (современный климат) и с 2015 по 2100 г. (климат XXI века). Выбор периода с 1979 г. обусловлен наличием качественных данных наблюдений для верификации данных моделирования, этот временной промежуток соответствует современному климату

конца XX – начала XXI века. Кроме того, для периода с 1979 г. ранее уже проводились исследования замерзающих осадков на территории России с использованием реанализа ERA5 [11].

В ранних работах была предложена методика описания климатологии замерзающих осадков на территории Европы с использованием данных реанализа ERA-Interim [28]. Эта методика была также апробирована при выполнении оценки изменений климата на повторяемость замерзающих дождей в Европе в рамках эксперимента по региональному климатическому моделированию CORDEX [29].

В настоящей работе использовался схожий алгоритм выявления замерзающих осадков. Для расчетов использовались следующие среднесуточные метеорологические характеристики: температура воздуха на уровне 2 м и на изобарических поверхностях 925, 850 и 700 гПа. Необходимая для расчетов относительная влажность на изобарических поверхностях 925, 850 и 700 гПа была получена через удельную влажность по формуле Магнуса. Также использовались данные о количестве атмосферных осадков.

Днями с замерзающими осадками считались те дни, во время которых одновременно выполнялись следующие условия:

- средняя суточная температура воздуха на уровне 2 м имела отрицательные значения;
- хотя бы на одной из изобарических поверхностей 925, 850 и 700 гПа должна была быть положительная температура воздуха и относительная влажность более 90 %;
- сумма выпавших осадков за сутки превышала заданное пороговое значение. В работе использовались несколько пороговых значений (критериев) для количества осадков: 0.05, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10 мм за сутки. Расчеты были проведены для всех пороговых значений.

Таким образом, вероятность возникновения замерзающих осадков зависит от вертикальной температурно-влажностной структуры атмосферы, количества выпадающих осадков и приповерхностной температуры воздуха. Важно отметить, что используемый алгоритм позволяет выявлять замерзающие осадки только при наличии «классического механизма» формирования с термической структурой тропосферы по типу «теплого носа».

Для построения карт повторяемости гололеда и замерзающих осадков, а также для верификации данных моделирования были использованы данные наблюдений с наземных метеорологических станций, расположенных на территории России. Информация была получена из электронного архива ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». В работе были задействованы данные двух архивов: наблюдения за атмосферными явлениями [3] и данные основных срочных наблюдений [2]. В настоящее время в этих архивах содержатся данные 521 метеорологической станции за период наблюдений с 1966 по 2024 год. В работе рассматривался период с 1979 по 2014 г., соответствующий выбранному периоду для обработки данных моделирования. В первом

архиве содержится описание отдельных случаев всех наблюдаемых на метеорологических станциях явлений погоды. Одна запись базы данных относится к одному случаю наблюдения явления и содержит в себе данные о времени начала, времени окончания явления, его интенсивности и уникальном шифре. В данной работе были рассмотрены явления гололеда (шифр атмосферного явления 12).

Во втором архиве содержатся данные наблюдений, проводимых в стандартные синоптические сроки с интервалом 3 часа. В работе использовались данные наблюдений замерзающих осадков. Были отобраны случаи мороси или дождя с образованием гололеда в течение последнего часа до начала срока измерений (кодовая цифра 24). Также были отобраны явления, наблюдаемые в срок: морось слабая, образующая гололед; морось умеренная и сильная, образующая гололед (кодовые цифры 56 и 57); дождь слабый, образующий гололед; дождь умеренный или сильный, образующий гололед (кодовые цифры 66 и 67).

При оценке среднего годового числа дней с гололедом и замерзающими осадками для каждой метеорологической станции были отобраны только те годы, в которые для периода с октября по апрель в основных срочных наблюдениях отсутствовало не более 5 % сроков. Неполные годы были исключены из выборки.

Для территории России были построены карты среднего годового числа дней с гололедом и замерзающими осадками по данным наблюдений на метеорологических станциях и данным модели INM-CM5 для современного периода и прогностических сценариев. Были построены карты линейных трендов, вычисленных методом наименьших квадратов для периода с 2014 по 2100 г. Достоверность трендов проверялась с использованием критерия Манна – Кендалла [30, 32]. Достоверными считались только тренды, значимые на уровне 5 %. Также были построены карты разностей и отношений числа дней с замерзающими осадками за различные периоды осреднения.

Результаты

По данным визуальных наблюдений за атмосферными осадками и данным основных срочных наблюдений за явлениями погоды были построены карты среднего годового числа дней с гололедом (рис. 1а) и замерзающими осадками (рис. 1б) за период с 1979 по 2014 г. Отметим некоторые наиболее важные особенности. Гололед в данном случае представляет собой гололедно-изморозевое отложение, а замерзающие осадки – атмосферные явления. Из-за этого среднее годовое число дней на рис. 1а и 1б существенно различается. В данной статье основное внимание уделялось не абсолютным показателями повторяемости гололеда или замерзающих осадков, а особенностям их пространственного распределения и временным изменениям.

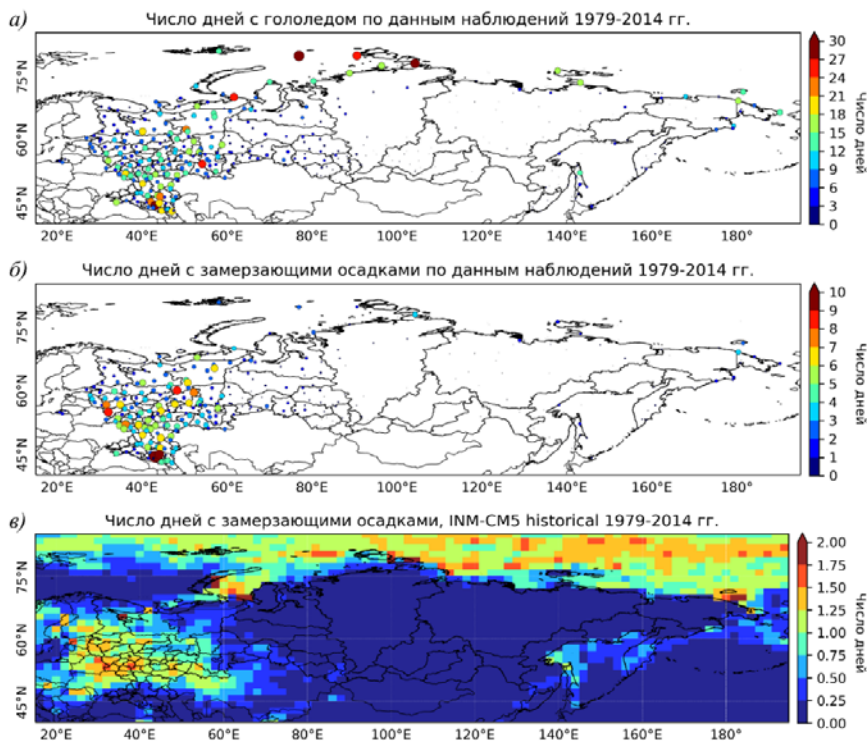


Рис. 1. Среднее годовое число дней с гололедом по данным визуальных наблюдений за атмосферными явлениями за период с 1979 по 2014 г. (а); замерзающими осадками по данным основных срочных наблюдений за период с 1979 по 2014 г. (б); замерзающими осадками по данным климатической модели INM-CM5 за период с 1979 по 2014 г. (в).

Fig. 1. Average annual number of days with glaze ice according to visual observations of weather phenomena for the period 1979–2014 (a); freezing precipitation according to main 3-hour observations for the period 1979–2014 (б); and freezing precipitation according to the INM-CM5 climate model for the period 1979–2014 (в).

Подавляющее количество замерзающих осадков выпадает на ЕТР в холодный период года. На некоторых метеорологических станциях наблюдается до 10 дней в году с замерзающими осадками. Наиболее часто они выпадают на юге страны, а также в Центральном и Приволжском федеральных округах. Небольшое количество замерзающих осадков выпадает на территории Западной Сибири, где повторяемость данного явления составляет не более 2 дней за год. В континентальной части Восточной Сибири и Дальнего Востока замерзающие осадки практически не наблюдаются. На подавляющем числе метеорологических станций, расположенных на побережье северных и дальневосточных морей, наблюдается высокая повторяемость гололеда, в отдельных районах более 30 дней в году (рис. 1б).

На рис. 1в приведена карта среднего годового числа дней с замерзающими осадками по данным модели INM-CM5 для периода с 1979 по 2014 год, полученная с использованием описанной выше методики при пороге осадков 2 мм/сут. Повторяемость замерзающих осадков на территории России, как и по данным наблюдений, распределена неравномерно. Наибольшая частота выпадения замерзающих осадков приурочена к ЕТР, где число дней с замерзающими осадками за год составляет 1–2 дня. На юге Западной Сибири отмечается около 0,25 дней в году с замерзающими осадками, восточнее замерзающие осадки практически не отмечаются. Важно отметить наличие высокой повторяемости замерзающих осадков на побережьях и островах северных и дальневосточных морей России. Можно считать, что это важная особенность успешно воспроизведена моделью INM-CM5.

Частота выпадения замерзающих осадков по станционным наблюдениям в отдельных районах в несколько раз выше, чем рассчитанные значения по данным климатической модели INM-CM5. Главная причина существенных различий состоит в том, что наблюдения на метеорологических станциях проводятся каждые три часа, включая учет атмосферных явлений между сроками и за час до срока измерения, а необходимая для расчетов продукция климатической модели INM-CM5 представлена среднесуточными данными. Замерзающие осадки – это явление, которое происходит на временных масштабах менее суток, среднее время формирования гололеда по данным инструментальных наблюдений составляет 4,5 часа и в 95 % случаев не превышает 14 часов [10]. Это значит, что существенная часть замерзающих осадков не будет улавливаться моделью, так как благоприятные условия их образования размоются в средних суточных значениях параметров температуры и влажности воздуха.

Помимо того, что на количество воспроизведенных дней с замерзающими осадками влияет временной масштаб явления и временное разрешение выходных данных модели, особенно важным является показатель порогового значения осадков. Если пороговое значение осадков небольшое, например 0,2 мм, то модель воспроизводит большое количество замерзающих осадков; если пороговое значение высокое, то критерий становится более жестким, и моделью воспроизводится все меньше рассматриваемого явления.

Важно также отметить, что применяемая методика основана на выявлении осадков, выпадающих при термической стратификации по типу «теплого носа», характерной для выпадения замерзающих дождей. Такая методика не позволяет выявлять существенное количество замерзающих осадков, выпадающих в виде мороси, что также занижает общее количество воспроизведенных явлений [16–21].

Так как в данной работе наибольшую важность представляет не количественная оценка числа дней с замерзающими осадками, а изменение их пространственного распределения в современном и будущем климате, пороговое значение осадков выбиралось подбором наибольшего значения

коэффициента детерминации R^2 между выборками наблюдений и данным модели в узлах сетки, соответствующих положению 521 метеорологической станции.

На рис. 2а представлена зависимость величины коэффициента детерминации между смоделированными с использованием модели INM-CM5 и данными наблюдений от порогового значения суточных осадков. Показано, что для визуальных наблюдений за атмосферными явлениями (случаи гололеда) максимальное значение R^2 достигается при использовании пороговых значений от 0,2 до 0,5 мм/сут и составляет около 0,25. Для основных срочных наблюдений (замерзающие осадки) максимальное значение R^2 составляет около 0,274 при пороговом значении количества осадков 2 мм/сут. Это значение и было выбрано для всех последующих расчетов (рис. 2б). Стоит также отметить, что для воспроизведения гололеда стоило бы выбирать пороговое значение осадков 0,5 мм/сут.

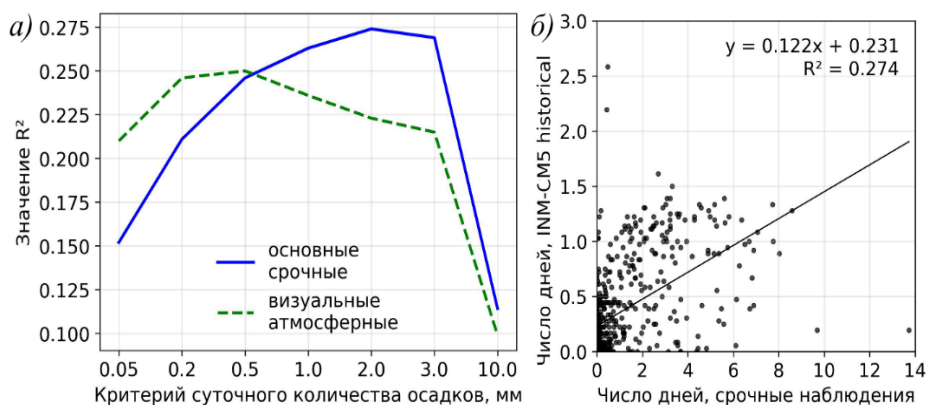


Рис. 2. Зависимость коэффициента детерминации (R^2) между смоделированными и наблюдаемыми данными от порогового значения суточных осадков (а); сравнение числа дней с замерзающими осадками по данным наблюдений и по данным модели INM-CM5 за период с 1979 по 2014 г. при пороговом значении осадков 2 мм/сут (б).

Fig. 2. Dependence of the coefficient of determination (R^2) between simulated and observed data on the threshold value of daily precipitation (а); comparison of the number of days with freezing precipitation according to observations and the INM-CM5 model for the period 1979–2014 at a precipitation threshold of 2 mm/day (б).

По данным климатической модели INM-CM5 было получено среднее годовое число дней с замерзающими осадками для периода с 2015 по 2100 г. (рис. 3). Согласно всем используемым в данной работе сценариям (SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5), относительно современного периода ожидается увеличение среднего числа дней с замерзающими осадками за год. В пределах средней полосы ЕТР замерзающие осадки будут наблюдаться до 4 дней в году, что приблизительно в 2 раза чаще, чем за современный период.

Согласно каждому из рассмотренных сценариев, наибольшее среднегодовое число дней на территории России с замерзающими осадками располагается в разных частях страны. При сценариях SSP1-2.6 и SSP2-4.5 можно выделить два пространственных максимума повторяемости замерзающих осадков с частотой 3–4 дня в году. Первый из них – регионы, располагающиеся на северо-западе страны: Смоленская, Тверская и Новгородская области, второй максимум – юг Приволжского федерального округа: Саратовская, Самарская и Оренбургская области (рис. 3а, б).

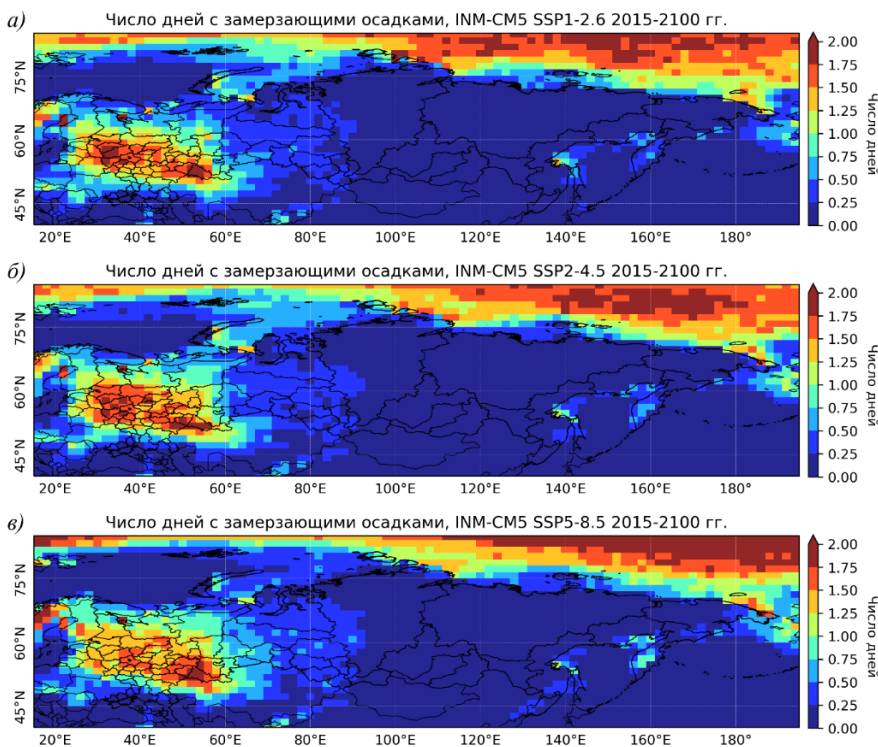


Рис. 3. Среднее годовое число дней с замерзающими осадками за период с 2015 по 2100 г. по данным климатической модели INM-CM5 для сценариев SSP1-2.6 (а); SSP2-4.5 (б); SSP5-8.5 (в).

Fig. 3. Average annual number of days with freezing precipitation for the period 2015–2100 according to the INM-CM5 climate model for scenarios SSP1-2.6 (а); SSP2-4.5 (б); and SSP5-8.5 (в).

При сценарии SSP5-8.5 выделяется один максимум, сместившийся на восток – в район Оренбургской области и республики Башкортостан (рис. 3в). Также при жестком сценарии SSP5-8.5 проявляются области увеличения повторяемости (более 0,5 дней в году) замерзающих осадков на территории Западной Сибири. На большей части территории Восточной Сибири и Дальнего Востока существенных изменений по сравнению

с современным периодом не ожидается вследствие малой повторяемости явления в абсолютных значениях.

Получен прогноз изменения средней годовой повторяемости дней с замерзающими осадками в период с 2015 по 2100 г. по данным различных сценариев климатической модели INM-CM5 (рис. 4). Области, в которых тренды числа дней с замерзающими осадками являются достоверными для 5%-ного уровня значимости, обозначены штриховкой.

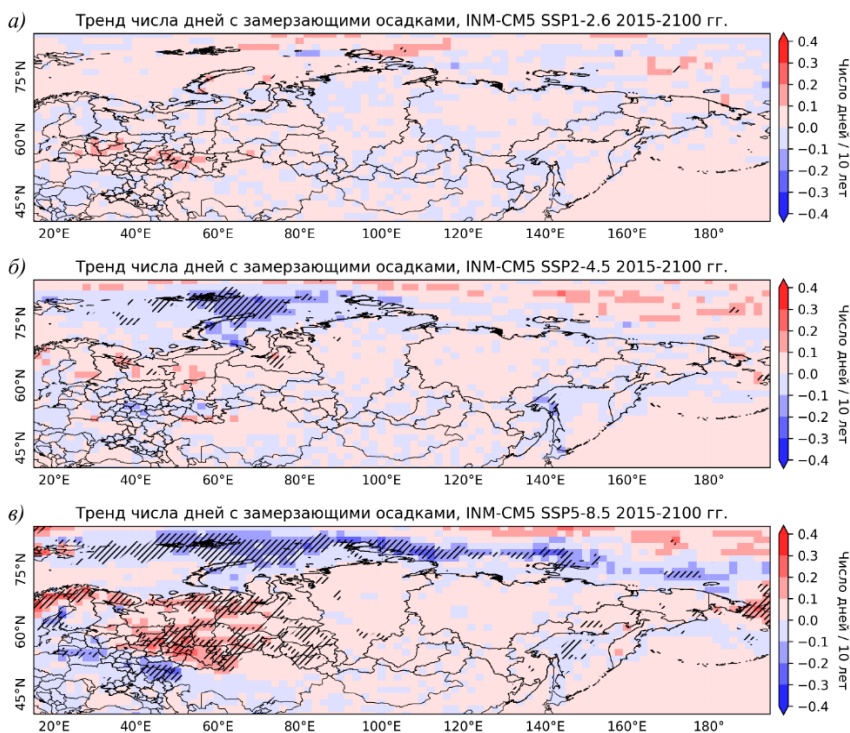


Рис. 4. Значение линейного тренда числа дней за 10 лет с замерзающими осадками за период с 2015 по 2100 г. по данным климатической модели INM-CM5 для сценариев SSP1-2.6 (а); SSP2-4.5 (б); SSP5-8.5 (в).

Fig. 4. Value of the linear trend in the number of days with freezing precipitation per decade for the period 2015–2100 according to the INM-CM5 climate model for scenarios SSP1-2.6 (a); SSP2-4.5 (b); SSP5-8.5 (v).

Для сценария SSP1-2.6 значения тренда не значимые на всей территории России (рис. 4а). Это связано с тем, что сценарий SSP1-2.6 не предполагает значительных изменений температуры воздуха и количества выпадающих осадков. При сценарии SSP2-4.5 данные модели INM-CM5 показывают уменьшение числа дней с замерзающими осадками в районе Земли Франца-Иосифа, северной части Новой Земли, а также северной части акватории Карского моря. В первую очередь это связано со значительным ростом температуры приземного слоя и, как следствие, снижением

повторяемости условий, при которых моросящие осадки замерзают при соприкосновении с холодной поверхностью. При сценарии SSP5-8.5 для большей части ЕТР тренды оказались статистически значимыми (рис.4в). При этом на юге России ожидается сокращение числа дней с замерзающими осадками. Это является очередным подтверждением предположения о смещении на север зоны, в пределах которой наблюдаются замерзающие осадки.

По данным климатической модели INM-CM5 было получено среднее годовое число дней с замерзающими осадками для конца XXI века – с 2071 по 2100 г. (рис. 5). Согласно всем используемым в данной работе сценариям (SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5), относительно современного периода на большей части ЕТР ожидается увеличение среднего числа дней с замерзающими осадками.

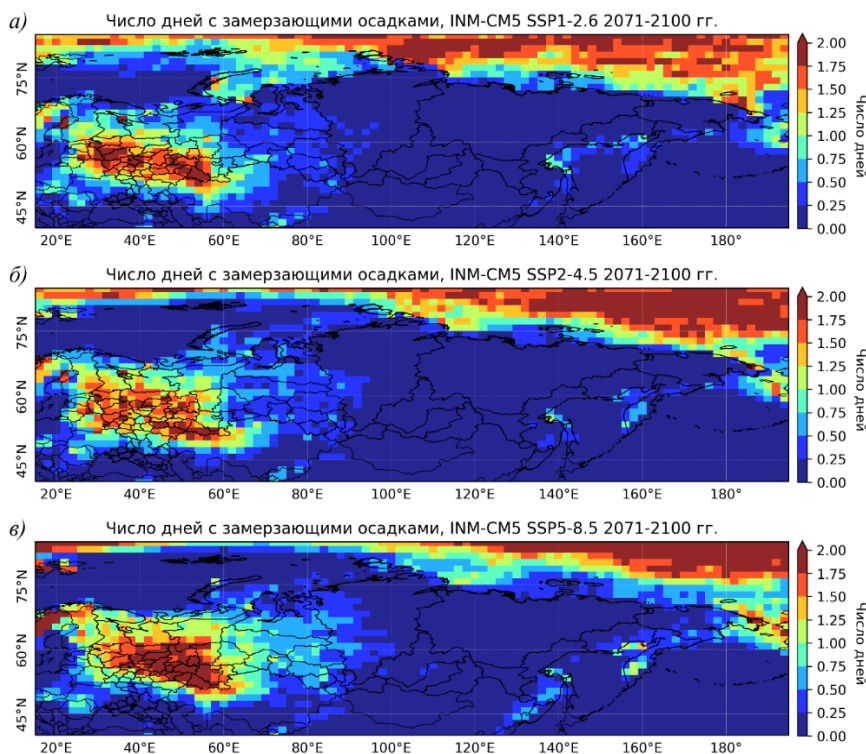


Рис. 5. Среднее годовое число дней с замерзающими осадками за период с 2071 по 2100 г. по данным климатической модели INM-CM5 для сценариев SSP1-2.6 (а); SSP2-4.5 (б); SSP5-8.5 (в).

Fig. 5. Average annual number of days with freezing precipitation for the period 2071–2100 according to the INM-CM5 climate model for scenarios SSP1-2.6 (a); SSP2-4.5 (б); SSP5-8.5 (в).

Отметим некоторые особенности рассматриваемого периода по сравнению с периодом осреднения с 2015 по 2100 г. При сценариях SSP2-4.5 и SSP5-8.5 к концу XXI века ожидается более высокая повторяемость замерзающих осадков на территории Поволжья и юге Урала, где ранее это явление было редким [8]. Также сценарий SSP5-8.5 указывает на существенное увеличение повторяемости на территории Западной Сибири. При рассмотрении сценария SSP5-8.5 можно отметить увеличение числа дней с замерзающими осадками на территории полуострова Камчатка, а также на территории Хабаровского и Приморского краев. Такой прогноз указывает на высокую вероятность формирования ледяных штормов, подобных эпизоду, произошедшему в ноябре 2020 года [5, 9].

Для наибольшей наглядности прогнозируемых изменений рассчитана разность среднего годового числа дней с замерзающими осадками между периодами 2071–2100 и 1979–2014 гг. для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5 (рис. 6).

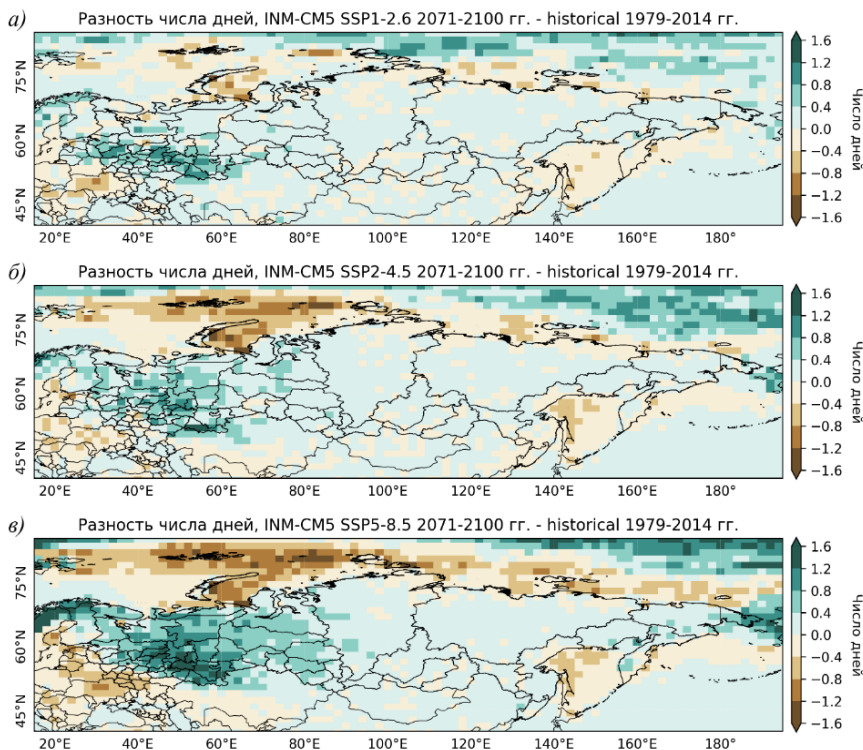


Рис. 6. Разность среднего годового числа дней с замерзающими осадками за период с 2071 по 2100 г. и за период с 1979–2014 г. по данным климатической модели INM-CM5 для сценариев SSP1-2.6 (а); SSP2-4.5 (б); SSP5-8.5 (в).

Fig. 6. Difference in the average annual number of days with freezing precipitation between the periods 2071–2100 and 1979–2014 according to the INM-CM5 climate model for scenarios SSP1-2.6 (a); SSP2-4.5 (б); and SSP5-8.5 (в).

Основные черты пространственных изменений схожи для всех рассмотренных сценариев. При сценарии SSP5-8.5 наибольшее сокращение числа дней с замерзающими осадками ожидается на юге Центрального федерального округа: в Брянской, Курской, Белгородской и Воронежской областях. Уменьшение числа дней ожидается на территориях, расположенных вблизи Северного Ледовитого океана, особенно сильное (более 1 дня за год) – в районе Карского моря при реализации сценариев SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Также уменьшение числа дней ожидается в Охотском море и Сахалинской области (рис. 6в).

Увеличение числа дней с замерзающими осадками ожидается на ЕТР севернее лесостепной зоны. С увеличением радиационного форсинга ожидается расширение области роста числа дней с замерзающими осадками на север и на восток. Так, при сценарии SSP5-8.5 ожидаются существенные различия числа дней на территории севера ЕТР и Западной Сибири. Наибольшая разность числа дней с замерзающими осадками за рассматриваемые периоды ожидается в Приволжском федеральном округе при сценарии SSP5-8.5 и составит более 1,5 дней за год.

Так как в данной статье рассматриваются результаты, которые сильно зависят от принятого критерия количества выпадающих осадков и других параметров модели, то полезно дополнительно рассмотреть относительные изменения повторяемости числа дней с замерзающими осадками на территории России (рис. 7).

Рассмотрим относительное изменение числа дней с замерзающими осадками за период конца XXI века и современного периода. При сценариях SSP2-4.5 и SSP5-8.5 ожидается существенное – более чем в 4 раза сокращение замерзающих осадков на территории прибрежной Арктики и морей Тихого океана. Такое же существенное сокращение ожидается на юге России в степных черноземных регионах. Что касается прогнозируемого увеличения повторяемости, то особенно ярко оно проявляется на территории Западной Сибири, Красноярского края и Чукотского АО, где ожидается увеличение повторяемости более чем в 5 раз.

Обсуждение результатов

В работе представлена первая попытка воспроизведения климатологии замерзающих осадков на территории России в современном и будущем климате на основании данных модели INM-CM5. Результаты климатических прогнозов имеют значимую стохастическую компоненту, в связи с этим в ходе работы рассматривались различные сценарии будущего климата. Для оценки достоверности результатов рассмотрим результаты вычислений по самому жесткому сценарию SSP5-8.5. Данные модели INM-CM5 имеют шаг по времени и пространству, большие по сравнению с некоторыми другими моделями, участвующими в проекте CMIP6, имеющими шаг по времени до 3 часов и шаг горизонтальной сетки менее 1°. Еще большие различия проявляются при сравнении данных модели INM-CM5

с реанализом ERA5 [26], имеющим шаг по времени 1 час и $0,25^\circ$ по пространству. Несмотря на значительно бóльшие шаги сетки используемая модель воспроизводит пространственное распределение замерзающих осадков на территории России подобно реанализу ERA5. Это подтверждает, что данные INM-CM5 можно использовать для оценки климатических рисков, связанных с образованием отложений гололеда.

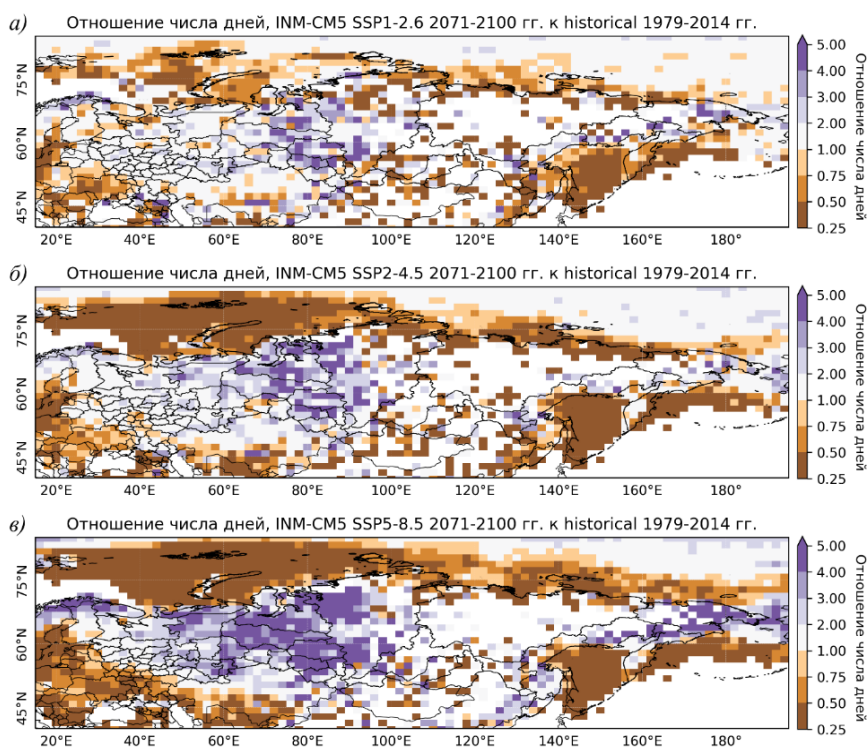


Рис. 7. Отношение среднего годового числа дней с замерзающими осадками за период с 2071 по 2100 г. к периоду с 1979 по 2014 г. по данным климатической модели INM-CM5 для сценариев SSP1-2.6 (а); SSP2-4.5 (б); SSP5-8.5 (в).
Fig. 7. Ratio of the average annual number of days with freezing precipitation for the period 2071–2100 to that for 1979–2014 according to the INM-CM5 climate model for scenarios SSP1-2.6 (a); SSP2-4.5 (б); SSP5-8.5 (в).

Рассмотрим соответствие полученных данных ранее выполненным исследованиям. Учитывая современную величину эмиссии CO_2 , можно сделать вывод о том, что удержание потепления климата в пределах $1,5^\circ\text{C}$ невозможно [25, 31]. В таком случае реализация климатического сценария SSP1-2.6 выглядит крайне маловероятной. В связи с этим, в данной статье основное внимание уделяется результатам работы, полученным для сценария SSP2-4.5 и сценария SSP5-8.5.

В Докладе об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 г. [6] и научной публикации [1] представлены тенденции современных изменений характеристик гололеда на территории России. Отмечается статистически значимое увеличение числа дней с гололедом на территории северо-востока и юго-востока Восточно-Европейской равнины, а также на севере лесной зоны Западной Сибири и на Дальнем Востоке южнее 50° с. ш. в период с 1984 по 2024 г. Отдельные ожидаемые тенденции подтверждаются результатами ранее проведенных региональных исследований. Так, например, ранее было получено увеличение повторяемости числа дней с гололедом на территории Северо-Западного федерального округа в период с 1986 по 2022 г. [13]. Автор используемой в данной статье методики Kämägäinen с коллегами также получили статистически значимый положительный тренд числа дней в северной части ЕТР по данным ансамбля из семи климатических моделей [29]. В целом, данные наблюдений хорошо согласуются друг с другом и показывают тенденцию к смещению на север области наибольшей повторяемости замерзающих осадков и гололеда.

Рассмотрим возможные причины ожидаемых изменений. В первую очередь стоит обратить внимание на изменение количества выпадающих осадков на территории России. В период с 1976 до 2020 г. отмечалось увеличение среднего годового количества осадков на северной части ЕТР и уменьшение осадков на южной части ЕТР [14]. Основной вклад в эти изменения вносили летние осадки, а наиболее важные, с точки зрения формирования гололеда, зимние осадки имели достаточно неоднородную картину изменений. В статьях, посвященных прогнозу изменения количества выпадающих осадков, ожидается увеличение количества осадков в средней полосе и на севере России и уменьшение в степной зоне юга России [22, 35]. Это одна из причин ожидаемых изменений повторяемости замерзающих осадков, так как сумма замерзающих осадков зависит от их общего количества.

Помимо осадков, существенное влияние на формирование замерзающих осадков оказывает термическая структура тропосферы. Причиной сокращения повторяемости замерзающих осадков на юге России может являться уменьшение продолжительности холодного периода. На севере ЕТР, Урале и Западной Сибири, наоборот, потепление приведет к большей повторяемости случаев адвекции теплого и влажного тропического воздуха на выхолаженный континент, что увеличит повторяемость термической структуры тропосферы по типу «теплого носа», приводящей к выпадению замерзающих дождей. Стремительный рост приземной температуры воздуха в Арктике приведет к существенному (в несколько раз) сокращению числа дней с замерзающими осадками и гололедом на побережье Северного Ледовитого океана России вследствие ослабления термического контраста холодной поверхности суши и теплого морского воздуха в переходные сезоны года.

Рассматриваемые в данной статье результаты являются первой попыткой оценить изменение характеристик замерзающих осадков на территории России в XXI веке по данным российской климатической модели INM-CM5. Верификация полученных результатов по данным основных срочных и визуальных наблюдений показала, что климатическую модель INM-CM5 можно использовать для оценки опасных явлений гололеда на территории России. В дальнейшем планируется продолжение исследования опасных явлений на территории России с привлечением данных других климатических моделей с применением ансамблевого подхода.

Заключение

В ходе работы впервые была проведена оценка повторяемости замерзающих осадков в XX и XXI вв. на территории России с использованием данных климатической модели INM-CM5. Для территории России по данным основных срочных наблюдений и визуальных наблюдений за атмосферными явлениями были получены карты среднего числа дней с замерзающими осадками и гололедом для периода с 1979 по 2014 г. Для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5 климатической модели INM-CM5 было получено пространственное распределение среднего числа дней с замерзающими осадками за периоды с 2015 по 2100 г. и с 2071 по 2100 г. Также было получено распределение абсолютных и относительных различий количества дней с замерзающими осадками в период с 2071 по 2100 г. и современного периода 1979–2014 годов.

Сравнение общего количества замерзающих осадков по данным модели INM-CM5 с данными наблюдений за современный период с 1979 по 2014 г. показало, что модель воспроизводит основные черты распределения замерзающих осадков на территории России. При сопоставлении данных INM-CM5 о количестве смоделированных случаев замерзающих осадков с данными наблюдений на 521 метеорологической станции наибольший коэффициент детерминации R^2 составил 0,274 для замерзающих осадков и 0,25 для гололеда. Существенные различия с данными наблюдений и невысокие значения коэффициентов детерминации связаны с тем, что используемый метод выявления замерзающих осадков рассматривает только классический механизм с наличием слоя таяния (стратификации по типу «теплого носа»), из-за чего значительное количество случаев замерзающих осадков, выпадающих в полностью холодной атмосфере, не воспроизводится.

Анализ результатов воспроизведения замерзающих осадков с использованием данных модели INM-CM5 для различных климатических сценариев показал, что наибольшие изменения в характеристиках рассматриваемых явлений ожидаются при использовании сценария SSP5-8.5. Показано, что увеличение повторяемости замерзающих осадков на территории России ожидается на севере ЕТР, Западной Сибири и части Чукотского АО. Наибольшая разность среднего годового чисел дней с замерзающими

осадками в периоды 2071–2100 и 1979–2014 гг. ожидается в Приволжском АО и составит более 1,5 дней. Наибольшее увеличение повторяемости замерзающих осадков ожидается в Западной Сибири и Красноярском крае – более чем в 5 раз, уменьшение – в районах островов и побережий Северного Ледовитого океана, а также Берингова и Охотского морей. Разность к концу XXI века по сравнению с современным периодом составит более 1 дня в году, то есть в отдельных районах увеличится более чем в 5 раз.

Благодарности. Авторы статьи выражают благодарность создателям архива данных расчетов по модели Земной системы ИВМ РАН. Работа выполнена в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-27-00047 «Гололедно-изморозевые отложения на территории России в условиях современных изменений климата»).

Acknowledgements. The authors of the article would like to thank the creators of the INM RAS Earth system model calculation data archive. The research was carried out at Lomonosov Moscow State University with the support of Russian Science Foundation (grant No. 24-27-00047 «Ice accretion on the territory of Russia under the conditions of modern climate change»).

Список литературы

1. Аржанова Н.М., Коришнова Н.Н. Мониторинг гололедно-изморозевых отложений на территории России // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2023. № 4 (390). С. 138-153. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-4-138-153 EDN: JVGXPJ
2. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549 <http://meteo.ru/data/basic-parameters/>
3. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Александрова Т.М., Коришнова Н.Н. Описание массива данных по атмосферным явлениям на метеорологических станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных. 2015. №. 2015620081 <http://meteo.ru/data/atmospheric-phenomena/>
4. Володин Е.М., Гришун А.С. Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели климата INM-CM5 // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2020. Т. 56, № 3. С. 255-266. DOI: 10.31857/S0002351520030128 EDN: PSNSGD
5. Гурвич И.А. и др. Ледяной шторм в Приморье 18–19 ноября 2020 года // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 6. С. 241-252. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-241-252 EDN: GZAEMK
6. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. М.: Росгидромет, 2025. 104 с.
7. Жилина И.Ю. Потепление в Арктике: возможности и риски // *Экономические и социальные проблемы России*. 2021. № 1 (45). С. 66-87. DOI: 10.31249/espr/2021.01.04 EDN: GSPTRV
8. Калинин Н.А., Смородин Б.Л. Редкое явление замерзающего дождя в Пермском крае // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 8. С. 27-35.
9. Леонов И.И., Соколичина Н.Н. Условия формирования ледяного шторма во Владивостоке в ноябре 2020 года // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2021. № 4 (382). С. 69-83. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-4-69-83 EDN: VAKIBW

10. Леонов И.И., Аржанова Н.М. Метеорологические условия образования гололедно-изморозевых отложений на территории России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2023. Т. 9, № 1. С. 107-126. DOI: 10.21513/2410-8758-2023-1-107-126 EDN: EAHNDOT
11. Леонов И.И., Соколичина Н.Н., Лаврентьева А.И. Замерзающие осадки на Европейской территории России в 1979–2022 гг. и их воспроизведение реанализом ERA5 // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2024. № 4. С. 109-127. DOI: 10.37162/2618-9631-2024-4-109-127 EDN: RBVJXC
12. РД 52.04.563-2002. Инструкция «Критерии опасных метеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения».
13. Суркова Г.В., Лаврентьева А.И., Качева Е.С. Региональные особенности повторяемости гололеда на севере европейской территории России на фоне меняющегося климата // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024. Т. 70, № 1. С. 21-32. DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-1-21-32. EDN: XOVKCQ
14. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. Росгидромет. СПб.: Научное издание, 2022. 676 с.
15. Филатов Н.Н. и др. Изменения и изменчивость климата европейского Севера России и их влияние на водные объекты // *Арктика: экология и экономика*. 2012. № 2. С. 80-93.
16. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. I. Аэропорты московского аэроузла // *Метеорология и гидрология*. 2003. № 6. С. 40-58.
17. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. II. Аэропорт Минеральные Воды // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 2. С. 27-42.
18. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. и др. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. III. Аэропорт Одесса // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 9. С. 5-18.
19. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Завьялова А.А. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. IV. Аэропорт Нижний Новгород // *Метеорология и гидрология* 2007. № 7. С. 25-39.
20. Шакина Н.П., Хоменко И.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты // *Труды Гидрометцентра России*. 2012. Вып. 348. С. 130-161.
21. Шакина Н.П., Хоменко И.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Условия образования замерзающих осадков в европейской России и катастрофический гололед в декабре 2010 г. // *Турбулентность, динамика атмосферы и климата: Труды Международной конференции, посвященной памяти академика А.М. Обухова*. М.: ГЕОС, 2014. С. 412-423.
22. Dai A., Zhao T., Chen J. Climate change and drought: a precipitation and evaporation perspective // *Current Climate Change Reports*. 2018. Vol. 4, no. 3. P. 301-312. DOI: 10.1007/s40641-018-0101-6 EDN: VHOEPU
23. Forbes R. et al. Towards predicting high-impact freezing rain events // *ECMWF Newsletter*. 2014. Vol. 141. P. 15-21.
24. Groisman P., Bulygina O., Yin X., Vose R., Gulev S., Hanssen-Bauer I., Førland E. Recent changes in the frequency of freezing precipitation in North America and Northern Eurasia // *Environmental Research Letters*. 2016. Vol. 11, no. 4. P. 045007. DOI: 10.1088/1748-9326/11/4/045007 EDN: WWDXZJ
25. Hausfather Z., Peters G. P. Emissions – the 'business as usual' story is misleading // *Nature*. 2020. Vol. 577, no. 772. P. 618-620. DOI: 10.1038/d41586-020-00177-3 EDN: FWEUYR
26. Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146, no. 730. P. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803 EDN: DKXYTO
27. Jeong D.I., Cannon A.J., Zhang X. Projected changes to extreme freezing precipitation and design ice loads over North America based on a large ensemble of Canadian regional climate model simulations // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2019. Vol. 19, no. 4. P. 857-872. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-2018-395>

28. Kämäräinen M. et al. A method to estimate freezing rain climatology from ERA-Interim reanalysis over Europe // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2017. Vol. 17, no. 2. P. 243-259. DOI: 10.5194/nhess-17-243-2017 EDN: YWYNAV
29. Kämäräinen M. et al. Estimates of present-day and future climatologies of freezing rain in Europe based on CORDEX regional climate models // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2018. Vol. 123, no. 23. P. 13291-13304. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018JD029131>
30. Kendall M. Rank correlation measures. London: Charles Griffin, 1975. 202 p.
31. Lamboll R.D. et al. Assessing the size and uncertainty of remaining carbon budgets // *Nature Climate Change*. 2023. Vol. 13, no. 12. P. 1360-1367. DOI: 10.1038/s41558-023-01848-5 EDN: WMTRXM
32. Mann H.B. Nonparametric tests against trend // *Econometrica: Journal of the Econometric Society*. 1945. P. 245-259. DOI: 10.2307/1907187.
33. O'Neill B.C. et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6 // *Geoscientific Model Development*. 2016. Vol. 9, no. 9. P. 3461-3482.
34. Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V. et al. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // *Climate Dynamics*. 2017. Vol. 49. P. 3715-3734. DOI: 10.1007/s00382-017-3539-7 EDN: XNCPEA
35. Zhang W. et al. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world // *Science Advances*. 2021. Vol. 7, no. 31. P. eabf8021. DOI: 10.1126/sciadv.abf8021 EDN: VGCQVN
36. Zerr R. J. Freezing rain: An observational and theoretical study // *Journal of Applied Meteorology*. 1997. Vol. 36, no. 12. P. 1647-1661.

References

1. Arzhanova N.M., Korshunova N.N. Monitoring gololedno-izmorzevykh otlozhenii na territorii Rossii [Monitoring of glaze-ice on the territory of Russia]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2023, no. 4(390), pp. 138-153. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-4-138-153 [in Russ.].
2. Bulygina O.N., Veselov V.M., Razuvaev V.N., Alexandrova T.M. Opisaniye massiva srochnykh dannykh ob osnovnykh meteorologicheskikh parametrakh na stantsiyakh Rossii [Description of an array of urgent data on the main meteorological parameters at stations in Russia]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh no. 2014620549. Available at: <http://meteo.ru/data/basic-parameters/> [in Russ.].
3. Bulygina O.N., Veselov V.M., Alexandrova T.M., Korshunova N.N. Opisaniye massiva dannykh po atmosferynym yavleniyam na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii [Description of an array of data on atmospheric phenomena at meteorological stations in Russia]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh, 2015, no. 2015620081. Available at: <http://meteo.ru/data/atmospheric-phenomena/> [in Russ.].
4. Volodin E.M., Gritsun A.S. Simulation of possible future climate changes in the 21st century in the INM-CM5 climate model. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, vol. 56, no. 3, pp. 218-228. DOI: 10.1134/S0001433820030123.
5. Gurvich I.A. et al. Ledyanoi shtorm v Primor'e 18-19 noyabrya 2020 goda [Ice storm in Primorye on November 18–19, 2020]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]*, 2021, vol. 18, no. 6, pp. 241-252. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-241-252 [in Russ.].
6. Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2024 god [Report on climate features in the Russian Federation for 2024]. Moscow, Rosgidromet, 2025, 104 p. [in Russ.].
7. Zhilina I.Yu. Potepleniye v Arktike: vozmozhnosti i riski [Warming in the Arctic: opportunities and risks]. *Ekonomicheskie i sotsial'nyye problemy Rossii [Economic and social problems of Russia]*, 2021, no. 1 (45), pp. 66-87. DOI: 10.31249/espr/2021.01.04 [in Russ.].
8. Kalinin N.A., Smorodin B.L. Redkoe yavlenie zamerzayushchego dozhdyia v Permskom krae [Unusual phenomenon of freezing rain in Perm Krai]. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, no. 8, pp. 521-528. DOI: doi.org/10.3103/S1068373912080031

9. Leonov I.I., Sokolikhina N.N. Usloviya formirovaniya ledyanogo shtorma vo Vladivostoke v noyabre 2020 goda [Formation conditions of an ice storm in Vladivostok in November 2020]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy Hydrometeorological Research and Forecasting*, 2021, no. 4(382), pp. 69-83. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-4-69-83 [in Russ.].

10. Leonov I.I., Arzhanova N.M. Meteorologicheskie usloviya obrazovaniya gololedno-izmorzevykh otlozhenii na territorii Rossii [Meteorological conditions for the formation of ice accretions in Russia]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya [Fundamental and Applied Climatology]*, 2023, vol. 9, no. 1, pp. 107-126. DOI: 10.21513/2410-8758-2023-1-107-126 [in Russ.].

11. Leonov I.I., Sokolikhina N.N., Lavrenteva A.I. Zamerzayushchie osadki na Evropeiskoi territorii Rossii v 1979-2022 gg. i ikh vosproizvedenie reanalizom ERA5 [Freezing precipitation in European Russia in 1979-2022 and its reproduction by the ERA5 reanalysis]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2024, no. 4, pp. 109-127. DOI: 10.37162/2618-9631-2024-4-109-127 [in Russ.].

12. RD 52.04.563-2002. Instruktsiya «Kriterii opasnykh meteorologicheskikh yavlenii i porjadok podachi shtormovogo soobshcheniya» [Guidance document 52.04.563-2002. Instruction "Criteria for hazardous meteorological phenomena and the procedure for submitting a storm message"] [in Russ.].

13. Sarkova G.V., Lavrenteva A.I., Tkacheva E.S. Regional'nye osobennosti povtoryaemosti gololeda na severe evropeiskoi territorii Rossii na fone menyayushchegosya klimata [Regional features of glaze ice events frequency in the north of the European territory of Russia in the current changing climate]. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2024, vol. 70, no. 1, pp. 21-32. DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-1-21-32 [in Russ.].

14. Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii [The third assessment report on climate change and its consequences in the Russian Federation]. V. M. Kattsov (Ed.). St. Petersburg, Naukoemkie tekhnologii Publ., 2022, 676 p. [in Russ.].

15. Filatov N.N. et al. Izmeneniya i izmenchivost' klimata evropeiskogo Severa Rossii i ikh vliyaniye na vodnye ob'ekty [Changes and variability of the climate of the European North of Russia and their impact on water bodies]. *Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: Ecology and Economy]*, 2012, no. 2, pp. 80-93 [in Russ.].

16. Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R. Conditions of freezing precipitation at some airports in Russia and the CIS. I. Airports of the Moscow air hub. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2003, no. 6, pp. 28-43.

17. Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R. Usloviya vypadeniya zamerzayushchikh osadkov v nekotorykh aeroportakh Rossii i SNG. II. Aeroport Mineral'nye Vody [Conditions of freezing precipitation at some airports in Russia and the CIS. II. Mineralnye Vody Airport]. *Meteorologiya i gidrologiya [Russian Meteorology and Hydrology]*, 2005, no. 2, pp. 27-42 [in Russ.].

18. Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R. et al. Conditions of freezing precipitation at some airports in Russia and the CIS. III. Odessa Airport. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2005, no. 9, pp. 1-10.

19. Shakina N.P., Skriptunova E.N., Zav'yalova A.A. Conditions of freezing precipitation at some airports in Russia and the CIS. IV. Nizhny Novgorod Airport. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2007, vol. 32, no. 7, pp. 431-440 [in Russ.].

20. Shakina N.P., Khomenko I.A., Ivanova A.R., Skriptunova E.N. Obrazovanie i prognozirovaniye zamerzayushchikh osadkov: obzor literatury i nekotorye novye rezul'taty [Formation and forecasting of freezing precipitation: a literature review and some new results]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiiskoi Federatsii [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation]*, 2012, no. 348, pp. 130-161 [in Russ.].

21. Shakina N.P., Khomenko I.A., Ivanova A.R., Skriptunova E. N. Usloviya obrazovaniya zamerzayushchikh osadkov v evropeiskoi Rossii i katastroficheskii gololed v dekabre 2010 g. [Conditions for the formation of freezing precipitation in European Russia and the catastrophic ice cover in December 2010]. *Turbulentnost', dinamika atmosfery i klimata: Trudy Mezhdunarodnoi*

konferentsii, posvyashchennoi pamyati akademika A. M. Obukhova [Turbulence, atmospheric dynamics and climate: Proceedings of the International Conference dedicated to the memory of Academician A.M. Obukhov]. Moscow, GEOS publ., 2014, pp. 412-423 [in Russ.].

22. Dai A., Zhao T., Chen J. Climate change and drought: a precipitation and evaporation perspective. *Current Climate Change Reports*, 2018, vol. 4, no. 3, pp. 301-312. DOI: 10.1007/s40641-018-0101-6.

23. Forbes R. et al. Towards predicting high-impact freezing rain events. *ECMWF Newsletter*, 2014, vol. 141, pp. 15-21.

24. Groisman P., Bulygina O., Yin X., Vose R., Gulev S., Hanssen-Bauer I., Førland E. Recent changes in the frequency of freezing precipitation in North America and Northern Eurasia. *Environmental Research Letters*, 2016, vol. 11, no. 4, pp. 045007. DOI: 10.1088/1748-9326/11/4/045007.

25. Hausfather Z., Peters G.P. Emissions – the 'business as usual' story is misleading. *Nature*, 2020, vol. 577, no. 772, pp. 618-620. DOI: 10.1038/d41586-020-00177-3.

26. Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, no. 730, pp. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

27. Jeong D.I., Cannon A.J., Zhang X. Projected changes to extreme freezing precipitation and design ice loads over North America based on a large ensemble of Canadian regional climate model simulations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 857-872. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-2018-395>

28. Kämäräinen M. et al. A method to estimate freezing rain climatology from ERA-Interim reanalysis over Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 243-259. DOI: 10.5194/nhess-17-243-2017.

29. Kämäräinen M. et al. Estimates of present-day and future climatologies of freezing rain in Europe based on CORDEX regional climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, vol. 123, no. 23, pp. 13291-13304. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018JD029131>

30. Kendall M. Rank correlation measures. London, Charles Griffin, 1975. 202 p.

31. Lamboll R.D. et al. Assessing the size and uncertainty of remaining carbon budgets. *Nature Climate Change*, 2023, vol. 13, no. 12, pp. 1360-1367. DOI: 10.1038/s41558-023-01848-5.

32. Mann H.B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1945, pp. 245-259. DOI: 10.2307/1907187.

33. O'Neill B.C. et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 2016, vol. 9, no. 9, pp. 3461-3482.

34. Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V. et al. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5. *Climate Dynamics*, 2017, vol. 49, pp. 3715-3734. DOI: 10.1007/s00382-017-3539-7.

35. Zhang W. et al. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world. *Science Advances*, 2021, vol. 7, no. 31, pp. eabf8021. DOI: 10.1126/sciadv.abf8021.

36. Zerr R.J. Freezing rain: An observational and theoretical study. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, vol. 36, no. 12, pp. 1647-1661.

Поступила 08.11.2025; принята в печать 17.03.2026
Submitted 08.11.2025; accepted for publication 17.03.2026.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-1-51-68>

УДК 551.5

Крупномасштабная атмосферная циркуляция летом 2025 года в Северном полушарии и ее роль в формировании экстремальных погодных условий на территории России

**К.А. Сумерова¹, В.М. Хан^{1,2},
В.А. Тищенко¹, Р.М. Вильфанд¹**

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук, г. Москва, Россия
sum-ksusha@yandex.ru

В работе проведено комплексное исследование крупномасштабных метеорологических и циркуляционных особенностей летнего сезона 2025 года в Северном полушарии. На основе анализа полей геопотенциала, приземного давления, температуры воздуха, осадков, индексов атмосферной циркуляции, температуры поверхности океана и состояния морского льда исследованы особенности атмосферных процессов в Северном полушарии и их влияние на экстремальные погодные явления на территории Российской Федерации летнего сезона 2025 года. Выявлена определяющая роль меридиональных форм циркуляции: устойчивой ложбины над Европейской территорией России и блокирующего антициклона над Сибирью. Установлены связи между фазами индексов атмосферной циркуляции (EU, POL, WA) и режимами температуры, осадков, а также состоянием морского льда в Арктике. Результаты комплексного анализа имеют значение для совершенствования сезонных прогнозов и оценки климатических рисков.

Ключевые слова: температура воздуха, атмосферные осадки, крупномасштабная атмосферная циркуляция, температура поверхности океана, индексы циркуляции, лед в Арктике, экстремальные, неблагоприятные и опасные погодные явления, волны тепла, сильные осадки, засуха, экономические последствия

Large-Scale Atmospheric Circulation over the Northern Hemisphere in Summer of 2025 and Its Contribution to Extreme Weather in Russia

**K.A. Sumerova¹, V.M. Khan^{1,2},
V.A. Tishchenko¹, R.M. Vilfand¹**

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
sum-ksusha@yandex.ru

This study presents a comprehensive analysis of large-scale meteorological and circulation anomalies during the summer season of 2025 in the Northern Hemisphere. Based on the analysis of the fields of geopotential height, surface pressure, air temperature, precipitation, atmospheric circulation indices, sea surface temperature, and sea ice conditions, the paper investigates the features of atmospheric processes in the Northern Hemisphere and their role in triggering extreme and high-impact weather events across Russia in the summer season of 2025. The key role of meridional circulation patterns was revealed: a stable trough over the European part of Russia and a blocking anticyclone over Siberia. Relationships between the phases of the atmospheric circulation indices (EU, POL, WA) and temperature regimes, precipitation patterns, as well as the state of Arctic sea ice are determined. The results of the comprehensive analysis are important for improving seasonal forecasts and assessing climate risks.

Keywords: air temperature, precipitation, large-scale atmospheric circulation, sea surface temperature, circulation indices, Arctic sea ice, extreme, adverse, and severe weather events, heat waves, heavy precipitation, drought, economic impacts

Введение

В условиях наблюдаемого изменения климата [16] особую актуальность приобретает анализ особенностей атмосферной циркуляции, определяющих пространственно-временное распределение неблагоприятных и опасных метеорологических явлений [14]. Летний сезон 2025 года в Северном полушарии занял третью позицию в ряду самых теплых за 176-летний период наблюдений, со средней аномалией температуры воздуха $+1.27$ °C. Десять наиболее теплых летних сезонов в ранжированном ряду приходятся на период начиная с 2015 года. Над континентальными районами Северного полушария аномалия составила $+1.47$ °C, что соответствует пятому рангу за всю историю инструментальных наблюдений с 1851 года [20]. Несмотря на выраженный долгосрочный тренд к повышению температуры воздуха, региональные климатические аномалии демонстрируют значительную межгодовую изменчивость, обусловленную сложным взаимодействием различных пространственно-временных масштабов атмосферных процессов [23].

Изучение циркуляционных механизмов, которые формировали аномальные погодные условия в летний период, имеет важное теоретическое и прикладное значение. Теоретическая значимость работы заключается в углублении понимания механизмов взаимодействия между крупномасштабной циркуляцией, региональными аномалиями и процессами в Арктической климатической системе. Полученные результаты комплексного анализа могут быть полезны при усовершенствовании гидрометеорологических прогнозов и оценке рисков для ключевых отраслей экономики (энергетика, сельское хозяйство, транспорт), подверженных влиянию экстремальных погодных явлений.

Особый интерес представляет анализ роли макроциркуляционных индексов в формировании термического режима и условий увлажнения на территории Северной Евразии [7, 28]. При этом подтверждается, что

существенный вклад в региональные климатические аномалии вносят процессы в Арктической зоне, где наблюдаемое уменьшение площади морского льда может оказывать влияние на характеристики атмосферной циркуляции в умеренных широтах Северного полушария [11].

Целью настоящего исследования является комплексный анализ особенностей атмосферной циркуляции в Северном полушарии, термического режима и условий увлажнения в Северной Евразии с выделением опасных явлений на территории Российской Федерации в летний сезон 2025 года.

В рамках работы проводилось выявление пространственно-временной структуры аномалий поля геопотенциала в стратосфере, средней тропосфере и приземного давления; анализ связи циркуляционных условий с фазами основных макроциркуляционных индексов; исследование особенностей распределения аномалий поля температуры поверхности океана, термического режима и распределения осадков в приземном слое; оценка состояния морского ледяного покрова Арктики и проведение анализа пространственно-временного распределения опасных и неблагоприятных метеорологических явлений.

Материалы и методы исследования

В основу исследования положен анализ пространственно-временной изменчивости макромасштабных метеорологических параметров Северного полушария за летний сезон 2025 года. Для выполнения работы использован комплекс методов, включая синоптико-климатический анализ, расчет индексов атмосферной циркуляции и статистическую обработку рядов данных.

Исходные метеорологические поля геопотенциала на стандартных изобарических поверхностях (AT-10, AT-500), приземного давления, температуры поверхности океана, приземного воздуха и атмосферных осадков получены из базы данных реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды [13]. Рассматривались восемь индексов атмосферной циркуляции, являющихся количественными характеристиками состояния атмосферы: Восточно-атлантическое колебание (EA), Арктическое колебание (AO), Североатлантическое колебание (NAO), Западно-атлантическое колебание (WA), Евразийское колебание (EU), Полярное колебание (POL), Тихоокеанское-северо-американское колебание (PNA), Западно-тихоокеанское колебание (WP).

Расчет индексов макроциркуляции выполнен по методике, предложенной в работах [2, 3]. Данные о состоянии морского ледяного покрова Арктики получены на основе пассивного микроволнового зондирования SSMR-SSM/I-SSMIS-AMSR2, предоставленные ФГБУ «ААНИИ». Для анализа климатических аномалий привлекались актуальные информационные отчеты климатического мониторинга из Национального центра данных по снегу и льду [21] и Национального центра по прогнозам окружающей среды NOAA [20]. Также использованы данные об опасных

погодных явлениях и агрометеорологические бюллетени ФГБУ «Гидрометцентр России».

Результаты

Циркуляционные условия летнего сезона в Северном полушарии

В стратосфере в осредненном за летний сезон поле геопотенциала на уровне АТ-10 сохранялся характерный для теплого времени года режим циркуляции. Циркумполярный антициклон с центром над Северным полюсом был близок к норме по интенсивности. Анализ интенсивности и положения циркумполярного антициклона за июль и август также не выявил отклонений от нормы. Единственным исключением стал июнь, когда над полярным регионом отмечались отрицательные аномалии геопотенциала, что свидетельствует о временном ослаблении стратосферного антициклона. Переход к зимнему режиму циркуляции осуществился в третьей декаде августа 2025 года.

Осредненное за летний период поле геопотенциала на уровне АТ-500 характеризовалось значительной пространственной неоднородностью, с выраженной меридиональной составляющей (рис. 1а). Над Европейской территорией России (ЕТР) практически весь сезон располагалась обширная область отрицательных аномалий. Она была связана с квазистационарной ложбиной, распространявшейся от околполярного вихря. Формирование данной ложбины отражается преобладанием отрицательной фазы Евразийской моды EU, которая была наиболее выражена в июле (индекс -0,91) [3].

Положительная фаза NAO, наблюдавшаяся в течение лета, не оказала доминирующего влияния на формирование погодных условий в восточно-европейском регионе. Основную роль здесь сыграла устойчивая отрицательная фаза EU, поддерживавшая квазистационарную ложбину над ЕТР. Именно этот процесс определял режим погоды в сезоне, в то время как влияние NAO оказалось вторичным и локализовалось преимущественно в западной части Евразийского континента.

Формирование мощного высотного антициклона над Сибирью и полуостровом Таймыр в августе (аномалии +21 дам) согласуется с резким смещением индекса Полярного колебания (POL) в отрицательную фазу до -1.13. Одновременно с этим наблюдавшиеся в течение всего лета положительные аномалии геопотенциала в высоких широтах поддерживались устойчивой отрицательной фазой WA (со значениями около -1.10 в июне-июле), с которой связаны меридиональная форма циркуляции и возникновение блокирующих процессов в арктическом регионе [28].

В тихоокеанском регионе ослабление алеутской ложбины околполярного циклона, соответствующее отрицательной фазе WP, сменилось в августе формированием хорошо выраженного высотного гребня над западом Северной Америки. Данная перестройка оказалась синхронна со сменой знака Тихоокеанско-Североамериканского индекса (PNA) с отрицательного на статистически значимое положительное значение (+0.86).

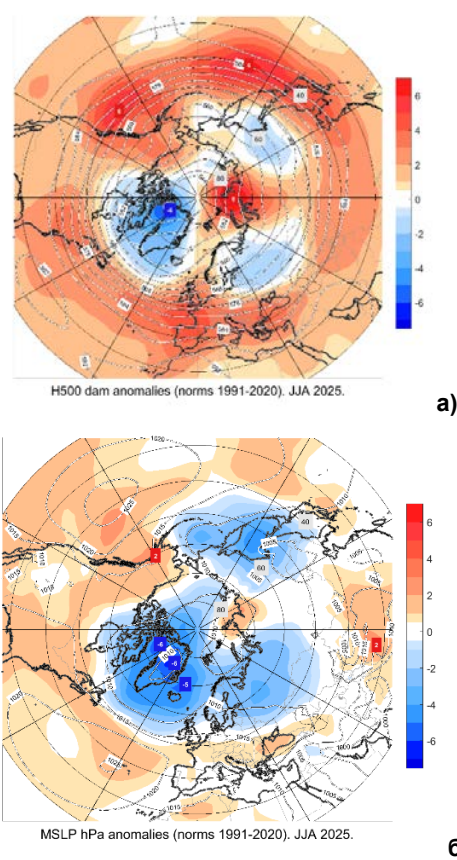


Рис. 1. Карта осредненных за летний сезон 2025 г. аномалий и значений геопотенциала на поверхности АТ-500 (а) и приземного давления (б). Аномалии рассчитаны относительно периода 1991–2020 гг. по данным реанализа ERA5.

Fig. 1. Map of anomalies relative to the period 1991-2020 and geopotential values on the surface of AT-500 (a) and mean sea level pressure (б) averaged over the summer season 2025 according to ERA5 reanalysis.

Лето 2025 года характеризовалось устойчивым меридиональным характером атмосферной циркуляции в средних и высоких широтах. Квазистационарные барические образования, такие как обширная ложбина над восточноевропейским сектором и сопряженные с ней блокирующие антициклоны в сибирско-арктическом регионе стали определяющими погодный режим процессами сезона.

По данным Климатического и прогностического центра CPC NOAA, в течение летнего сезона 2025 г. в тропической зоне Тихого океана сохранялись условия, определяемые нейтральной фазой Эль-Ниньо (ENSO) [10]. Это означает, что данный фактор не оказывал значительного влияния на циркуляционные процессы в умеренных широтах Северного полушария

в прошедшем сезоне [19]. Из чего следует, что наблюдавшиеся аномалии в барическом поле Северного полушария, такие как устойчивая ложбина над ЕТР (связанные с отрицательной фазой EU) и интенсивные антициклоны над Сибирью (отрицательная фаза POL), были в первую очередь обусловлены внутренней изменчивостью циркуляции атмосферы средних широт и региональными взаимодействиями в системе «океан – атмосфера – суша» [15].

Результаты анализа поля приземного давления соответствуют особенностям, выявленным в циркуляции в средней тропосфере (рис. 1б). В Атлантике были хорошо выражены оба центра действия атмосферы: глубокий Исландский минимум (с аномалией до -6 гПа над Гренландией) и обширный Азорский антициклон (с центром в районе Азорских островов). Эта конфигурация соответствует положительной фазе NAO, наблюдавшейся в летнем сезоне (табл. 1).

Таблица 1. Индексы атмосферной циркуляции за летний сезон
Table 1. Atmospheric Circulation Indices for the Summer Season

Индекс	Июнь	Июль	Август
EA	-0.51	-0.03	-0.23
NAO	1.03	0.62	0.26
AO	1.50	0.25	-0.13
WA	-1.10	-1.06	-0.38
EU	-0.35	-0.91	-0.42
POL	0.93	-0.08	-1.13
WP	-0.74	-0.83	-0.78
PNA	-0.31	-0.24	0.86

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения индексов, имеющие статистическую значимость для анализа.

Однако синоптическая обстановка над Европой часто определялась формированием устойчивых блокирующих антициклонов. Частое влияние отрогов Азорского максимума на Западную и Центральную Европу [9] в июне, а также формирование самостоятельных антициклонов над севером Европы в июле, нарушали классическую для положительной фазы NAO схему западно-восточного переноса. Формирование блокирующих антициклонов привело к меридиональным траекториям циклонов и обусловило положительные аномалии давления над Центральной и Южной Европой. Одновременно устойчивая отрицательная фаза EU (табл. 1) [28], проявившаяся на уровне АТ-500 в виде квазистационарной ложбины, на приземных картах выразилась в виде обширной области отрицательных аномалий давления над Скандинавией, ЕТР, Уралом и Западной Сибирью. Это подтверждает роль EU как ключевого модального индекса, определявшего погодные условия в восточноевропейском регионе летом 2025 года.

Формирование интенсивного приземного антициклона над Таймыром в августе (аномалия +8 гПа) является прямым следствием процессов в средней тропосфере, где в этот период образовалась блокирующая структура, и находит количественное выражение в резко отрицательном значении индекса Полярного колебания [26]. Усиление антициклонической активности в высоких широтах в течение сезона также поддерживалось устойчивой отрицательной фазой WA [28], способствовавшей меридиональным формам циркуляции. Устойчивость блокирующих процессов над Сибирью и Арктикой, наблюдавшихся в летнем сезоне, согласуется с современными исследованиями, указывающими на интенсификацию процессов блокирования в высоких широтах [29].

Конфигурация приземных ЦДА в Тихом океане отражается индексами атмосферной циркуляции. Смещение к западу и заполнение Алеутского минимума соответствовало отрицательной фазе WP. Последующее восстановление Алеутского минимума в августе совпало с переходом PNA в резко положительную фазу (+0.86), что типично для формирования гребня высокого давления над западом Северной Америки и углубления ложбины в восточной акватории Тихого океана [7].

Распределение аномалий температуры поверхности океана в Северном полушарии и ледовая обстановка в Арктике

На большей части акватории Тихого океана в Северном полушарии преобладали положительные аномалии температуры поверхности океана (ТПО), достигавшие максимума (+2–3 °С) в западных частях океанов. Такая конфигурация аномалий ТПО способствует усилению термической конвекции над западной частью Тихого океана и генерирует возмущения в барическом поле, оказывая влияние на планетарный волновой поток в атмосфере. Это, в свою очередь, могло отразиться на положении и глубине Алеутской депрессии [5]. Пространственное распределение аномалий ТПО с противоположными знаками в западной (положительные) и восточной (отрицательные) частях северо-тихоокеанского бассейна соответствовало отрицательной фазе Тихоокеанской декадной осцилляции (PDO) [18].

В условиях нейтральной фазы ENSO, отрицательная фаза PDO, наблюдавшаяся в сезоне 2025 г, обусловила формирование характерной структуры барических систем над северной частью Тихого океана: усиление и смещение к северо-востоку океана центра Гавайского антициклона, что привело к смещению Алеутского барического минимума к западу, в сторону дальневосточных регионов России, при сохранении устойчивой отрицательной фазы WP [18].

В Атлантическом океане положительные аномалии ТПО были менее выражены. Область отрицательных аномалий ТПО к югу от Гренландии и в море Баффина, наблюдавшаяся на фоне положительной фазы NAO, могла быть связана в этом районе с усилением выноса холодных вод и дрейфующего льда с севера, что нивелировало общий прогрев океана.

Значительный прогрев акватории Карского моря (аномалии ТПО до $+3 - +4$ °С), связанный с усиленным выносом теплых атлантических вод по системе течений, продолжающих Гольфстрим: Норвежского, Западно-Новоземельского, Восточно-Новоземельского, создавал устойчивый источник тепла и влаги для приводного слоя атмосферы [23]. Это могло быть одной из основных причин увеличения высот геопотенциала в нижней тропосфере и быть дополнительным фактором длительной устойчивости антициклона, сформировавшегося над севером Сибири и Таймыром в августе. Таким образом, аномально прогретая поверхность океана способствует увеличению высоты геопотенциала в нижней и средней тропосфере, что создает условия, способствующие развитию блокирующих западно-восточный перенос ситуаций в тропосфере [22].

Ледовая обстановка на акваториях районов российского сектора Северного Ледовитого океана характеризовалась к середине сезона экстремально низкой ледовитостью в Баренцевом и Карском морях, что согласуется с зафиксированными здесь крупными положительными аномалиями температуры поверхностного слоя воды. Аналогичная ситуация наблюдалась в Канадском секторе Арктики (Гудзонов залив и море Баффина). Ранние сроки очищения ото льда акваторий моря Лаптевых и западной части Восточно-Сибирского моря также соответствовали общей тенденции потепления последних лет. В июле аномально низкая площадь ледяного покрова сохранилась в Баренцевом, Карском морях, море Лаптевых, на западе Восточно-Сибирского моря. Таким образом, подтверждается устойчивое воздействие на регион положительных аномалий ТПО и преобладание способствующих таянию льда циркуляционных режимов атмосферы, связанных с отрицательной фазой индекса WA. К завершению июля по данным мониторинга, выполняемому в ФГБУ «ААНИИ», на участке трассы Северного морского пути в Карском море, за исключением подходов к проливу Вилькицкого и архипелагу Северная земля, льда не было, у восточного побережья Новой Земли сохранялся остаток Новоземельского ледяного массива, его площадь была на 14 % меньше нормы [1]. Окончательное очищение трассы Северного морского пути ото льда на востоке произошло только после 20 сентября. В юго-восточной части Баренцева моря очищение моря ото льда наблюдалось в сроки на 10–20 суток раньше нормы, в море Лаптевых, Восточно-Сибирском море и в юго-западной части Чукотского моря – в сроки на 5–10 суток раньше нормы, местами в сроки, близкие к норме. Таким образом, в середине теплого сезона в российском секторе Арктики на западе наблюдались более легкие, чем обычно, ледовые условия, в то время как на востоке они были, в основном, близкими к норме, местами более тяжелыми. Так называемая «ледовая опозиция», заключающаяся в различии ледовых условий на западе и востоке российского сектора Арктики, сохранялась в 2025 году с прошлого сезона. В Канадском секторе Арктики, на фоне близких к средним темпам таяния в августе, произошло значительное сокращение площади льда в море

Бофорта, вызванное устойчивым трансполярным переносом относительно теплых воздушных масс с юго-запада – из Восточной Сибири и Монголии.

Пространственное распределение аномалий температуры приземного воздуха

В осредненном за сезон поле приземных температурных аномалий наблюдалась хорошо выраженная пространственная неоднородность, отражающая взаимодействие основных атмосферных макроциркуляционных процессов. Положительные аномалии температуры воздуха над Европой и югом ЕТР соответствовали зонам влияния антициклональных циркуляционных режимов, в то время как близкие к норме температуры на севере и в центре ЕТР являются прямым следствием устойчивой циклонической деятельности, связанной с отрицательной фазой Евразийской моды (EU) [28]. Значительные положительные аномалии температуры воздуха в сибирском регионе, особенно в районе Обской губы, были обусловлены меридиональной адвекцией тепла в условиях интенсивных антициклональных процессов [15]. На Дальнем Востоке преобладал близкий к норме термический режим, что согласуется с влиянием активной циклонической деятельности, характерной для отрицательной фазы WP [7].

Летом 2025 года над Евразией отмечалась выраженная внутрисезонная изменчивость термического режима (рис. 2а). Период развития крупных отрицательных аномалий температуры воздуха в июне-июле был вызван влиянием устойчивой ложбины над ЕТР (отрицательная фаза EU), что ограничивало радиационный прогрев в северных и центральных районах [1, 2]. В августе произошла существенная перестройка циркуляционной системы. С формированием интенсивного антициклона над полуостровом Таймыр (резко отрицательная фаза POL) и установлением положительной фазы PNA усилилась южная меридиональная составляющая переноса воздушных масс [29]. Это привело к адвекции тепла в арктические районы [23], интенсивному таянию морских льдов в море Бофорта и увеличению температуры воздуха над западом Северной Америки [8].

Такая макроциркуляционная перестройка в тропосфере обусловила пространственное перераспределение термических аномалий и изменение режима увлажнения в августе по сравнению с первой половиной лета. Наблюдаемые изменения наглядно демонстрируют макромасштабный характер взаимодействия атмосферных процессов, различающихся по генезису и пространственно-временным масштабам [12].

Распределение осадков в Европе и на ЕТР демонстрирует выраженную связь с преобладавшими барическими условиями (рис. 2б). На большей части Европы количество осадков оказалось близким к норме, однако выделяются зоны значительного дефицита осадков: на западе Пиренейского полуострова, западе Франции, на Британских островах и юго-востоке Европы, что соответствует районам устойчивых антициклональных систем

[30]. Над ЕТР пространственное распределение осадков носило контрастный характер: дефицит осадков наблюдался на крайнем юге, при избытке в центральных районах, что полностью согласуется с положением основной оси циклонической деятельности, связанной с отрицательной фазой EU [28].

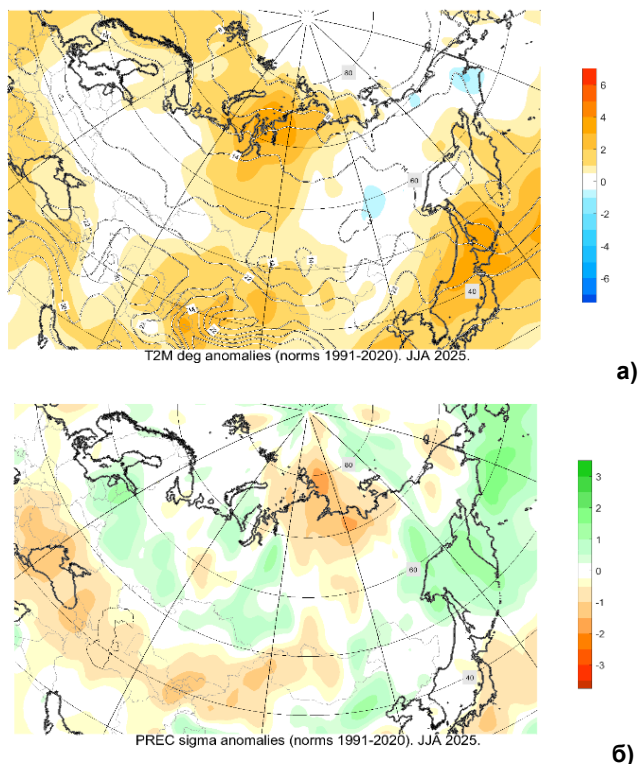


Рис. 2. Карта осредненных за летний сезон 2025 г. аномалий приземной температуры (а) и осадков (б) воздуха на территории Северной Евразии. Аномалии рассчитаны относительно периода 1991–2020 гг. по данным реанализа ERA5.

Fig. 2. Map of anomalies relative to the period 1991–2020 for surface air temperature (a) and precipitation (б) averaged over the summer season over Northern Eurasia 2025. According to ERA5 reanalysis.

В Сибири и Центральной Азии распределение осадков в зависимости от атмосферно-циркуляционных факторов также было разным. Избыток осадков на северо-западе Сибири соответствовал районам наиболее интенсивной циклонической деятельности, в то время как дефицит в Восточной Сибири и Якутии (за исключением северо-востока республики) связан с преобладанием антициклональных условий [6]. В странах Центральной Азии отмечен избыток осадков на севере Казахстана при значительном их дефиците на юге региона, что отражает особенности положения полярной

фронтальной зоны и влияния на эту территорию субтропической антициклональной системы [25].

Для более полного описания условий увлажнения умеренных и полярных климатических поясов Северного полушария в летний сезон 2025 года отметим, что пространственное распределение осадков над Северной Америкой соответствовало циркуляционной обстановке. Избыток осадков на западе Аляски был вызван активной циклонической деятельностью в районе Алеутской депрессии, в районе Великих озер и северо-востока Канады – усиленным фронтогенезом в условиях меридиональной циркуляции [27]. Повышенное увлажнение на Камчатке и в северной части Хабаровского края обусловлено орографическим усилением осадков на наветренных склонах при активном переносе влажных воздушных масс с Тихого океана.

Анализ экстремальных гидро- и агрометеорологических явлений на территории Российской Федерации

Пространственно-временное распределение опасных погодных явлений летнего сезона 2025 года является следствием возникновения особенностей атмосферной циркуляции. В рамках исследования были выявлены и проанализированы три вида экстремальных событий: волны тепла, эпизоды интенсивных осадков и условия сельскохозяйственной засухи.

Развитие волн тепла было связано с возникновением устойчивых антициклональных режимов циркуляции в различных регионах Российской Федерации (табл. 2). На юге Сибирского (в июне и завершении июля) и Дальневосточного федеральных округов (в июне) волны тепла формировались а) при устойчивой адвекции теплых воздушных масс с юга и б) формированием областей повышенного геопотенциала в средней тропосфере. В Северо-Западном, Центральном и Южном федеральных округах (с июля по август) экстремальный прогрев также был обусловлен формированием высотных антициклонов над Восточной Европой и выносом прогретых воздушных масс с Европы. Под воздействием интенсивной адвекции тепла оказалась значительная часть территории ЕТР.

Периоды экстремальных осадков, вызвавших подтопления городских территорий, затопление приусадебных участков, размыв дорожного полотна и нарушения в работе транспорта, были обусловлены активной циклонической деятельностью над различными регионами России. В данной работе были выявлены сроки и продолжительность экстремальных осадков в Уральском, Сибирском, Центральном, Приволжском, Южном и Дальневосточном федеральных округах. Интенсивные осадки наблюдались при перемещении глубоких циклонов и их серий, формировании малоподвижных фронтальных разделов, а также при орографическом влиянии на перенос влаги систем атмосферной циркуляции. Данные явления на ЕТР являются прямым следствием увеличения повторяемости и активности циклонов в зонах отрицательных аномалий геопотенциала на среднем уровне тропопаузы и отрицательной фазой индекса циркуляции атмосферы

ЕУ. На Дальнем Востоке интенсивные осадки были вызваны смещением к западу Алеутской депрессии и активным выносом на побережье влажных воздушных масс с акватории Тихого океана. Кроме того, на увеличение осадков также оказало влияние развитие летней фазы Тихоокеанского муссона, с которой связаны продолжительные дожди в прибрежных и континентальных районах региона.

Таблица 2. Аномальная жаркая погода в регионах России
Table 2. Heatwaves in Russian Regions

Территория	Даты	Явление	Ущерб и последствия
Сибирский федеральный округ			
Новосибирская обл., Алтайский край	1-7.06, 11-20.06	Аномально жаркая погода, до 30...38 °С	Нет данных
Иркутская область	21-25.06	Сильная жара, до 35...40 °С	Развитие атмосферно-почвенной засухи и суховеи в степной зоне
Алтайский край, Новосибирская обл., Республика Алтай	25-31.07	Аномально жаркая погода, до 29,5...39,1 °С	Нет данных
Дальневосточный федеральный округ			
Республика Бурятия	20-25.06	Сильная жара, до 35...40 °С	Почвенная засуха, суховеи, отключения электроэнергии
Забайкальский край	21-27.06	Сильная жара, до 35...38 °С	Почвенная засуха, суховеи, увеличение площадей лесных пожаров
Приморский край (восток)	23-27.06	Аномально жаркая погода (среднесуточная температура выше нормы на 7 °С)	Нет данных
Северо-Западный федеральный округ			
Республика Карелия, Ленинградская обл., г. Санкт-Петербург	25-31.07	Аномальная жара (среднесуточная температура выше нормы на 7-10 °С)	Нет данных
Архангельская область	26-31.07, 01-05.08	Аномальная жара (среднесуточная температура выше нормы на 7-10 °С)	Нет данных
Ненецкий АО	8-13.08	Аномальная жара (среднесуточная температура выше нормы на 7-11 °С)	Нет данных

Территория	Даты	Явление	Ущерб и последствия
Центральный федеральный округ			
Тульская область	9-12.07	Аномальная жара (среднесуточная температура выше нормы на 7-9 °С)	Нет данных
Смоленская, Калужская, Тульская, Рязанская, Владимирская, Ивановская, Ярославская, Воронежская обл.	9-13.07	Аномальная жара (среднесуточная температура выше нормы на 7-10 °С)	Нет данных
Белгородская область	8-12.07	Аномальная жара (среднесуточная температура выше нормы на 7-9,4 °С)	Нет данных
Южный федеральный округ			
ДНР	8-12.07	Аномальная жара (среднесуточная температура выше нормы на 7-9 °С)	Нет данных
ЛНР	9-13.07	Аномальная жара (среднесуточная температура выше нормы на 7,0-9,9 °С)	Нет данных

Пространственно-временное распределение волн тепла и экстремальных осадков полностью согласуется с выявленным в ходе исследования преобладанием меридиональных структур ведущего потока в полях геопотенциала и расположения аномалий в полях приземного давления, что говорит о влиянии крупномасштабных циркуляционных факторов как основных на региональные риски возникновения опасных гидрометеорологических явлений.

Особую значимость в сезоне имело развитие агрометеорологической засухи на юге ЕТР, где с весны сложились условия для последующего наступления как почвенной, так и атмосферной засухи. На основе анализа агрометеорологических бюллетеней Гидрометцентра России исследованы условия возникновения и эволюции засухи на юге ЕТР. Для фиксации наступления почвенной засухи использовались критерии о количестве запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы, для атмосферной – отсутствие эффективных осадков и определенные значения температуры воздуха [4]. Уже в первой декаде мая в Республике Крым отмечались повреждения сельскохозяйственных культур, а к июню ситуация усугубилась. В течение июня–августа в Южном федеральном округе, на Северном Кавказе и местами в Приволжском и Центральном федеральных округах

отмечались почвенная засуха и суховеи. Критический дефицит почвенной влаги в сочетании с аномально высокой температурой воздуха создал неблагоприятные условия для развития большинства сельскохозяйственных культур, приведя к характерным повреждениям растений, а в августе – к полному высыханию части посевов.

Условия агрометеорологической засухи, сложившиеся в летний сезон 2025 года, были обусловлены устойчивым положением высотного барического гребня и связанного с ним антициклонального режима погоды у Земли над южными регионами ЕТР. Анализ развития синоптической обстановки, вызвавшей засушливые условия на юге ЕТР, позволил выявить следующее. В июне юг ЕТР находился под влиянием передней части обширного высотного барического гребня, зафиксированного на картах АТ-500, распространявшегося с запада, при этом с севера, по западной периферии глубокой ложбины околополярного циклона, осуществлялся вынос сухого континентального и быстро прогревающегося воздуха.

На приземных картах эта высотная структура проявлялась как влияние восточной периферии Азорского антициклона, на котором при взаимодействии с полем высокого давления над Баренцевым морем сформировался антициклон, медленно смещавшейся на юг с северо-востока Европы. Этот процесс в тропосфере стал причиной дефицита осадков и аномально высокой температуры воздуха в приземном слое, создав условия, неблагоприятные для развития большинства сельскохозяйственных культур. В июле синоптическая обстановка отличалась сильно выраженной изменчивостью. Синоптические процессы были неустойчивы, наблюдались кратковременные распространения высотных барических гребней на юг ЕТР, сменявшиеся прохождением высотных ложбин и связанных с ними циклонов. выпадающие осадки временно снижали проявления засушливой ситуации, но их было недостаточно для компенсации сложившегося дефицита почвенной влаги, большая часть осадков испарялась, не достигая корневой системы растений. В целом агрометеорологические условия в июле оставались неблагоприятными, редкие дожди не могли коренным образом улучшить состояние поврежденных засухой сельскохозяйственных культур. В августе синоптическая обстановка продолжала сохранять условия, неблагоприятные для прекращения засухи. В средней тропосфере над югом ЕТР располагался высотный барический гребень, распространяющийся со Средиземного моря и приведший к взаимодействию отрога Азорского антициклона с антициклоном над Карским морем. Эта устойчивая барическая структура продолжала ограничивать прохождение циклонов, способствовала преобладанию малооблачной погоды с дефицитом осадков.

Таким образом, частое возникновение приземных антициклонов и связанное с ними блокирование западно-восточного переноса влажных воздушных масс стало ключевым фактором возникновения продолжительной засухи в южных областях ЕТР и ее негативного влияния на аграрный сектор экономики.

Заключение

Проведенный комплексный анализ выявил существенные особенности атмосферной циркуляции в Северном полушарии в летний сезон 2025 года. Сезон характеризовался устойчивой меридиональной структурой циркуляции и значительной внутрисезонной изменчивостью. Сезон характеризовался комплексом взаимосвязанных процессов в атмосфере: над ЕТР сформировалась устойчивая квазистационарная ложбина, в то время как в Европе отмечалась повышенная антициклональность. Кроме того, в августе над сибирско-арктическим регионом наблюдались блокирующие антициклоны, а на юге Дальнего Востока – устойчивые отрицательные аномалии приземного давления.

Пространственно-временная динамика опасных гидрометеорологических явлений напрямую зависит от выявленных аномалий атмосферной циркуляции. Волны тепла формировались в зонах устойчивого антициклогенеза, тогда как экстремальные осадки были отмечены в областях повышенной циклонической активности. Режим повышенного увлажнения в различных частях России был обусловлен выходом глубоких циклонов, формированием малоподвижных фронтальных разделов и орографическим усилением влагопереноса. Особого внимания заслуживают почвенная засуха и суховейные явления на юге ЕТР, развившиеся вследствие продолжительного влияния высотных гребней различного происхождения и связанного с ними антициклонального режима циркуляции в приземном слое. Экономические потери в сельском хозяйстве, энергетике и на транспорте, вызванные экстремальными погодными явлениями, указывают на острую необходимость в усовершенствовании систем сезонного прогнозирования и управления климатическими рисками.

Сезон продолжил устойчивую многолетнюю тенденцию к сокращению арктического ледового покрова, заняв 10 позицию в ряду минимальных значений площади льда за весь период спутниковых наблюдений. Наиболее существенное уменьшение площади льда наблюдалось в морях Баренцевом, Карском и Бофорта, что стало следствием воздействия устойчивых положительных аномалий ТПО и адвекции теплых воздушных масс в условиях меридиональной формы атмосферной циркуляции.

Выявленные аномалии атмосферной циркуляции Северного полушария были обусловлены внутренней изменчивостью в циркуляции атмосферы средних широт и региональными взаимодействиями в системе «океан – атмосфера – суша», а не воздействием со стороны тропической зоны Тихого океана. Летний сезон 2025 года продемонстрировал сложное взаимодействие факторов разного масштаба – от глобального тренда к потеплению до региональных циркуляционных аномалий, обусловивших контрастный характер погодных условий на территории Северной Евразии.

Полученные результаты имеют практическое значение для совершенствования методик сезонного прогнозирования, оценки климатических рисков для ключевых отраслей экономики и разработки адаптационных стратегий в условиях изменяющегося климата.

Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением устойчивости выявленных циркуляционных структур в многолетнем контексте и анализом их вклада в долгосрочные климатические тренды.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (Проект № 25-77-31009).

Список литературы

1. *Ипатов А.Ю., Иванов В.В.* Работа экспедиции «Северный полюс-42» в июне – августе 2025 года // Российские полярные исследования. 2025. № 3. С. 3-5.
2. *Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А.* Крупномасштабные моды атмосферной изменчивости. Часть I. Статистический анализ и гидродинамическое моделирование // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 6-22.
3. *Куликова И.А., Киктев Д.Б., Круглова Е.Н.* Крупномасштабные моды атмосферной изменчивости. Часть II. Прикладные аспекты и верификация моделей // Метеорология и гидрология. 2015. № 4. С. 21-35.
4. РД 52.88.699-2017. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении чрезвычайных ситуаций
5. *Alexander M.A., Blade I., Newman M., Lanzante J.R., Lau N.C., Scott J.D.* The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans // *Journal of Climate*. 2002. Vol. 15, no. 16. P. 2205-2231.
6. *Barlow M., Hoel, A., Lyon B.* Drought in the Middle East and Central Asia // *Drought and Water Crises*. 2016. P. 421-441. CRC Press.
7. *Barnston A.G., Livezey R.E.* Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // *Monthly Weather Review*. 1987. Vol. 115, no. 6. P. 1083-1126.
8. *Baxter S., Nigam S.* Key role of the North Pacific Oscillation–West Pacific pattern in generating the extreme 2013/14 North American winter // *Journal of Climate*. 2015. Vol. 28, no. 20. P. 8109-8117.
9. *Cassou C., Terray L., Phillips A.S.* Tropical Atlantic influence on European heat waves // *Journal of Climate*. 2005. Vol. 18, no. 15. P. 2805-2811.
10. Climate Prediction Center, NOAA. Retrieved from https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
11. *Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C., Barlow M., Whittleston D., Coumou D. et al.* Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather // *Nature Geoscience*. 2014. Vol. 7, no. 9. P. 627-637.
12. *Feldstein S.B., Lee S.* Intraseasonal and interdecadal jet shifts in the Northern Hemisphere: The role of warm pool tropical convection and sea ice // *Journal of Climate*. 2014. Vol. 27, no. 17. P. 6497-6518.
13. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146, no. 730. P. 1999-2049.
14. *Horton R.M., Mankin J.S., Lesk C., Coffel E., Raymond C.* A review of recent advances in research on extreme heat events // *Current Climate Change Reports*. 2016. Vol. 2, no. 4. P. 242-259. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0042-x>
15. *Hoskins B.J., Karoly D.J.* The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1981, vol. 38, no. 6, pp. 1179-1196. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1981\)038<1179:TSLROA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1981)038<1179:TSLROA>2.0.CO;2)
16. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021.
17. *Luo B., Luo D., Wu L., Zhong L., Simmonds I.* Winter Arctic warming and its linkage with mid-latitude atmospheric circulation and associated cold extremes: The key role of meridional potential vorticity gradient // *Advances in Atmospheric Sciences*. 2019. Vol. 36. P. 669-682. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00376-019-8191-1>
18. *Mantua N.J., Hare S.R.* The Pacific Decadal Oscillation // *Journal of Oceanography*. 2002. Vol. 58, no. 1. P. 35-44.
19. *McPhaden M.J., Zebiak S.E., Glantz M.H.* ENSO as an integrating concept in Earth science // *Science*. 2006. Vol. 314, no. 5806. P. 1740-1745.

20. National Centers for Environmental Information, NOAA. Retrieved from <https://www.ncei.noaa.gov/>
21. National Snow and Ice Data Center. Retrieved from <https://nsidc.org/home>
22. Overland J.E., Wang M. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2010. Vol. 62, no. 1. P. 1-9.
23. Overland J.E., Francis J.A., Hall R., Hanna E., Kim S.J., Vihma T. The melting Arctic and midlatitude weather patterns: Are they connected? // *Journal of Climate*. 2015. Vol. 28, no. 20. P. 7917-7932.
24. Rogers J.C. Patterns of low-frequency monthly sea level pressure variability (1899–1986) and associated wave cyclone frequencies // *Journal of Climate*. 1990. Vol. 3, no. 12. P. 1364-1379.
25. Schiemann R., Lüthi D., Schär C. Seasonality and interannual variability of the westerly jet in the Tibetan Plateau region // *Journal of Climate*. 2008. Vol. 21, no. 9. P. 2940-2957.
26. Thompson D.W., Wallace J.M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability // *Journal of Climate*. 2000. Vol. 13, no. 5. P. 1000-1016.
27. Trenberth K.E., Guillemot C.J. Physical processes involved in the 1988 drought and 1993 floods in North America // *Journal of Climate*. 1996. Vol. 9, no. 6. P. 1288-1298.
28. Wallace J.M., Gutzler D.S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter // *Monthly Weather Review*. 1981. Vol. 109, no. 4. P. 784-812.
29. Woollings T., Barriopedro D., Methven J., Son S.-W., Martius O., Harvey B., Sillmann J., Lupo A.R., Seneviratne S. Blocking and its response to climate change // *Current Climate Change Reports*. 2018. Vol. 4, no. 3. P. 287-300. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0108-z>
30. Zverev I.I., Gulev S.K. Seasonality in secular changes and interannual variability of European air temperature // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009. Vol. 114 (D2).

References

1. Ipatov A.Yu., Ivanov V.V. Rabota ekspeditsii “Severnyi polyus-42” v iyune – avguste 2025 goda. *Rossiiskie polyamye issledovaniya*, 2025, № 3, s. 3-5 [in Russ.].
2. Kiktev D.B., Kulikova E.N., Kulikova I.A. Large-scale modes of atmospheric variability. Part I. Statistical analysis and hydrodynamic modeling. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, vol. 40, no. 3, pp. 147-159.
3. Kruglova E.N., Kulikova I.A., Kiktev D.B. Large-scale modes of atmospheric variability. Part II. The impact on the spatial distribution of temperature and precipitation on the territory of Northern Eurasia. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, vol. 40, no. 3, pp. 223-230.
4. RD 52.88.699-2017. Polozhenie o porjadke dejstvij uchrezhdenij i organizacij pri ugroze vozniknovenija i vozniknovenii chrezvychajnyh situacij [in Russ.].
5. Alexander M.A., Blade I., Newman M., Lanzante J.R., Lau N.C., Scott J.D. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. *Journal of Climate*, 2002, vol. 15, no. 16, pp. 2205-2231. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2205:TABTIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2205:TABTIO>2.0.CO;2)
6. Barlow M., Hoel, A., Lyon B. Drought in the Middle East and Central Asia. *Drought and Water Crises*, 2016, pp. 421-441. CRC Press.
7. Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, 1987, vol. 115, no. 6, pp. 1083-1126. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2)
8. Baxter S., Nigam S. Key role of the North Pacific Oscillation–West Pacific pattern in generating the extreme 2013/14 North American winter. *Journal of Climate*, 2015, vol. 28, no. 20, pp. 8109-8117. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00726.1>
9. Cassou C., Terray L., Phillips A.S. Tropical Atlantic influence on European heat waves. *Journal of Climate*, 2005, vol. 18, no. 15, pp. 2805-2811. <https://doi.org/10.1175/JCLI3506.1>
10. Climate Prediction Center, NOAA. Retrieved from https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
11. Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C., Barlow M., Whittleston D., Coumou D. et al. . Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geoscience*, 2014, vol. 7, no. 9, pp. 627-637. DOI: 10/1038/ngeo2234

12. Feldstein S.B., Lee S. Intraseasonal and interdecadal jet shifts in the Northern Hemisphere: The role of warm pool tropical convection and sea ice. *Journal of Climate*, 2014, vol. 27, no. 17, pp. 6497-6518. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00057.1>
13. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, no. 730, pp. 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
14. Horton R.M., Mankin J.S., Lesk C., Coffel E., Raymond C. A review of recent advances in research on extreme heat events. *Current Climate Change Reports*, 2016, vol. 2, no. 4, pp. 242-259. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0042-x>
15. Hoskins B.J., Karoly D.J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1981. Vol. 38, no. 6. P. 1179-1196. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1981\)038<1179:TSLROA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1981)038<1179:TSLROA>2.0.CO;2)
16. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021.
17. Luo B., Luo D., Wu L., Zhong L., Simmonds I. Winter Arctic warming and its linkage with mid-latitude atmospheric circulation and associated cold extremes: The key role of meridional potential vorticity gradient. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, vol. 36, pp. 669-682. <https://doi.org/10.1007/s00376-019-8191-1>
18. Mantua N.J., Hare S.R. The Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Oceanography*, 2002, vol. 58, no. 1, pp. 35-44. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1015820616384>
19. McPhaden M.J., Zebiak S.E., Glantz M.H. ENSO as an integrating concept in Earth science. *Science*. 2006, vol. 314, no. 5806, pp. 1740-1745. DOI: 10.1126/science.1132588
20. National Centers for Environmental Information, NOAA. Retrieved from <https://www.ncei.noaa.gov/>
21. National Snow and Ice Data Center. Retrieved from <https://nsidc.org/home>
22. Overland J.E., Wang M. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2010, vol. 62, no. 1, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2009.00421>
23. Overland J.E., Francis J.A., Hall R., Hanna E., Kim S.J., Vihma T. The melting Arctic and midlatitude weather patterns: Are they connected? *Journal of Climate*, 2015, vol. 28, no. 20, pp. 7917-7932. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00822.1>
24. Rogers J.C. Patterns of low-frequency monthly sea level pressure variability (1899–1986) and associated wave cyclone frequencies. *Journal of Climate*, 1990, vol. 3, no. 12, pp. 1364-1379. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1990\)003<1364:polfms>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1990)003<1364:polfms>2.0.co;2)
25. Schiemann R., Lüthi D., Schär C. Seasonality and interannual variability of the westerly jet in the Tibetan Plateau region. *Journal of Climate*, 2008, vol. 21, no. 9, pp. 2940-2957. doi: 10.1175/2008JCLI2625.1
26. Thompson D.W., Wallace J.M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *Journal of Climate*, 2000, vol. 13, no. 5, pp. 1000-1016. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2)
27. Trenberth K.E., Guillemot C.J. Physical processes involved in the 1988 drought and 1993 floods in North America. *Journal of Climate*, 1996, vol. 9, no. 6, pp. 1288-1298.
28. Wallace J.M., Gutzler D.S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review*, 1981, vol. 109, no. 4, pp. 784-812. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2)
29. Woollings T., Barriopedro D., Methven J., Son S.-W., Martius O., Harvey B., Sillmann J., Lupo A.R., Seneviratne S. Blocking and its response to climate change. *Current Climate Change Reports*, 2018, vol. 4, no. 3, pp. 287-300. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0108-z>
30. Zveryaev I.I., Gulev S.K. Seasonality in secular changes and interannual variability of European air temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, vol. 114 (D2). DOI: 10.1029/2008jd010624

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. Никитин¹, А.П. Ревокатова^{1,2}, И.Р. Ломакин^{1,3},
И.А. Розинкина¹, Г.С. Ривин¹***

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

²Институт глобального климата и экологии имени Ю.А. Израэля, г. Москва, Россия;

*³Московский 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. Nikitin¹, A.P. Revokatova^{1,2}, I.R. Lomakin^{1,3},
I.A. Rozinkina¹, G.S. Rivin¹***

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

²Yu.A. Israel Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia;

*³Moscow 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 $29,5^{\circ}$ с. ш.).

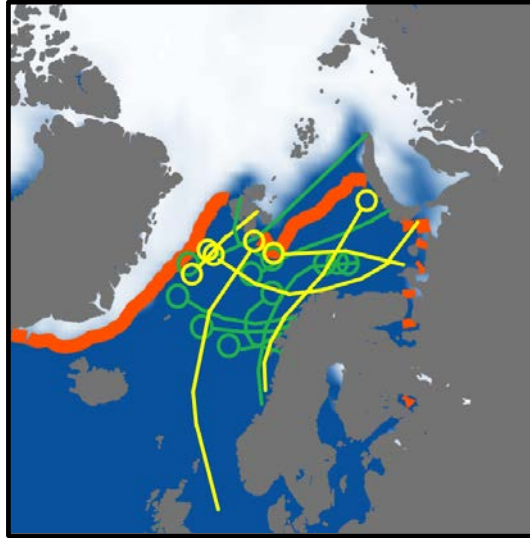


Рис. 1. Карта траекторий ПМЦ за холодный период 2022/2023 (зеленые круги) и 2023/2024 гг. (желтые круги) на основе карты морского льда из архива National Snow and Ice Data Centre (<https://nsidc.org/home>) на дату 31.12.2023, оранжевая линия показывает среднюю многолетнюю границу льда за период 1981–2010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

Fig. 1. Map of PLs trajectories for the cold period of 2022-2023 (gren 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.

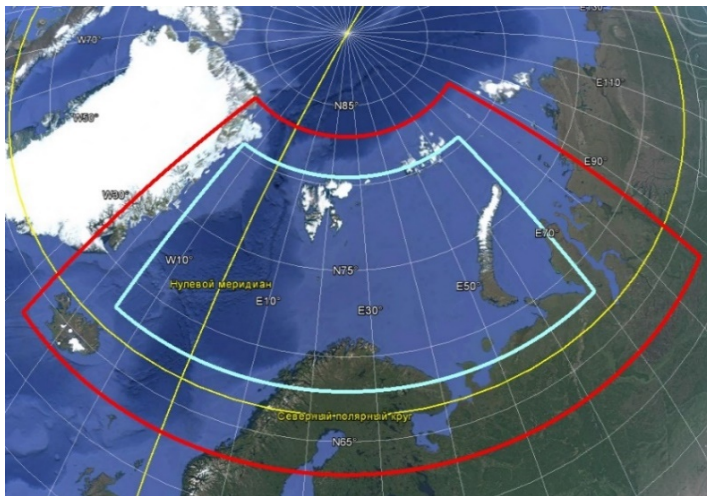


Рис. 2. Конфигурация модели ICON-LAM WestArctic (зеленая) и область изменения характеристик льда и ТПО (голубая).

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° и $80,5^{\circ}$ ш. и между 15° и 70° 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) 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.

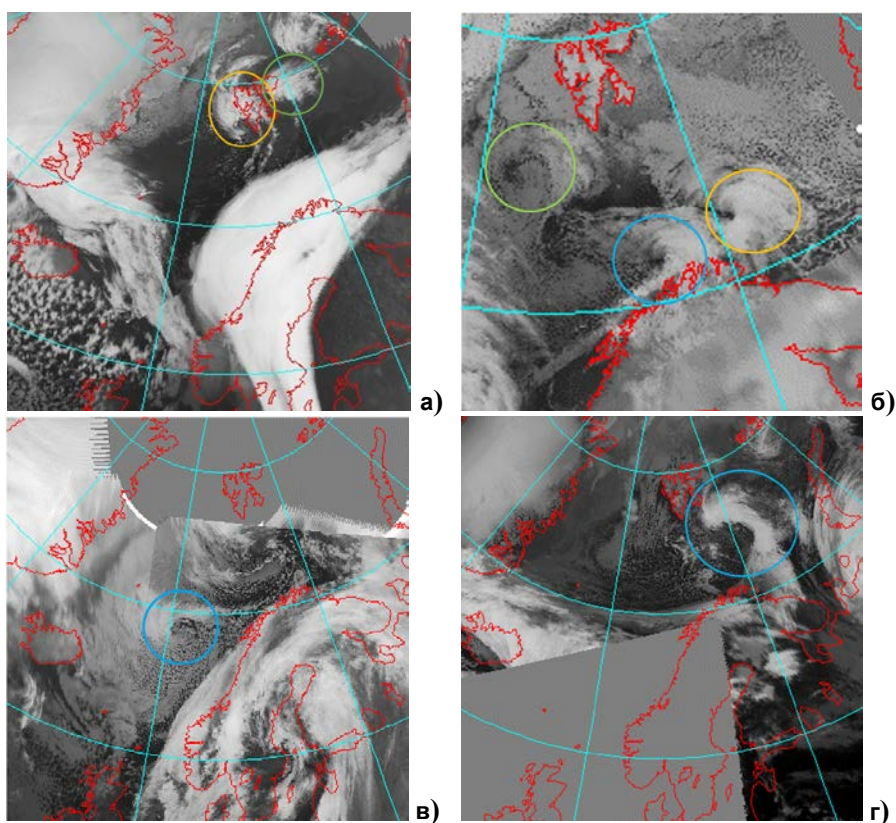


Рис. 3. Спутниковые снимки ПМЦ: 16–18 марта 2022 г., 19 ч ВСВ 17.03.2022 (а); 6–8 января 2024 г., 9 ч ВСВ 07.01.2024; 18–19 января 2022 г., 9 ч ВСВ 19.01.2022 (в); 18–19 сентября 2023 г., 14 ч ВСВ 18.09.2023 (г). Желтым цветом показан ПМЦ-1, голубым ПМЦ-2, салатovým ПМЦ-3.

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.

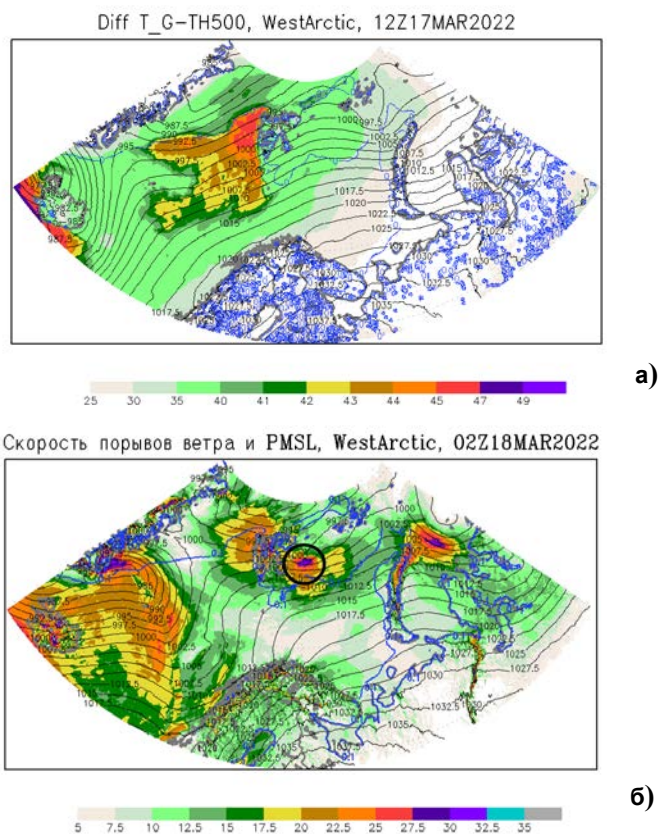


Рис. 4. Прогностические данные по модели ICON: разница между температурой поверхности и температурой на высоте 500 гПа в 12 ч ВСВ 17.03.2022 (а); скорость порывов ветра и давление, приведенное к уровню моря по данным модели на 02 ч ВСВ 18.03.2022 (б). Прогноз от 02 ч ВСВ 17.03.2022.

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).

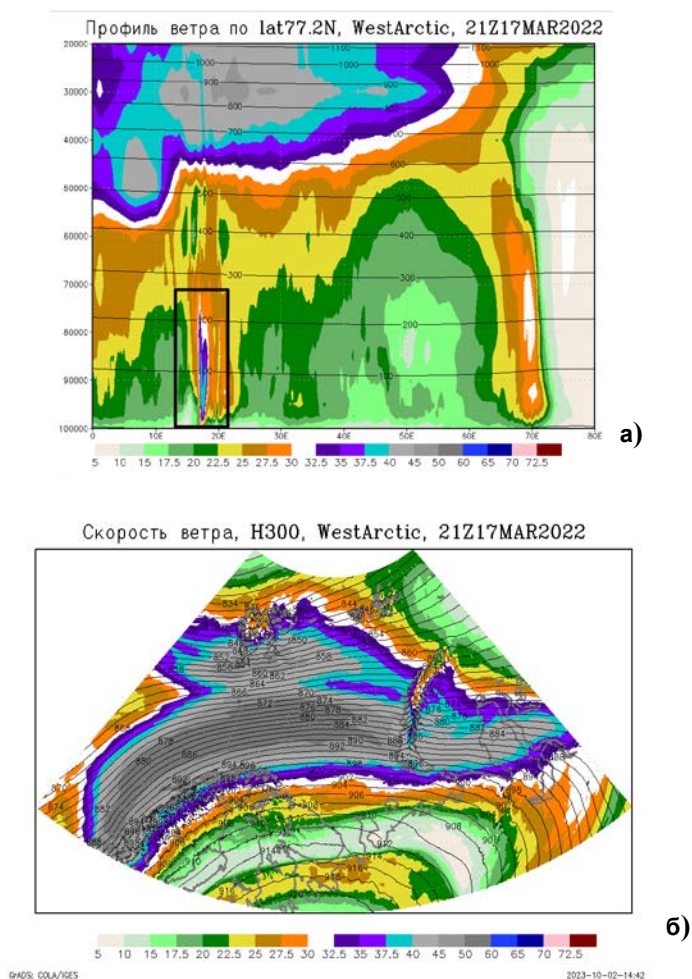


Рис. 5. Вертикальный профиль скорости ветра вдоль $77,2^\circ$ с. ш. (а); скорость ветра на высоте 300 гПа по данным модели ICON (б). Прогноз от 2 ч ВСВ 17.03.2022. Черный прямоугольник показывает положение ПМЦ в 21 ч ВСВ 17.03.2022.

Figure 5. Vertical wind speed profile along the 77.2°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).

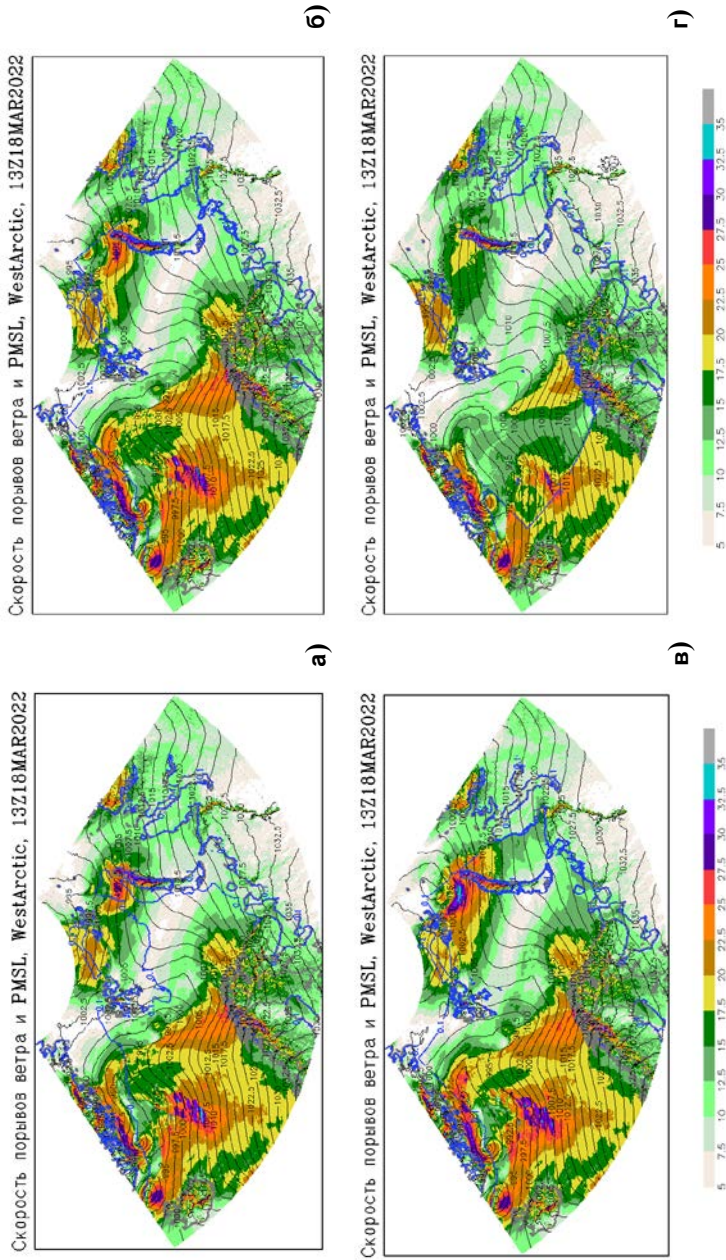


Рис. 6. Скорость порывов ветра и атмосферное давление, приведенное к уровню моря в 12 ч ВСВ 18.03.2022 в контрольном эксперименте (а); эксперименте IceCut (б); IceCutTemp5 (в); IceCutTemp5 (г). Тонкая синяя линия показывает границу морского льда в модели. Прогноз от 02 ч ВСВ 17.03.2022.

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°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° до -4° , 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° до -12° . Это предположение подтверждает и тот факт, что ПМЦ заметно интенсифицируется при повышении ТПО до 5°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).

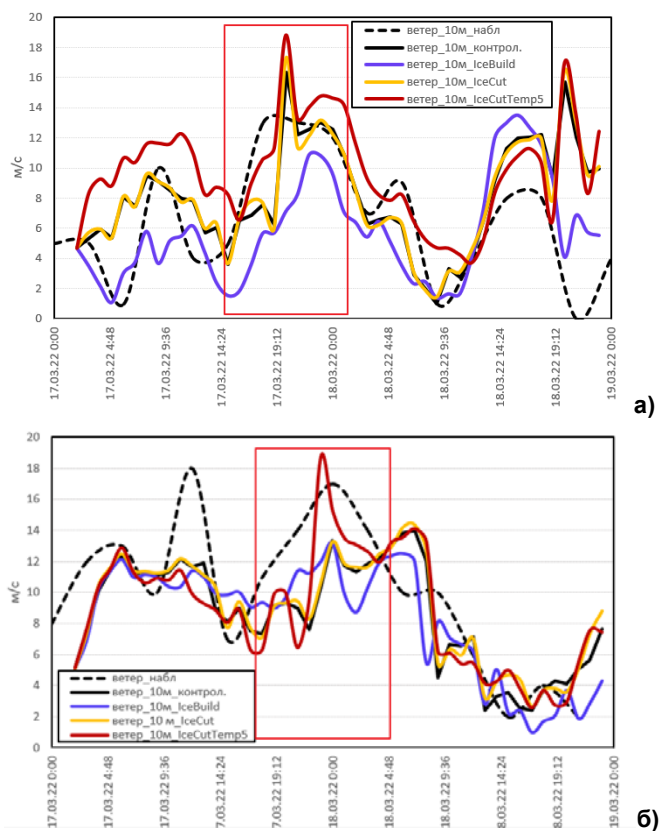


Рис. 7. Данные наблюдений и модельных экспериментов: скорость ветра на станции Хорнсунд (а); скорость ветра на станции Эдж (б). Прогноз от 2 ч ВСВ 17.03.2022. Красный прямоугольник обозначает примерный период влияния ПМЦ на метеоусловия станции.

Fig. 7. Observational and model experiments data: wind speed at Hornsund station (а); 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.

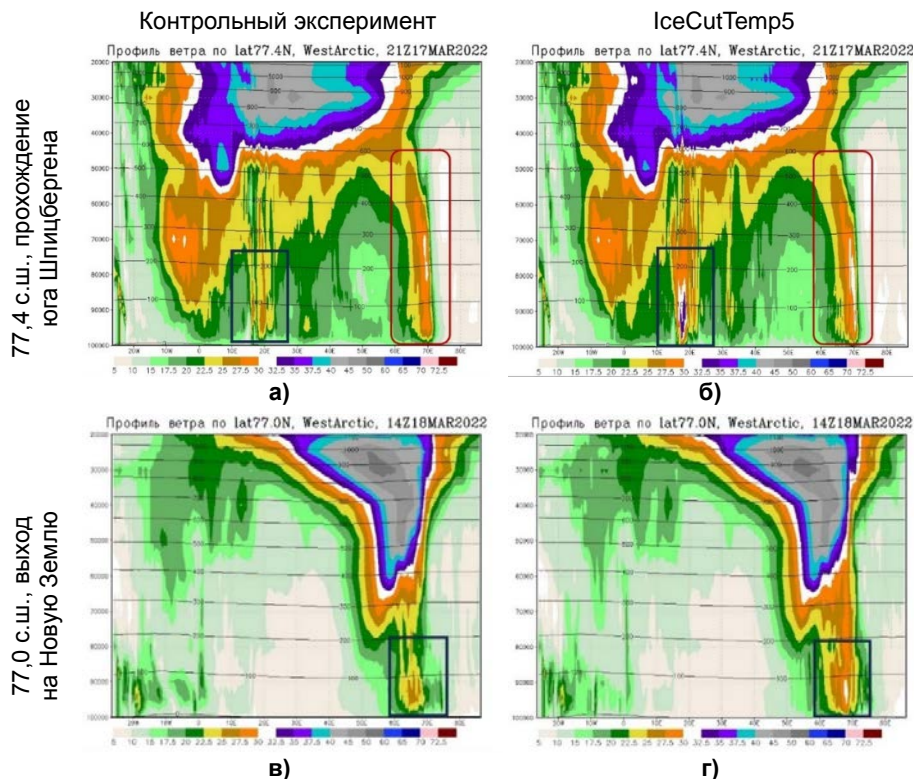


Рис. 8. Вертикальные профили скорости ветра для двух экспериментов: контрольный (слева), IceCutTemp5 (справа). Сверху профили в момент прохождения ПМЦ юга Шпицбергена, снизу – в момент его выхода на Новую Землю. Прогноз ICON от 2 ч ВСВ 17.03.2022. Чёрный прямоугольник показывает положение ПМЦ.

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).

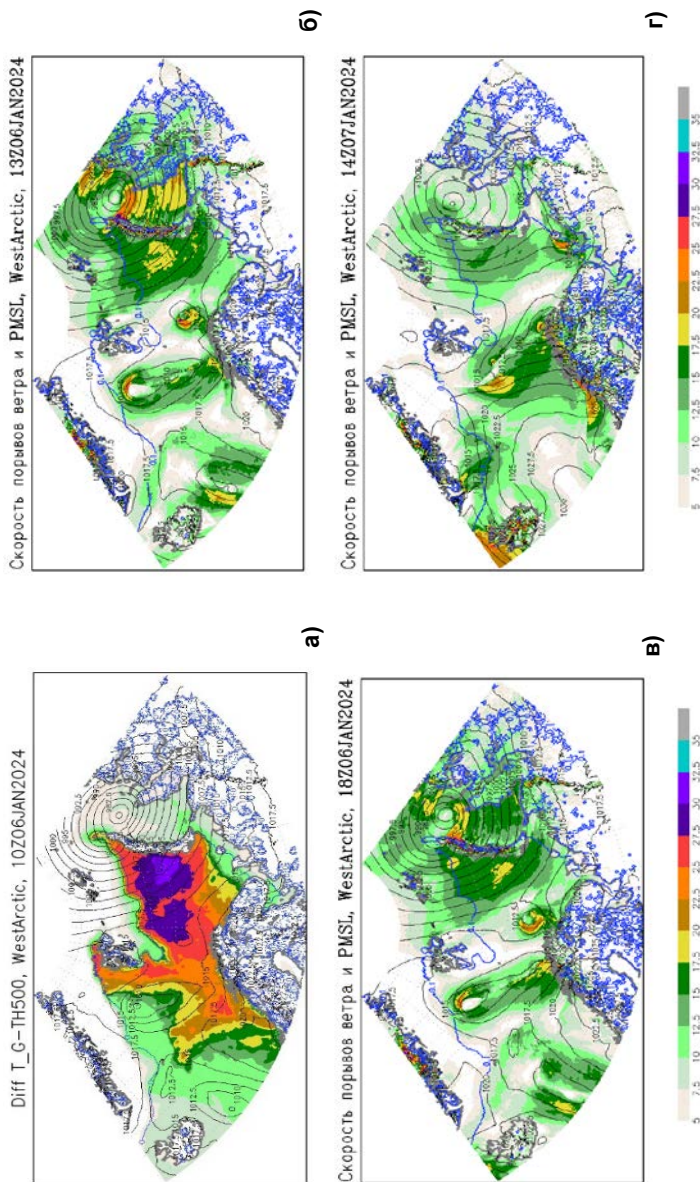


Рис. 9. Прогностические данные по модели ICON: разница между температурой поверхности и температурой на высоте 500 гПа в 10 ч ВСВ 06.01.2024 (а); скорость порывов ветра и давление, приведенное к уровню моря на 13 ч ВСВ 06.01.2024 (б); на 18 ч 06.01.2024 (в); на 14 ч 07.01.2024 (г). Прогноз от 12 ч ВСВ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

Fig. 9. ICON model forecast data: difference between SST and temperature at 500 hPa for 10 UTC January 6, 2024 (а); 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° с. ш. в момент прохождения ПМЦ-2 вдоль побережья Норвегии и севера Кольского полуострова.

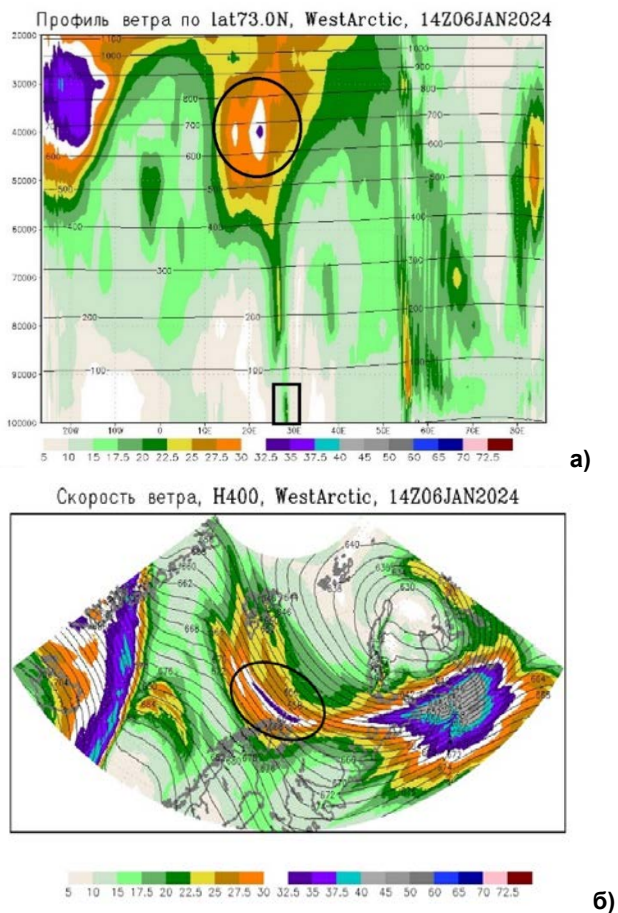


Рис. 10. Вертикальный профиль скорости ветра вдоль 73° с. ш. (а); скорость ветра на высоте 400 гПа по данным модели ICON, прогноз от 12 ч ВСВ 05.01.2024 (б). Черный прямоугольник обозначает примерное положение ПМЦ в 14 ч ВСВ 06.01.2024. Черные окружности обозначают положение струйного течения.

Figure 10. Vertical wind speed profile along the 73° N (a); 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.

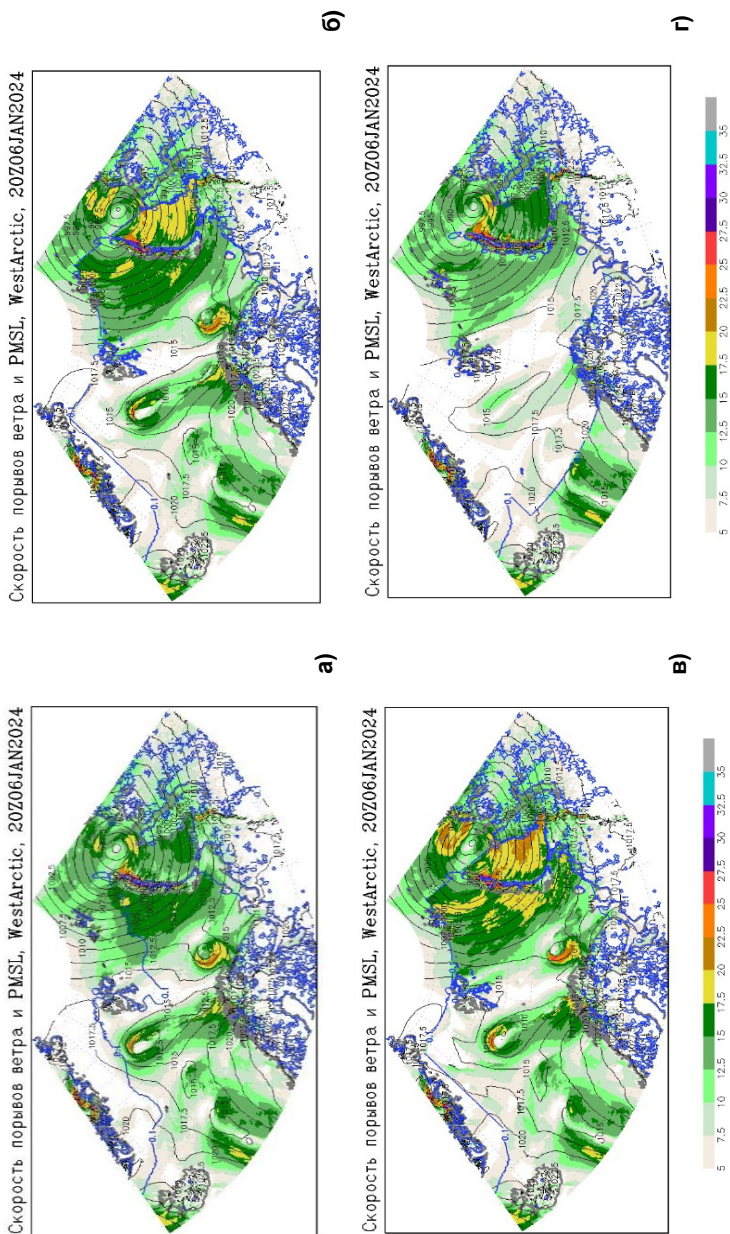


Рис. 11. Скорость порывов ветра в 20 ч ВСВ 06.01.2024 в контрольном эксперименте (а); эксперименте IceCut (б); IceCutTemp5 (в); IceBuild (г). Тонкая синяя линия показывает границу морского льда в модели. Прогноз от 12 ч ВСВ 05.01.2024.

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.

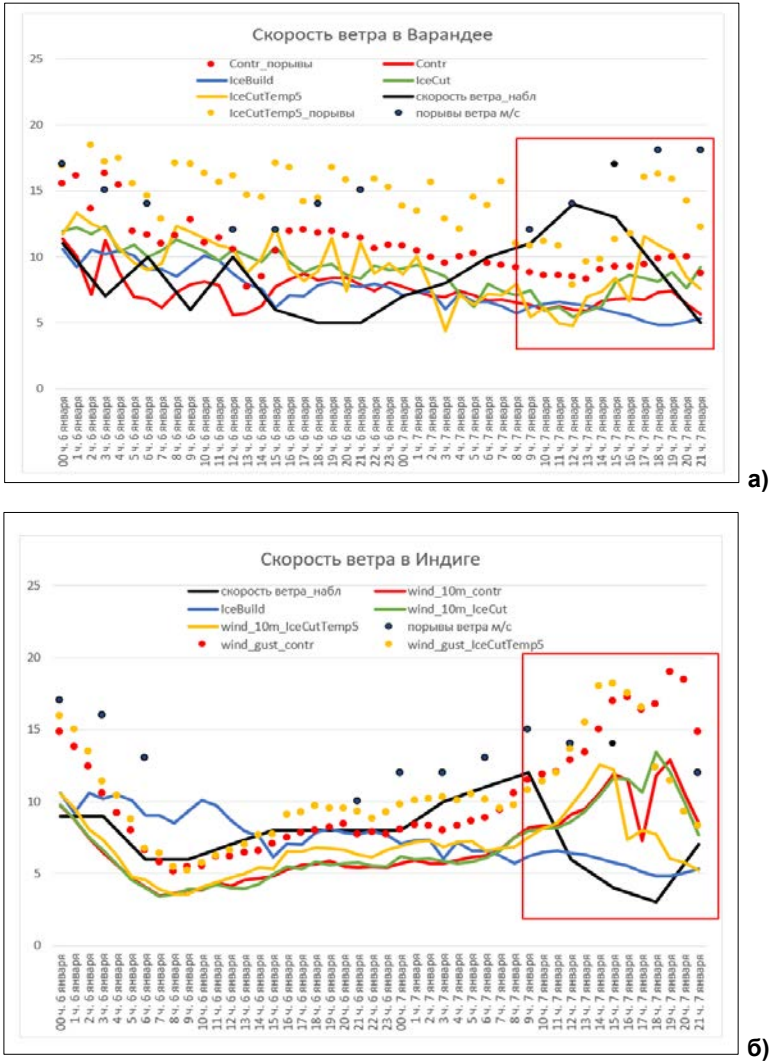


Рис. 12. Данные наблюдений и модельных экспериментов о скорости и порывах ветра на станции Варандей (а) и Индига (б). Прогностические данные получены при прогнозе по модели ICON от 12 ч ВСВ 05.01.2024. Красный прямоугольник обозначает примерное время влияния ПМЦ на станцию.

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).

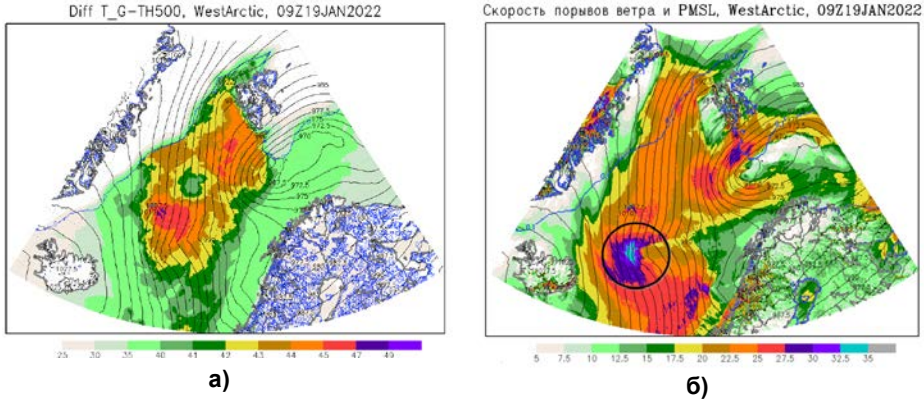


Рис. 13. Прогноз ICON на 9 ч ВСВ 19.01.2022: разность температуры поверхности и температуры на H500 (а); порывы ветра на высоте 10 м и давление, приведённое к уровню моря (б). Местоположение ПМЦ выделено окружностью.

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.

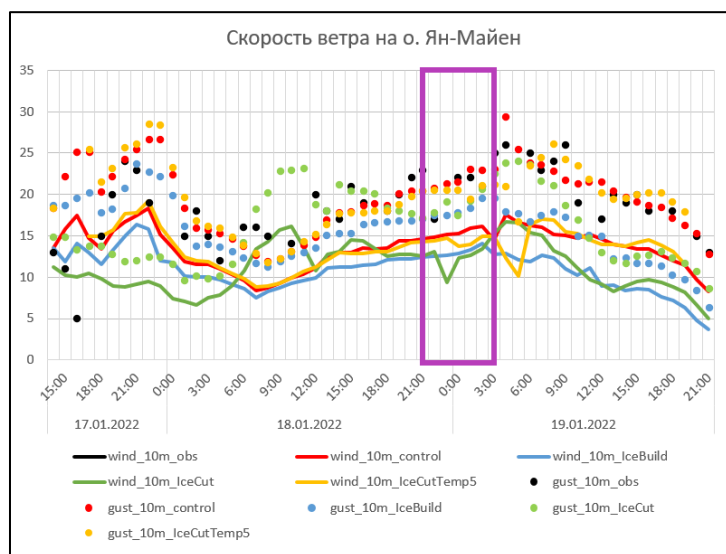


Рис. 14. Данные наблюдений и модельных экспериментов о скорости и порывах ветра на станции Ян-Майен. Прогностические данные получены при прогнозе по модели ICON от 14 ч ВСВ 17.01.2024. Сиреневый прямоугольник обозначает примерное время влияние ПМЦ на станцию.

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 четырёх 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.

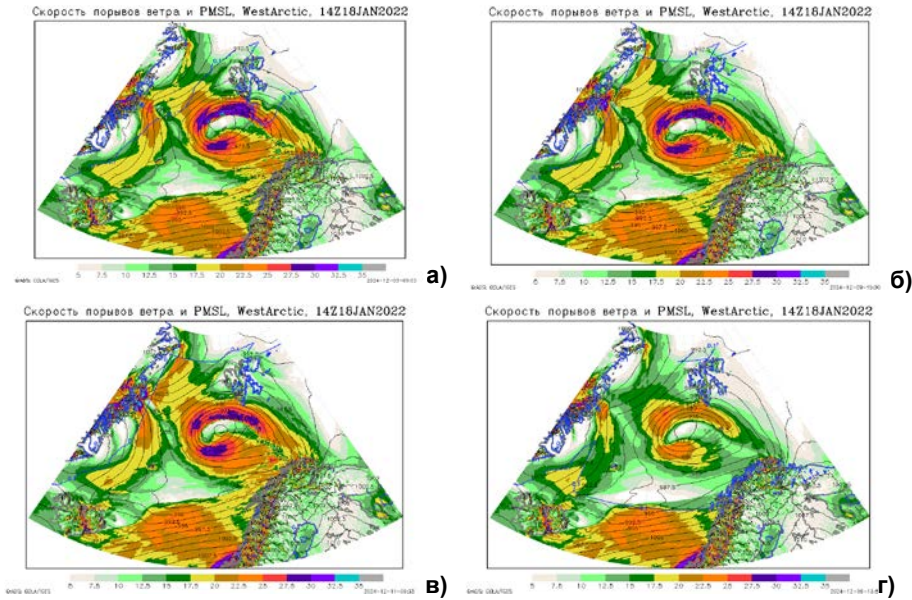


Рис. 15. Скорость порывов ветра в контрольном эксперименте (а); эксперименте IceCut (б); IceCutTemp5 (в); IceBuild (г). Тонкая синяя линия показывает границу морского льда в модели. Прогноз по модели ICON на 14 ч ВСВ 18 января от 14 ч ВСВ 17 января 2022 г.

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.

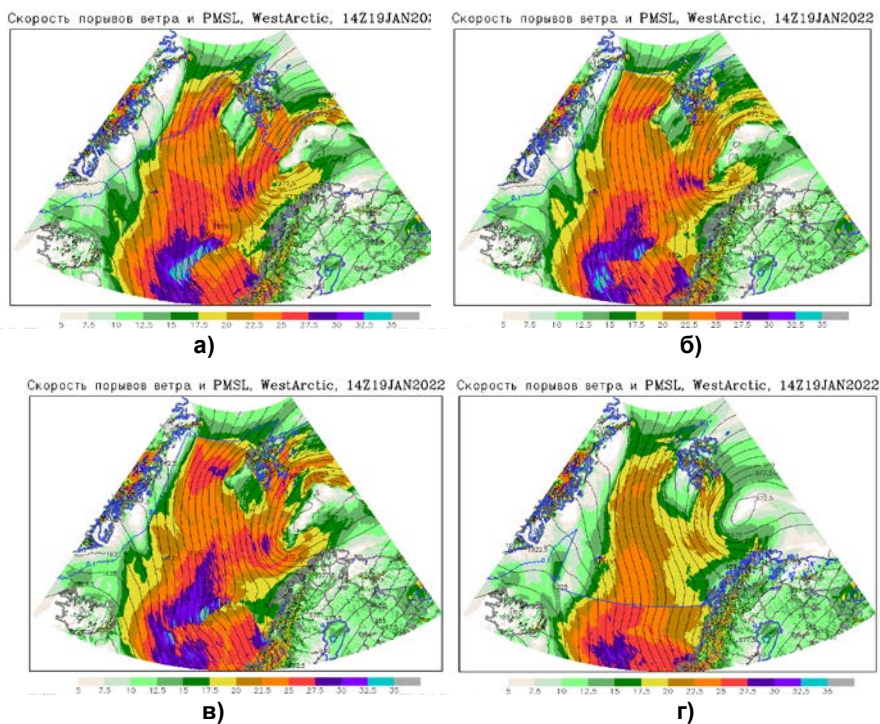


Рис. 16. Скорость порывов ветра в контрольном эксперименте (а); эксперименте IceCut (б); IceCutTemp5 (в); IceBuild (г). Тонкая синяя линия показывает границу морского льда в модели. Прогноз по модели ICON на 14 ч ВСВ 19 января от 14 ч ВСВ 17 января 2022 г.

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.

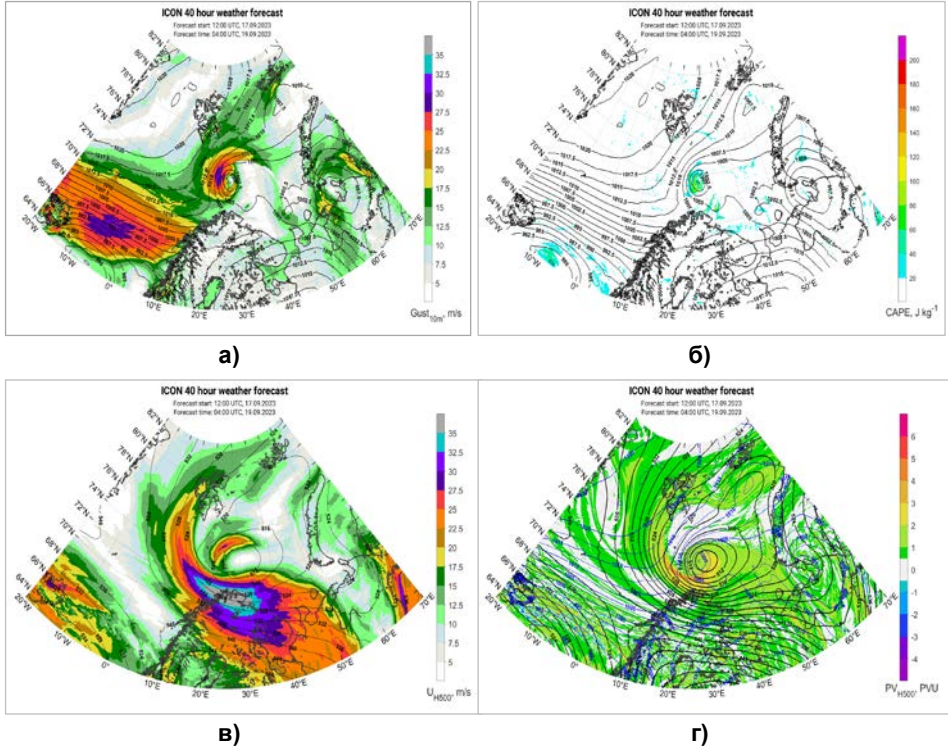


Рис. 17. Прогноз ICON на 4 ч ВСВ 19.09.2023 от 00 ч ВСВ 17.09.2023: порывы ветра на высоте 10 м и давление, приведённое к уровню моря (а); конвективная доступная потенциальная энергия (CAPE) (б); скорость ветра на 500 гПа (в); потенциальная завихренность на 500 гПа (чёрный цвет) и давление, приведённое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

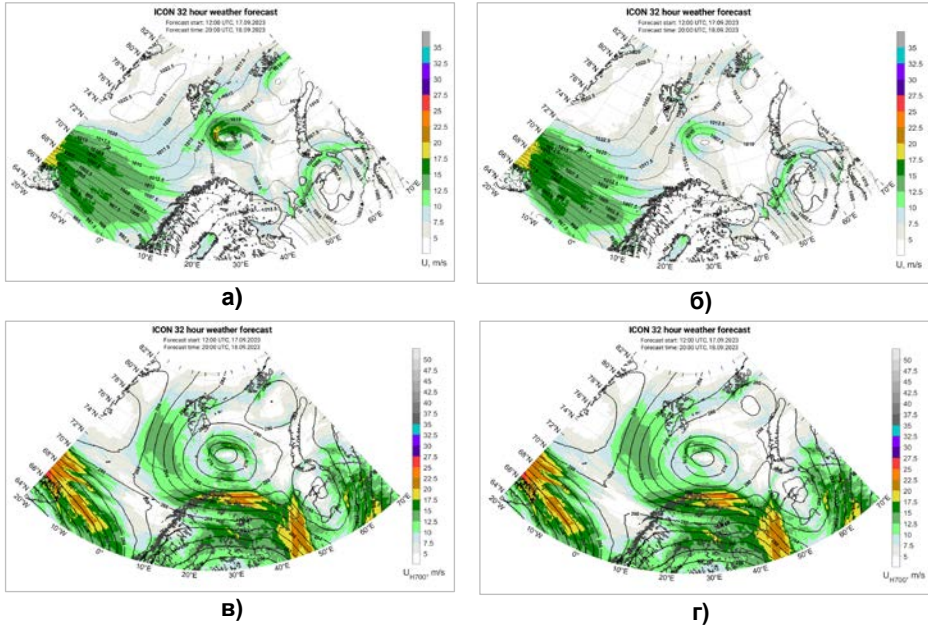


Рис. 18. Скорость ветра на высоте 10 м (верхний ряд) и скорость ветра на 700 гПа (нижний ряд): контрольный эксперимент (а, в), эксперимент IceBuild (б, г). Прогноз ICON на 20 ч ВСВ 18 сентября 2023 г. от 00 ч ВСВ 17 сентября 2023 г.

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- β -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
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

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- β -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.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-1-102-122>

УДК 551.515:551.461

Связь уровня и составляющих водного баланса Каспийского моря с индексами крупномасштабной атмосферной циркуляции (1950–2023 гг.)

Е.В. Островская, А.В. Павлова

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
eostrovskaya@mail.ru, anna.pavlova-16@yandex.ru*

На основе данных наблюдений за стоком Волги, уровнем Каспийского моря и температурой воздуха, а также данных реанализа ERA5 (атмосферные осадки и испарение), исследованы причины колебаний уровня моря в отдельные характерные периоды его подъема (1978–1995 гг.) и снижения (1950–1977 и 1996–2023 гг.). Установлено, что среднегодовые значения стока Волги и уровня моря статистически значительно различаются между всеми тремя выделенными периодами. Количество осадков достоверно увеличивалось только в фазу подъема уровня (1978–1995 гг.), тогда как рост температуры воздуха и испарения стал статистически значимым лишь в современный период снижения уровня (1996–2023 гг.). Межгодовые изменения уровня Каспийского моря демонстрируют устойчивую и усиливающуюся во времени корреляционную связь с колебаниями стока Волги: коэффициент корреляции возрастает от $r = 0,39$ в период 1950–1977 гг. до $r = 0,76$ в 1996–2023 гг. Однако современная тенденция к снижению уровня соответствует не столько изменениям стока, сколько положительным трендам температуры воздуха и испарения. Структура связей гидрологических показателей с циркуляцией атмосферы изменчива во времени. Если в середине XX века преобладало влияние глобальных циркуляционных механизмов (Североатлантического и Арктического колебаний — NAO и AO), то в современный период доминирующую роль стали играть региональные процессы, описываемые индексом EA/WR (паттерн Восточная Атлантика/Западная Россия). Этот сдвиг связан с увеличением частоты блокирующих антициклонических ситуаций и ослаблением западного переноса влаги в регион, что в конечном итоге отразилось на водном балансе Каспийского моря.

Ключевые слова: Каспийское море, изменения уровня, сток Волги, испарение, осадки, индексы циркуляции атмосферы

Relationship of the Caspian Sea level and water balance components with large-scale atmospheric circulation indices (1950–2023)

E.V. Ostrovskaya, A.V. Pavlova

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
eostrovskaya@mail.ru, anna.pavlova-16@yandex.ru*

Based on observation data of the Volga runoff, the Caspian Sea level, and air temperature, as well as ERA5 reanalysis data (precipitation and evaporation), causes for the Caspian Sea level fluctuations during specific characteristic periods of its rise (1978–1995) and decline (1950–1977 and 1996–2023) are studied. It was found that the long-term average values of the Volga runoff and sea level differ statistically significantly among all three identified periods. Precipitation increased significantly only during the sea level rise phase (1978–1995), whereas an increase in air temperature and evaporation became statistically significant only in the modern period of the sea level decline (1996–2023). Interannual changes in the Caspian Sea level demonstrate a stable and increasing correlation with variations in the Volga runoff over time: the correlation coefficient increases from $r = 0.39$ in 1950–1977 to $r = 0.76$ in 1996–2023. However, the modern tendency towards a sea level decline corresponds rather to the positive trends in air temperature and evaporation than to the changes in the Volga runoff. The structure of the relationships between hydrological conditions and atmospheric circulation is variable over time. While the influence of global circulation mechanisms (the North Atlantic (NAO) and Arctic oscillations (AO)) prevailed in the mid-20th century, regional processes described by the EA/WR index (the East Atlantic/West Russia pattern) have begun to play a dominant role in few past decades. This shift is associated with an increased frequency of blocking anticyclonic conditions and a weakening of westerly moisture transport into the region, which ultimately affected the water balance of the Caspian Sea.

Keywords: Caspian Sea, sea level variations, Volga runoff, evaporation, precipitation, atmospheric circulation indices

Введение

Уровень Каспийского моря часто менялся в течение его многовековой истории [19, 20, 38]. В связи с тем, что море отделено от Мирового океана, его уровень оказывается весьма чувствительным к изменению климатических условий в бассейне моря [10, 18]. За последние 2000–2500 лет диапазон изменения уровня не превышал 9–10 м [19]. За период инструментальных наблюдений за уровнем Каспийского моря размах его колебаний достиг 4 м: от -25,3 м в 80-х годах XIX-го столетия до -29,0 м в 1977 г. [8]. С начала проведения инструментальных наблюдений в 1837 г. и до начала XX века уровень Каспийского моря колебался в среднем около отметки -25,8 м. С конца XIX века в ходе уровня наблюдалась тенденция понижения, продлившаяся до 1977 г., когда уровень моря находился на самой низкой отметке не только за период инструментальных наблюдений, но и за последние 500 лет (-29,0 м), амплитуда колебаний уровня за этот период составила 7 м. В 2024 г. уровень преодолел отметку -29,0 м БС и продолжает снижаться. Г.И. Рычагов [19] считал, что в климатических условиях, свойственных современной субатлантической эпохе голоцена, колебание уровня Каспия в интервале от -30 до -25 м БС является его нормальным состоянием.

Как понижение, так и повышение уровня Каспийского моря существенно влияют на морскую экосистему и экономику прибрежных территорий. Но если экосистема в течение тысячелетий адаптировалась к нестабильности уровня, то хозяйственной деятельности его колебания наносят значительный ущерб. Так, в результате падения уровня в 30–70-х гг.

XX столетия осушилась территория площадью более 48 тыс. км² [19]. При подъеме уровня в 1978–1995 гг. (на 2,4 м по сравнению с уровнем 1977 г.) произошло затопление и подтопление населенных пунктов, промышленных объектов, разрушение гидротехнических и портовых сооружений [27, 35]. Быстрое снижение уровня, начавшееся в 2007 г. и к 2024 г. достигшее минимума 1977 г. (-29,0 м БС), уже существенным образом сказывается на прибрежной инфраструктуре, отмечается осушение более 22 тыс. км³ прибрежных территорий, особенно в северо-восточной части моря [16], ухудшается доступ к объектам, расположенным на мелководьях [38]. Уровень моря в настоящее время приближается к критическим отметкам, ниже которых будет затруднено функционирование портов [36, 40]. Снижение уровня приводит к снижению проточности водотоков дельты Волги [26] и аридизации прилегающей территории [12]. Выдвижение морского края дельты в море, осушение отложений речного бара способно изменить сеть водотоков дельты, что приведет к перераспределению водных ресурсов и, как следствие, ухудшению условий для сельского хозяйства и водообеспечения населения [13, 23]. К 2024 г. изменения в Каспийском регионе достигли такого критического уровня, что был разработан специальный доклад UNEP [44] о необходимости комплексных исследований для понимания причин современного состояния моря и адаптации к нему.

В этих условиях долгосрочный прогноз хода уровня моря является жизненно необходимым для нормального функционирования экономики и жизнеобеспечения живущих на его берегах людей. Однако проблема долгосрочного прогнозирования уровня все еще далека от разрешения, несмотря на разнообразие используемых подходов [9, 17, 24, 29, 30, 31, 42 и др.]. Поэтому поиск новых предикторов необходим, как и анализ актуальности ранее установленных связей между уровнем моря, основными составляющими его водного баланса и влияющими на них климатическими факторами.

Целью данной работы является оценка характеристик уровня и составляющих водного баланса Каспийского моря в характерные периоды подъема и снижения уровня с 1950 по 2023 г., а также их связей с показателями глобальной циркуляции атмосферы.

Материалы и методы

В работе использованы данные наблюдений Росгидромета за стоком Волги (Q) в вершине дельты (с. Верхнелебяжье), уровнем Каспийского моря (L) и температурой воздуха (T) (г/п Махачкала) за период 1950–2023 гг. Отток в Кара-Богаз-Гол в данной статье не рассматривается, этому важному вопросу планируется уделить особое внимание в последующем исследовании. Осадки (P) и испарение (E) были получены по данным реанализа ERA5 [32]. В работе [22] показано, что расчетные данные ERA5 хорошо согласуются с данными наблюдений за количеством осадков на гидрологических постах Каспийского региона в период 1975–2024 гг.

Недавние исследования, включая работу [37], при проведении сравнения данных реанализа ERA5 с наблюдениями на более чем 5600 станций по всему миру подтвердили их надежность для климатического и гидрологического мониторинга во внетропических регионах и хорошее воспроизведение пространственных закономерностей, несмотря на небольшое завышение величин осадков. Относительно испарения с поверхности Каспийского моря такого сравнительного анализа в литературе не было обнаружено, однако предыдущие модификации реанализа ERAi, например, показывали его заниженные величины [31].

За период 1950–2023 гг. были рассчитаны индексы циркуляции атмосферы: АО – Арктическая осцилляция (Arctic Oscillation), SCAND – Скандинавское колебание, NAO – Северо-Атлантическое колебание (North Atlantic Oscillation), EA/WR – Восточная Атлантика/Западная Россия (East Atlantic/West Russia). Индекс АО характеризует распределение давления между Арктикой и средними широтами и определяется как главная компонента аномалий геопотенциальной высоты на уровне 1000 гПа севернее 20° с. ш. Положительная фаза АО связана с пониженным давлением в Арктике и усилением западного переноса, тогда как отрицательная сопровождается блокирующими антициклонами и вторжениями холодного воздуха на юг. Индекс NAO отражает разность давления между Азорским максимумом и Исландским минимумом, определяя интенсивность западного переноса над Северной Атлантикой: при положительной фазе преобладают мягкие и влажные зимы в Европе, при отрицательной – холодные. Скандинавское колебание характеризует развитие блокирующих антициклонов над Скандинавией и определяется по аномалиям геопотенциальной высоты на уровне 500 гПа. Его положительная фаза сопровождается устойчивым антициклоном и похолоданием в Восточной Европе и России. Индекс EA/WR описывает волновую структуру циркуляции между восточной Атлантикой и западной частью России и также определяется по полям геопотенциальной высоты 500 гПа. Положительная фаза EA/WR соответствует гребню над Европой и впадине над Россией, отрицательная – противоположной конфигурации с циклонической активностью в Европе и блокировкой над западной Россией [2, 6, 14, 21, 39].

Для оценки связей колебаний уровня Каспийского моря (УКМ) и индексов циркуляции атмосферы использовался статистический, в том числе корреляционный анализ [7] в программной среде STATISTICA 10.0. В первом приближении принимается, что исследуемые процессы являются стационарными по среднему и дисперсии. Для расчетов использовались ряды межгодовых приращений уровня (dL). Предварительно из анализируемых рядов основных показателей и индексов вычитались линейные тренды. Это позволило сосредоточиться на межгодовой изменчивости, минимизируя влияние долгосрочных трендов. Для различия первичных рядов и рядов с удаленными трендами последние обозначались знаком «*» (например T*, P* и т. д.).

Для анализа также использовались ряды разностно-интегральных кривых (РИК), построенные для уровня, элементов водного баланса и индексов циркуляции атмосферы. Разностно-интегральная кривая характеризует нарастание суммы отклонений ежегодных значений переменной от среднего:

$$f(t) = \sum_{i=1}^t (x_i - x_{cp}), \quad (1)$$

где t – время (годы).

Разностно-интегральная кривая позволяет выявить многолетние изменения в данных: в период повышенных значений переменной наблюдается рост ординат, а период со значениями ряда ниже средней величины характеризуется спадом кривой. Далее в тексте РИК показателя обозначается соответствующей буквой с подстрочным РИК, например $Q_{РИК}$, $L_{РИК}$ и т. п.

Поскольку длина рядов показателей невелика, использовались методы непараметрической статистики, в частности, рассчитывались корреляции Спирмена. Значимость рассчитанных статистических параметров оценивалась по t -критерию Стьюдента при $p = 0,05$, значимость коэффициентов корреляции – методом Монте-Карло.

Результаты и дискуссия

1. Изменения уровня и составляющих водного баланса Каспийского моря в период 1950–2023 гг.

Для анализа изменений уровня и составляющих водного баланса Каспийского моря использовались их среднемноголетние величины в характерные периоды с 1950 по 2023 г. (табл. 1), выделенные в соответствии с фазами подъема и снижения уровня моря [9]. К 2024 г. уровень Каспийского моря практически достиг критических отметок конца 1970-х гг. (-29,0 м БС). Хотя современное падение уровня, начавшееся в 1996 г., часто сравнивают с наблюдавшимся ранее в 1950–1970-х гг., оно проходит в несколько иных климатических условиях. В табл. 1 показано, что, в отличие от прошлого столетия, для современного периода снижения уровня моря в среднем характерны сток Волги около многолетней нормы (238 км³), более высокие температуры воздуха и, соответственно, повышенные величины испарения с водного зеркала моря, а также большее количество осадков. Заметим, что разница средних температур между этими двумя периодами составила +0,92 °С, соответствуя тенденции к потеплению регионального климата, представленной в [2]. Оценка статистической значимости различий средних величин по t -критерию Стьюдента показала, что эти различия значимы для стока, как и для уровня моря, во все три выделенные периоды, приведенные в табл. 1. На существование однородных периодов в ряду притока к Каспию указывалось в [8]. В то же время количество осадков статистически значимо растет только в период подъема уровня в 1978–1995 гг. Различие в средних величинах температуры,

а также испарения, становится значимым только для последнего периода снижения уровня (1996–2023 гг.). В этот период при повышении средней температуры на 0,8 °С средняя величина испарения увеличилась на 82 мм по сравнению с предыдущим периодом. По данным М.Ю. Бардина с соавторами [3], вплоть до 1990-х гг. на территории Северного полушария отсутствовала заметная тенденция к потеплению, и только позднее такой тренд стал статистически значимым.

Таким образом, период повышения уровня моря в 1978–1995 гг. был связан с повышенным стоком Волги и количеством осадков, что отмечается многими исследователями [9, 29, 31, 33, 44], тогда как температура воздуха и испарение оставались в среднем на уровне предшествующего периода регрессии моря. 18-летний период подъема уровня в 1978–1995 гг. признан наиболее продолжительным за весь 180-летний период инструментальных наблюдений, интенсивность подъема уровня в среднем составила 13 см/год, в отдельные годы достигая более 30 см/год [9]. Высокая скорость подъема уровня также объясняется прекращением стока воды в залив Кара-Богаз-Гол, перекрытый дамбой в 1980 г. В 1984 г. сток в залив был частично восстановлен в регулируемом объеме 1,5–2,0 км³/год, а в 1992 г. дамбу ликвидировали [9].

Таблица 1. Изменение уровня моря и элементов водного баланса Каспийского моря в характерные периоды с 1950 по 2023 г.

Table 1. Variations of the Caspian Sea level and its water balance components in specific periods from 1950 to 2023

Период	L, м БС (Махачкала)	Q, км ³	P, мм	E, мм	T, °С
1950–1977	$-28,42 \pm 0,23$ -29,04...-28,00	$223,5 \pm 27,8$ 166...276	300 ± 45 225...409	931 ± 88 742...1054	$12,00 \pm 0,76$ 10,59...13,92
1978–1995	$-27,67 \pm 0,67$ -28,94...-26,49	$267,3 \pm 34,9$ 219...333	336 ± 40 271...402	955 ± 53 856...1058	$12,11 \pm 0,93$ 9,75...13,51
1996–2023	$-27,56 \pm 0,57$ -28,74...-26,77	$236,2 \pm 32,9$ 176...283	299 ± 42 203...386	1037 ± 40 958...1138	$12,92 \pm 0,67$ 11,43...14,20
1950–2023	$-27,85 \pm 0,67$ -29,01...-26,49	$238,6 \pm 35,5$ 166...333	308 ± 45 203...409	977 ± 80 742...1138	$12,37 \pm 0,87$ 9,75...14,20

Примечание. Числитель – среднее \pm среднеквадратическое отклонение, знаменатель – диапазон величин.

Снижение уровня моря в 1950–1977 гг. происходило не так быстро, средняя скорость снижения составляла 3,7 см/год, но в отдельные годы была выше 19 см/год. В предшествующий период 1929–1941 гг. уровень снижался более высокими темпами, средняя скорость достигала 16,3 см/год [9]. Средняя интенсивность снижения уровня Каспийского моря в 1970-е гг. составляла 8 см/год, чему, по мнению исследователей [9], способствовал низкий сток Волги, вызванный климатическими и антропогенными причинами, в то время как испарение было ниже нормы, а количество осадков превышало многолетнюю норму, будучи в это время наибольшим за весь предшествующий период XX века (рис. 1).

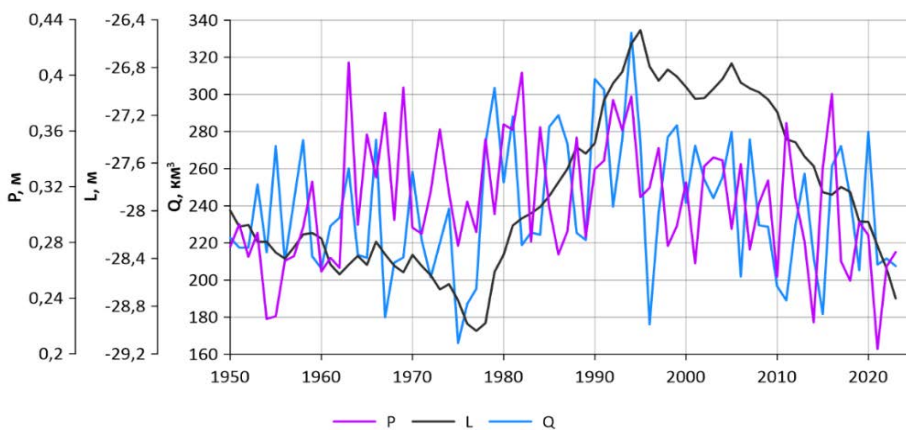


Рис. 1. Среднегодовой уровень Каспийского моря, годовой сток Волги и количество осадков за период 1950–2023 гг.

Fig. 1. Average annual values of the Caspian Sea level, annual the Volga River runoff and precipitation in 1950–2023.

В современных условиях снижение уровня Каспийского моря происходит со средней интенсивностью 8 см/год. Наиболее быстрое снижение уровня наблюдается с 2021 г., скорость снижения достигла 20–25 см/год (рис. 1). В 2021–2023 гг. сток Волги был значительно ниже нормы, составляя около 210 км³. Наблюдалась повышенная среднегодовая температура воздуха, причем 2023 год стал самым теплым за весь период наблюдений (рис. 2). По данным г/п Махачкала, среднегодовая температура достигла +14,2 °С, количество осадков и испарение были выше среднееголетних величин за период 1950–2023 гг. (рис. 1, 2).

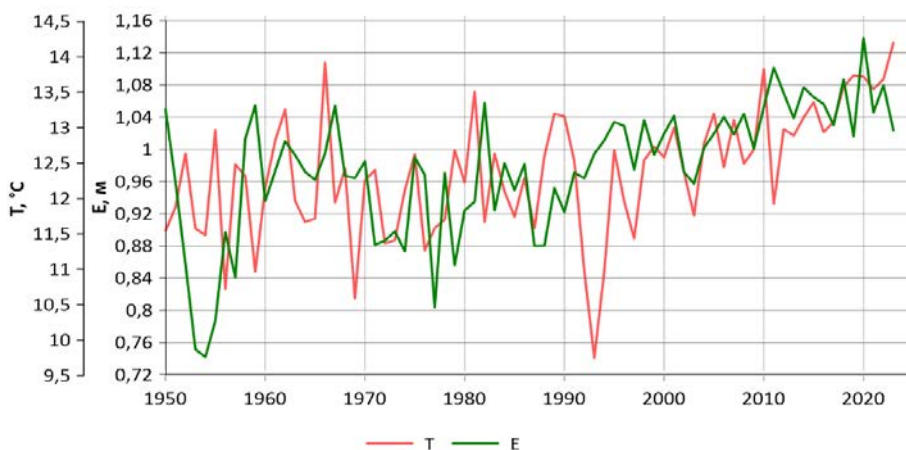


Рис. 2. Среднегодовые величины температуры воздуха и испарения в период 1950–2023 гг.

Fig. 2. Average annual values of the air temperature and evaporation in 1950–2023.

В структуре многолетнего ряда Волжского стока в 1950–1977 гг. преобладали маловодные годы (71 %), из которых 14 % – экстремально-маловодные ($Q < 200 \text{ км}^3$), включая 1975 г. с минимальным за весь период наблюдений стоком (166 км^3) (рис. 3). В 1996–2023 гг. многоводные и средневодные годы составляли 54 %, маловодных лет было значительно меньше, хотя экстремально-маловодные составляли все те же 14 %. Это подтверждает предположение о том, что в связи с потеплением климата влияние испарения на изменение уровня Каспийского моря растет, в то время как роль речного стока снижается [17]. Авторы связывают это с увеличением эпизодов блокирования западного переноса в условиях антициклонической активности, к которым приводит глобальное потепление.

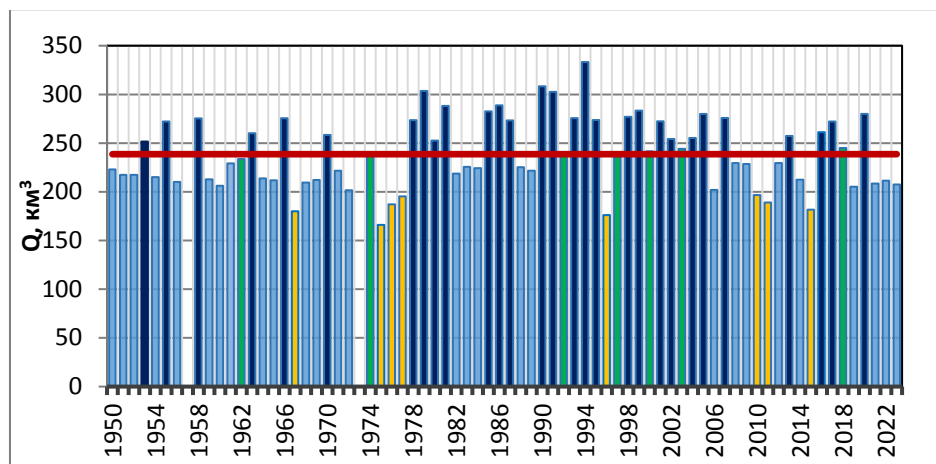


Рис. 3. Годовой сток Волги в период 1950–2023 гг. Голубым цветом отмечены маловодные годы, желтым – экстремально маловодные ($Q < 200 \text{ км}^3$), синим – многоводные, зеленым – средневодные, красная линия – среднее за период ($Q = 238 \text{ км}^3$).

Fig. 3. Annual Volga River runoff in 1950–2023. Light blue column – low water years, yellow column – extremely low water years ($Q < 200 \text{ км}^3$), dark blue column – high water years, green column – medium water years, red line – multiyear average ($Q = 238 \text{ км}^3$).

2. Связь колебаний уровня и составляющих водного баланса Каспийского моря с циркуляцией атмосферы

Влияние колебаний циркуляции атмосферы на уровень Каспийского моря изучалось многими исследователями [1, 20, 23, 31, 41]. В частности, были установлены зависимости уровня от колебаний циркуляции атмосферы, определяющих перенос воздушных масс над Каспийским регионом [10, 33]. В [19] исследуется влияние атмосферной циркуляции, характеризуемой индексом NAO, на водосборный бассейн Каспийского моря. NAO определяет западный перенос и движение циклонов через Северную Атлантику, формируя климат Европейской территории России (ЕТР) в холодное полугодие. Показано, что ослабление влияния NAO выражается

в уменьшении интенсивности поступления воздушных масс и влаги из Северной Атлантики в Евразию, что приводит к установлению засушливого климата в бассейне Волги, снижению количества осадков и речного стока и, соответственно, к снижению уровня моря. С NAO тесно связан АО, влияющий на атмосферные потоки в средних широтах Северного полушария с севера на юг в течение зимнего периода [30]. В [6] подчеркивается, что индексы NAO, АО и другие могут объяснить от 40 до более 80 % изменчивости температуры приповерхностного воздуха во внетропических широтах Северного полушария, наблюдаемой во второй половине XX в. В [30, 46] показано, что АО и NAO не имеют выраженной цикличности, а их долгопериодная изменчивость сходна со случайным процессом.

В [20] указывалось на важность зимних процессов в атмосфере для оценки тенденции хода уровня Каспийского моря и было показано, что снижение уровня приходится на период ослабления влияния NAO на водосборный бассейн моря, когда корреляция между зимними температурами и зимними значениями индекса была минимальна. Повышение уровня наблюдается при усилении влияния NAO, выражающееся в максимальной корреляции между зимними температурами и зимними значениями индекса. В то же время в [16, 17] указывается на наиболее проявленное влияние NAO в летние месяцы. Однако значимого тренда осадков в летние месяцы не отмечается, увеличивается только испарение, обусловленное повышением температуры воздуха.

Подробный анализ влияния низкочастотной изменчивости циркуляции атмосферы на многолетние изменения УКМ приведен в [16]. На основе данных за 1950–2000 гг. было показано, что наибольшее влияние на уровень оказывают колебания циркуляции атмосферы, расположенные в Атлантико-Европейском регионе: EA/WR, EA–Jet и EA, основные узлы которых расположены в восточной части Северной Атлантики, а часть – над Каспийским морем. Однако с момента публикации этой работы прошло четверть века, произошла смена фазы подъема уровня на его спад, и многими авторами, особенно зарубежными, прогнозируется тренд на дальнейшее его падение [13], в том числе катастрофическое [35, 36, 38, 41, 42, 44]. Поэтому важно оценить, остаются ли актуальными ранее установленные связи между УКМ, основными составляющими его водного баланса и влияющими на них климатическими факторами.

В табл. 2 представлены коэффициенты корреляции ряда приращений УКМ и составляющих его водного баланса с соответствующими индексами циркуляции атмосферы, рассчитанные для периода 1950–2023 гг. ($p = 0,05$, $n = 74$). В основном значимые коэффициенты корреляции были небольшие (по модулю от 0,32 до 0,54). Наибольшие коэффициенты характеризовали отрицательные связи температуры воздуха с индексами EA/WR и SCAND ($r = -0,54$ и $-0,44$ соответственно). С температурой воздуха были связаны количество осадков и испарение над морем ($r = -0,41$ и $0,38$ соответственно). Сток Волги имел отрицательную корреляционную связь с индексом SCAND ($r = -0,34$) и сильную положительную с уровнем моря

($r = 0,70$). Осадки имели положительную связь с EA/WR ($r = 0,33$). Между индексами АО и NAO отмечалась сильная корреляционная связь ($r = 0,72$), в то время как связь между индексами АО и SCAND была более слабой и отрицательной ($r = -0,32$). Таким образом, в период 1950–2023 гг. около 50 % ($R^2 = 0,49$) межгодовой изменчивости УКМ определялось изменениями волжского стока. Колебания температуры воздуха относительно долгосрочного тренда находились под совместным влиянием региональных центров циркуляции SCAND и EA/WR, характеризующих развитие блокирующих ситуаций в Европе. Колебания SCAND и EA/WR, кроме того, оказывали влияние на аномалии волжского стока и осадков соответственно, т. е. на приходную часть водного баланса.

Таблица 2. Корреляционная матрица за период 1950–2023 гг. ($n = 74$, $p = 0,05$)

Table 2. Correlation matrix for 1950–2023 ($n = 74$, $p = 0.05$)

	dL*	Q*	T*	P*	E*	AO*	SCAND*	NAO*	EA/WR*
dL*	1,00	0,70	-0,10	0,27	-0,28	-0,15	-0,10	0,06	0,09
Q*		1,00	0,15	0,09	-0,09	-0,02	-0,34	0,10	0,01
T*			1,00	-0,41	0,38	0,03	-0,44	-0,14	-0,54
P*				1,00	-0,01	0,11	0,00	0,21	0,33
E*					1,00	0,26	-0,18	0,09	-0,24
AO*						1,00	-0,32	0,72	0,11
SCAND*							1,00	-0,07	0,24
NAO*								1,00	0,18
EA/WR*									1,00

Примечание. Здесь и далее жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, значимые при $p = 0,05$, подчеркиванием выделены коэффициенты $\geq 0,7$.

В [5] утверждается, что наблюдающийся в последние десятилетия засушливый климат на юге ЕТР обусловлен нисходящим трендом индекса EA/WR и соответствующим повышением температуры поверхности океана в Северной Атлантике. В [27] показано, что повторяемость сильных засух в Поволжье и на северо-западе Казахстана с начала прошлого столетия была наибольшей (до 19 засух/100 лет) в годы экстремально теплой поверхности Северной Атлантики, а наименьшей (4 засухи/100 лет) – в годы экстремально холодной. Сильные летние засухи на юге Восточно-Европейской равнины отмечались в период потепления Северной Атлантики, ослабления региональной зональной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе и увеличения повторяемости числа дней с атмосферным блокированием на востоке Восточно-Европейской равнины. В [27] отмечается, что эти условия наблюдались в основном при повышенной повторяемости отрицательных фаз NAO и EA/WR, при этом повторяемость блокирований была в три раза выше в годы отрицательной фазы колебания EA/WR

по сравнению с его положительной фазой. В летние месяцы, по данным [5], наблюдается увеличение количества длительных волн тепла над югом ЕТР, при этом величины индекса EA/WR становятся отрицательными, что отражает положительные аномалии температуры поверхности океана в Северной Атлантике и приводит к возрастающей блокирующей антициклонической активности в этом регионе. С 1901 по 2020 год М.Ю. Бардин с соавторами [5] насчитали 11 крупных (экстремальных) волн тепла длительностью более 21 суток с максимальным распространением в нескольких широтных зонах ЕТР, из которых шесть наблюдались после 2000 года. Предполагается, что в существовании экстремальных длительных волн тепла особую роль играют специфические структуры блокирования по типу обрушения волны Россби, образующиеся в атмосфере и поддерживающие области антициклонической квазистационарной циркуляции над ЕТР [5].

На рис. 4 приведен годовой ход УКМ и РИК других показателей в 1950–2023 гг. На рис. 4а показано, что примерно до середины 2000-х гг. тенденции хода уровня моря и РИК стока Волги были сходными, однако в последующие годы между ними наблюдается существенное отличие, так как интенсивность падения уровня существенно увеличилась. Некоторые исследователи отсчитывают современный период падения УКМ именно с 2005 г., объясняя это продолжавшейся после 1996 г. повышенной водностью Волги [44]. Аналогичным образом после 2005 г. усилилась и тенденция к росту температуры и испарения (рис. 4в). Обращает на себя внимание резкий рост $AO_{РИК}$ после 2010 г. До 2010 г. $AO_{РИК}$ имел сходную с РИК волжского стока тенденцию, исчезнувшую после 2010 г. Из рис. 4б следует, что РИК индексов AO и NAO показывают хорошую сходимость с трендами УКМ и РИК составляющих приходной части водного баланса Каспийского моря (сток, осадки). С середины 2010-х гг. наблюдается тенденция к росту $AO_{РИК}$ и $NAO_{РИК}$ и, наоборот, снижению приходной части водного баланса и УКМ. С середины 2000 г. стали совпадать тренды УКМ и РИК индексов региональной циркуляции SCAND и EA/WR (рис. 4в). Заметнее становятся связи между испарением и температурой, которая с середины 2010-х гг. показывает устойчивый непрерывный тренд к повышению с высокой интенсивностью.

Корреляционные матрицы были также рассчитаны для трех периодов подъема и спада уровня (табл. 3–5). В период снижения уровня в 1950–1977 гг. коэффициент корреляции между уровнем моря и стоком Волги был минимальным: $r = 0,38$ (табл. 3). На межгодовые колебания УКМ влияли аномалии Арктического колебания ($r = -0,46$). Между аномалиями стока и температуры воздуха отмечалась положительная значимая связь ($r = 0,45$), с температурой также коррелировал индекс NAO ($r = -0,50$). Изменения количества осадков находились под влиянием EA/WR ($r = 0,40$). Испарение и осадки также коррелировали между собой ($r = 0,38$), кроме того, отмечалась сильная положительная корреляция между индексами AO и NAO ($r = 0,73$).

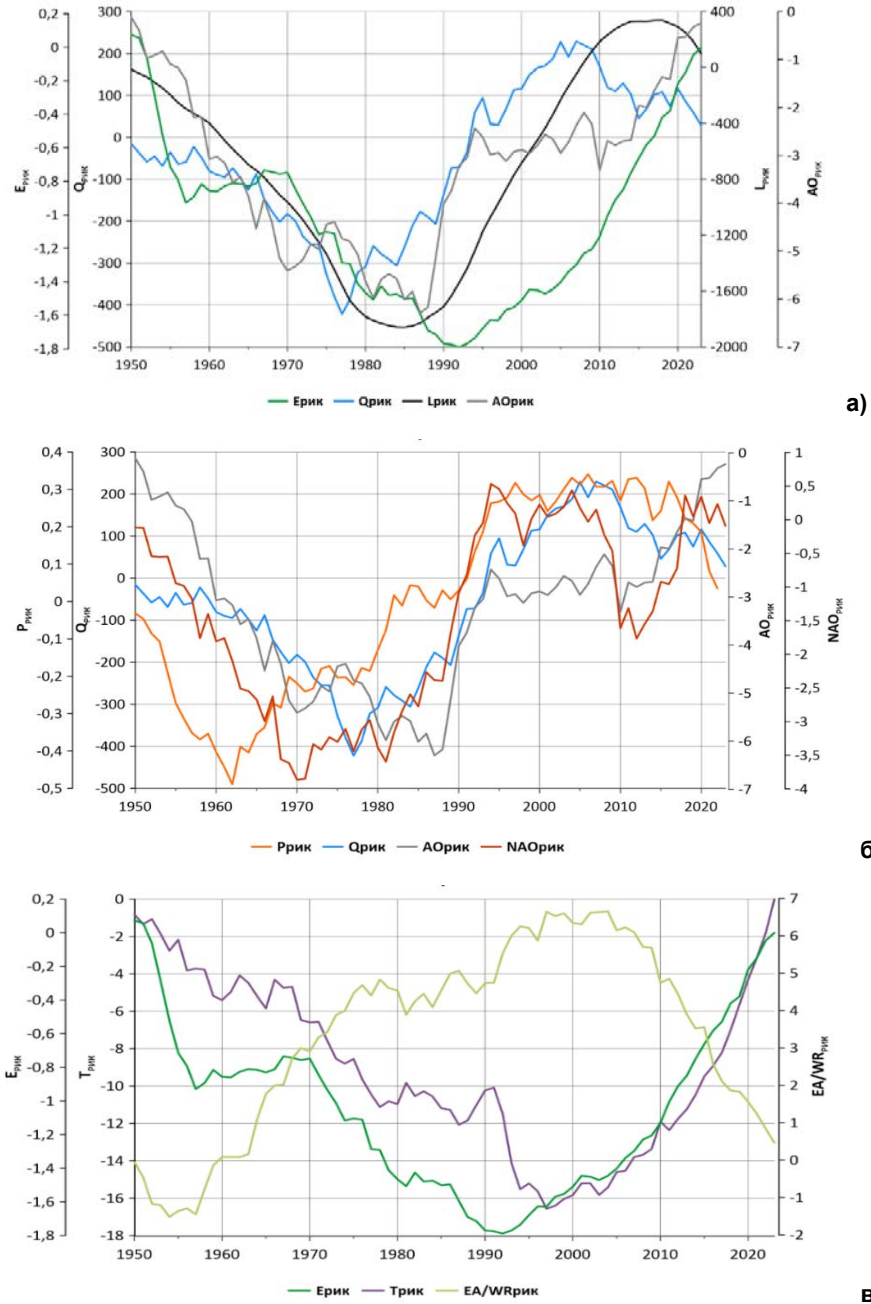


Рис. 4. РИК годовых величин в 1950–2023 гг.: испарения, стока Волги, уровня моря, АО (а); суммы осадков, стока Волги, АО, NAO (б); испарения, температуры воздуха, EA/WR (в).

Fig. 4. Difference integral curves of the annual values in 1950–2023: evaporation, the Volga River runoff, the Caspian Sea level, AO (a); precipitation, the Volga River runoff, AO, NAO (б); evaporation, air temperature, EA/WR (в).

Таблица 3. Корреляционная матрица за период 1950–1977 гг. ($n = 28$, $p = 0,05$)
Table 3. Correlation matrix for 1950–1977 ($n = 28$, $p = 0.05$)

	dL*	Q*	T*	P*	E*	AO*	SCAND*	NAO*	EA/WR*
dL*	1,00	0,39	0,15	0,10	0,02	-0,46	0,21	-0,36	0,04
Q*		1,00	0,45	-0,11	0,00	-0,31	-0,22	-0,35	-0,18
T*			1,00	-0,35	0,09	-0,28	-0,33	-0,50	-0,07
P*				1,00	0,38	-0,01	0,11	0,21	0,40
E*					1,00	-0,03	0,06	-0,02	0,34
AO*						1,00	-0,19	0,73	0,02
SCAND*							1,00	0,25	0,17
NAO*								1,00	-0,03
EA/WR*									1,00

При повышении уровня Каспийского моря в 1978–1995 гг. его межгодовые изменения находились под влиянием волжского стока, связь с которым в этот период усилилась ($r = 0,59$) (табл. 4). Температура воздуха в эти годы коррелировала с индексами EA/WR и SCAND ($r = -0,63$ и $-0,58$ соответственно). Корреляционная связь между индексами AO и NAO существенно усилилась ($r = 0,92$).

Таблица 4. Корреляционная матрица за период 1978–1995 гг. ($n = 18$, $p = 0,05$)
Table 4. Correlation matrix for 1978–1995 ($n = 18$, $p = 0.05$)

	dL*	Q*	T*	P*	E*	AO*	SCAND*	NAO*	EA/WR*
dL*	1,00	0,59	0,03	0,19	-0,22	-0,21	-0,02	-0,37	-0,18
Q*		1,00	-0,08	0,14	0,08	-0,04	0,06	0,02	-0,18
T*			1,00	-0,46	-0,40	-0,03	-0,58	-0,06	-0,63
P*				1,00	0,42	0,13	0,34	-0,02	0,02
E*					1,00	0,34	0,29	0,28	0,32
AO*						1,00	-0,04	0,92	0,32
SCAND*							1,00	0,05	0,30
NAO*								1,00	0,38
EA/WR*									1,00

В современный период связь между годовыми приращениями уровня моря и волжским стоком укрепилась ($r = 0,76$, табл. 5), хотя общая тенденция к снижению уровня больше соответствует ходу температуры воздуха и испарения (рис. 4), которые коррелировали между собой с коэффициентом $r = 0,42$. С температурой воздуха коррелировали количество осадков и индекс EA/WR ($r = -0,69$ и $-0,51$ соответственно), между которыми также была значимая положительная связь ($r = 0,49$). Кроме того, значимая

отрицательная связь была обнаружена между индексом EA/WR и испарением ($r = -0,42$), что подтверждает вывод, сделанный в [10, 24, 43, 45] о влиянии на интенсивность испарения с поверхности моря не только повышения температуры воздуха в регионе, но и регионального переноса воздушных масс, характеризуемого ветровой активностью. В [4] отмечается, что изменения зонального ветра в широтной зоне 45–65° с. ш. тесно связаны с NAO, тогда как южнее (35–45° с.ш.) природа таких изменений пока неясна. Теснота связи между NAO и АО в современный период снизилась до минимальной за 1950–2023 гг. ($r = 0,65$). Следует заметить, что значимой корреляции этих индексов ни с уровнем моря, ни с составляющими его водного баланса не было обнаружено, как и в предыдущий период (табл. 4 и 5). В [23] указывается, что при снижении активности в Северной Атлантике на климат Прикаспия усиливается влияние Тихого океана, как одного из самых значительных поставщиков тепла и влаги в атмосферу, и обычно это сопровождается снижением УКМ.

Таблица 5. Корреляционная матрица за период 1996–2023 гг. ($n = 28$, $p = 0,05$)
Table 5. Correlation matrix for 1996–2023 ($n = 28$, $p = 0.05$)

	dL*	Q*	Ta*	P*	E*	AO*	SCAND*	NAO*	EA/WR*
dL*	1,00	0,76	-0,16	0,08	-0,19	-0,04	-0,17	0,03	-0,12
Q*		1,00	-0,03	-0,10	-0,22	0,07	-0,34	0,20	-0,09
Ta*			1,00	-0,69	0,42	-0,01	-0,25	-0,02	-0,51
P*				1,00	-0,35	0,06	0,00	0,12	0,49
E*					1,00	0,24	-0,06	0,17	-0,42
AO*						1,00	-0,21	0,65	0,27
SCAND*							1,00	-0,04	0,10
NAO*								1,00	0,28
EA/WR*									1,00

В табл. 6 показано, какие процессы в атмосфере влияли на уровень и элементы водного баланса Каспийского моря в разные периоды. Следует отметить, что эти процессы для двух временных отрезков, характеризующихся снижением уровня моря, различны, за исключением положительной связи индекса EA/WR с осадками. В период 1950–1977 гг. характерны отрицательные корреляции температуры воздуха с индексом глобальной циркуляции NAO и межгодовых приращений уровня с индексом АО, а также положительная корреляция осадков с индексом циркуляции регионального масштаба EA/WR. В период подъема уровня в 1978–1995 гг. температура воздуха находилась под влиянием региональной циркуляции атмосферы, характеризуемой индексами EA/WR и SCAND. В настоящее время для температуры воздуха и испарения характерны отрицательные корреляции с EA/WR, а для осадков – положительная. При этом следует

отметить ослабление связей между самими индексами. Например, в 1950–1977 гг. коэффициент корреляции между NAO и АО составлял $r = 0,73$, а в 1978–1995 гг. достигал максимума $r = 0,92$, в то время как в современный период он снизился до $r = 0,65$.

Таблица 6. Наличие корреляции между показателями в разные периоды
Table 6. Correlation between parameters in specific periods

Индекс	dL*	Q*	T*	P*	E*
1950–1977 гг.					
NAO*	-	-		-	-
АО*		-	-	-	-
SCAND*	-	-	-	-	-
EA/WR*	-	-	-		-
1978–1995 гг.					
NAO*	-	-	-	-	-
АО*	-	-	-	-	-
SCAND*	-	-		-	-
EA/WR*	-	-		-	-
1996–2023 гг.					
NAO*	-	-	-	-	-
АО*	-	-	-	-	-
SCAND*	-	-	-	-	-
EA/WR*	-	-			

Примечание. Красным цветом отмечена положительная корреляция, синим – отрицательная.

Индекс EA/WR описывает волновые процессы регионального масштаба. Поскольку коэффициенты корреляции некоторых элементов водного баланса Каспийского моря с ним максимальны, следовательно, процессы атмосферной циркуляции регионального масштаба имеют на них в настоящее время большее влияние, чем глобальные процессы. Возможно, усиление блокирующих ситуаций, отмеченное в [4, 5, 17], приводит к большей регионализации климата Прикаспия. К тому же повышенное в современный период испарение зависит не только от роста температуры, но и от особенностей переноса воздушных масс в регионе, характеризующихся направлением и интенсивностью ветра, что отмечалось также в [10, 16]. Отсутствие значимых связей с индексами глобальной циркуляции, возможно, объясняется рассмотрением в данной работе только годовой изменчивости исследуемых показателей, в то время как влияние характеристик циркуляции носит в основном сезонный характер. Например, в [4] указывается, что влиянием NAO, SCAND и EA/WR определялась повторяемость циклонов на ЕТР в зимний сезон, в то время как в летний сезон, когда испарение становится максимальным, вклад NAO был не значим. В [17] показано, что в летний период возросло связанное с отрицательными фазами колебания EA/WR и NAO число случаев блокирования западного переноса на ЕТР.

Заключение

На основе анализа годовых данных за 1950–2023 гг. исследованы изменения уровня Каспийского моря (УКМ), основных составляющих его водного баланса и их связей с индексами глобальной и региональной атмосферной циркуляции (АО, NAO, SCAND, EA/WR). Установлена статистически значимая разница среднемноголетних величин стока Волги, а также уровня Каспийского моря, для всех трех выделенных характерных периодов, соответствующих фазам спада и подъема уровня Каспийского моря. В отличие от них, количество осадков статистически значимо увеличивалось только в период подъема уровня в 1978–1995 гг., а значимые различия средних величин температуры воздуха и испарения наблюдаются исключительно в последний период снижения уровня (1996–2023 гг.).

На протяжении всего исследуемого периода (1950–2023 гг.) отмечается устойчивая корреляционная связь между стоком Волги и межгодовыми приращениями УКМ ($r = 0,70$). При этом наблюдается усиление связи во времени: от $r = 0,39$ в 1950–1977 гг. до $r = 0,76$ в 1996–2023 гг. В то же время общая тенденция УКМ к снижению соответствует динамике РИК температуры воздуха и испарения. Повышение интенсивности испарения в последние десятилетия обусловлено совместным влиянием повышения температуры воздуха и региональной атмосферной циркуляции, блокирующей западный перенос влаги в регион. Следовательно, усиление воздействия в последние годы климатических факторов, формирующих жаркие и засушливые условия (включая маловодность рек бассейна), привело к повышению чувствительности межгодовых колебаний УКМ к вариациям речного стока.

Структура связей уровня Каспийского моря и основных составляющих его водного баланса с показателями циркуляции атмосферы не остается постоянной. Она изменяется во времени, что определяется особенностями глобальных и региональных атмосферных процессов. При этом в роли значимых предикторов в различные периоды выступают разные центры действия атмосферы. В современный период наибольшее влияние оказывают региональные процессы, описываемые индексом EA/WR, тогда как связи с глобальными индексами (NAO, AO) ослабевают или становятся незначимыми. Однако важно отметить, что в данной работе анализировалась годовая изменчивость УКМ и элементов водного баланса, в то время как влияние циркуляционных процессов имеет выраженную сезонную составляющую.

Список литературы

1. Абузаров З.К. Сверхдолгосрочные прогнозы уровня Каспийского моря на 6, 12 и 18 лет // Труды Гидрометцентра России. 2015. № 354. С. 79-95.
2. Бардин М.Ю., Платова Т.В. Долгопериодные вариации показателей экстремальности температурного режима на территории России и их связь с изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции и глобальным потеплением // Метеорология и гидрология. 2019. № 12. С. 5-19.
3. Бардин М.Ю., Ранькова Э.Я., Платова Т.В. и др. Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 29-45.

4. Бардин М.Ю., Платова Т.В., Самохина О.Ф. Долгопериодные изменения повторяемости циклонов в умеренных широтах Северного полушария // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2021. Т. 7, № 2. С. 57-80.
5. Бардин М. Ю., Платова Т.В., Попов И.О. Изменения статистики экстремумов температурного режима в зернопроизводящих регионах юга Европейской России и Западной Сибири // *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*. 2023. Т. 34, № 3-4. С. 17-44.
6. Богучава Д.Д., Семенов В.А. Роль естественных колебаний и факторов внешнего воздействия на климат в потеплении середины XX века в Северном полушарии // *Лед и снег*. 2022. Т. 62, № 3. С. 455-474.
7. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Вып. 1. М.: Мир, 1974. 406 с.
8. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филиппова И.А. Речной сток и вероятностный прогноз уровня Каспийского моря // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 10. С. 17-26.
9. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. М: Триада Лтд, 2016. 374 с.
10. Выручалкина Т.Ю., Дианский Н.А., Фомин В.В. Влияние на эволюцию Каспийского моря многолетних изменений режима ветра над его регионом в 1948-2017 гг. // *Водные ресурсы*. 2020. Т. 47, № 2. С. 230-240.
11. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Серых И.В., Лебедев С.А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980-2020) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 5. С. 277-291.
12. Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Степаненко В.М. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России // *Известия РАН. Серия географическая*. 2022. Т. 86, № 3. С. 435-446.
13. Ермаков В.Б. Многолетние изменения уровня Каспийского моря и современные варианты их прогнозирования // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2023. Т. 87, № 6. С. 930-940.
14. Куст Г.С., Шкляева Д.С., Лобковский В.А., Андреева О.В. Использование методологии нейтрального баланса деградации земель для оценки территории Прикаспийского региона // *Аридные экосистемы*. 2024. Т. 30, № 2 (99). С. 24-35.
15. Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Исупова М.В. Гидролого-морфологические процессы в устьях рек Каспийского региона как возможные аналоги ожидаемых изменений устьев других рек России и мира // *Водные ресурсы*. 2014. Т. 41, № 5. С. 471-487.
16. Нестеров Е.С. Низкочастотная изменчивость циркуляции атмосферы и уровень Каспийского моря во второй половине XX века // *Метеорология и гидрология*. 2001. № 11. С. 27-36.
17. Нестеров Е.С., Павлова А.В. Влияние колебаний циркуляции атмосферы на уровень Каспийского моря // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2024. № 1 (391). С. 56-70.
18. Островская Е.В., Гаврилова Е.В., Гонтовая И.В. и др. Гидрометеорологические показатели состояния российского сектора Каспийского моря в условиях меняющегося климата // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2023. Т. 87, № 6. С. 914-929.
19. Панин Г.Н., Дианский Н.А. О связи колебаний уровня Каспийского моря и климата Северной Атлантики // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 3. С. 304.
20. Панин Г.Н., Выручалкина Т.Ю., Соломонова И.В. Климатические изменения в Арктике, северной Атлантике, районе Каспия и их взаимосвязь // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. Т. 1. С. 183-210.
21. Рычагов Г.И. Колебания уровня Каспийского моря: причины, последствия, прогноз // *Вестник Московского ун-та. Серия 5. География*. 2011. № 2. С. 4-12.
22. Свиточ А.А. Большой Каспий: строение и история развития. М.: Изд-во МГУ, 2014. 272 с.

23. Серых И.В., Костяной А.Г. О влиянии Атлантического и Тихого океанов на изменение климатических параметров Каспийского моря // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 5. С. 96-107.
24. Холопцев А.В., Наурузбаева Ж.К. Связи межгодовых вариаций среднемесячных уровней Каспия, сумм атмосферных осадков в его бассейне и их изменения при современном потеплении климата // *География и водные ресурсы*. 2024. № 3. С. 21-36.
25. Устья рек Каспийского региона: история формирования, современные гидролого-морфологические процессы и опасные гидрологические явления. М.: ГЕОС, 2013. 703 с.
26. Фролов А.В. Сценарные прогнозы колебаний уровня Каспия с учетом климатических и техногенных воздействий на водный баланс моря // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47, № 5. С. 130-148.
27. Черенкова Е.А., Бардин М.Ю., Платова Т.В., Семенов В.А. Влияние долгопериодной изменчивости температуры поверхности океана в Северной Атлантике и изменений атмосферной циркуляции на повторяемость сильных атмосферных засух летом на юге Восточно-Европейской равнины // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 12. С. 5-19.
28. Чувашов А.В., Малов Д.Н., Степанова Н.Ю., Голуб В.Б. Оценка динамики растительных сообществ в восточной части дельты р. Волги (1980-2023 гг.) // *Аридные экосистемы*. 2024. Т. 30, № 1 (98). С. 67-74.
29. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Причины повышения уровня Каспийского моря // *Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна*. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. С. 254-266.
30. Ambaum M.H., Hoskins B.J., Stephenson D.B. Arctic oscillation or North Atlantic oscillation? // *Journal of Climate*. 2001. Vol. 14 (16). P. 3495-3507.
31. Arpe K., Bengtsson L., Golitsyn G.S., Mokhov I.I., Semenov V.A., Sporyshev P.V. Connection between Caspian Sea level variability and ENSO // *Geophysical Research Letters*. 2000. Vol. 27 (17). P. 2693-2696.
32. Arpe K., Leroy, S.A.G., Wetterhall F. et al. Prediction of the Caspian Sea level using ECMWF seasonal forecasts and reanalysis // *Theoretical and Applied Climatology*. 2014. Vol. 117. P. 41-60.
33. Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tapley B D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., Safarov E.S. Long-term Caspian Sea level change // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44. P. 6993-7001.
34. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2023. <https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7>
35. Huang L., Lee S.-S., Timmermann A. Caspian Sea and Black Sea response to greenhouse warming in a high-resolution global climate model // *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48. P. e2020GL090270.
36. Koriche S.A., Singarayer J.S., Cloke H.L. The fate of the Caspian Sea under projected climate change and water extraction during the 21st century // *Environmental Research Letters*. 2021. Vol. 16 (9). P. 094024.
37. Kroonenberg S.B., Rusakov G.V., Svitoch A.A. The wandering of the Volga delta: a response to rapid Caspian sea level change // *Sedimentary Geology*. 1997. Vol. 107. P. 189-209.
38. Lahidjani H.A.K., Ghaffari P., Leroy S.A.G. et al. A note on the silent decline of the Caspian environment // *Marine Pollution Bulletin*. 2024. Vol. 205. P. 1165551.
39. Lavers D. A., Simmons A., Vamborg F., Rodwell M. J. An evaluation of ERA5 precipitation for climate monitoring. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2022. Vol. 148 (748). P. 3124-3137. <https://doi.org/10.1002/qj.4351>
40. Leroy S.A.G., Gracheva R., Medvedev A. Natural hazards and disasters around the Caspian Sea // *Natural Hazards*. 2022. Vol. 114. P. 2435-2478.
41. Nandini-Weiss S.D., Prange M., Arpe K., Merkel U., Schulz M. Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area // *International Journal of Climatology*. 2020. Vol. 40 (5). P. 2717-2731. <https://doi.org/10.1002/joc.6362>.
42. Prange M., Wilke T., Wesselingh F.P. The other side of sea level change // *Communications Earth & Environment*. 2020. Vol. 1 (69). <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6>.

43. Safarov E., Bayramov E., Safarov S., Neafie J. Hedjazi A. Impact of changes in the wind regime on the Caspian Sea level fluctuation and its relationship with SOI and NAO // Scientific reports. 2025. Vol. 15. 36380.
44. Safarov E., Safarov S., Bayramov E. Changes in the Hydrological Regime of the Volga River and Their Influence on Caspian Sea Level Fluctuations // Water. 2024. Vol. 16 (12). P. 1744.
45. Samant R., Prange M. Climate-driven 21st century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections. Communications Earth and Environment. 2023. Vol. 4 (1). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01017-8>.
46. Semenov V.A., Latif M., Jungclaus J.H., Park W. Is the observed NAO variability during the instrumental record unusual? // Geophys. Research Letters. 2008. Vol. 35. P. L11701.
47. UNEP (United Nations Environment Programme) Caspian Sea Fluctuations and Climate Change: Coordinated research is needed to understand how climate change is impacting Caspian Sea levels. Working paper. 2024. Available at: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/46560> (Accessed: 3 June 2025).

References

1. Abousiarov Z.K., Nesterov E.S. Joint analysis of wind speed, wave height and the North Atlantic Oscillation index in synoptic range. *Trudy Gidrometcentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 354, pp. 79-95 [in Russ.].
2. Bardin M.Y., Platova T.V. Long-period Variations in Extreme Temperature Statistics in Russia as Linked to the Changes in Large-scale Atmospheric Circulation and Global Warming. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, no. 12, pp. 791-801. DOI: 10.3103/S106837391912001X
3. M. Yu. Bardin, E. Ya. Ran'kova, T. V. Platova, O. F. Samokhina, I. A. Korneva. Modern Surface Climate Change as Inferred from Routine Climate Monitoring Data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, no. 5, pp. 317-329. DOI: 10.3103/S1068373920050027
4. Bardin M.Ju., Platova T.V., Samokhina O.F. Dolgoperiodnye izmeneniya povtorjaemosti ciklonov v umerennyh shiroтах Severnogo polushariya. *Fundamental'naja i prikladnaja klimatologija [Fundamental and applied climatology]*, 2021, vol. 7 (2), pp. 57-80 [in Russ.].
5. Bardin M.Ju., Platova T.V., Popov I.O. Changes in statistics of temperature extremes in crop-yielding regions of southern European Russia and Western Siberia. *Ekologicheskij monitoring i modelirovanie jekosistem [Ecological monitoring and ecosystem modelling]*, 2023, vol. 34, no. 3-4, pp. 17-44 [in Russ.].
6. Boguchava D.D., Semenov V.A. The role of natural fluctuations and factors of external forcing in the early 20th century warming in northern hemisphere. *Led i sneg [Ice and snow]*, 2022, vol. 62, no. 3, pp. 455-474 [in Russ.].
7. Box G. E. P., Jenkins G.M. Time Series Analysis. San Francisco, Cambridge, London, Amsterdam, Holden-Day, 1970, 575 p.
8. Bolgov M.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D., Filippova I.A. River runoff and probabilistic forecast of the Caspian Sea level. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, no. 10, pp. 639-645. DOI: 10.3103/S1068373918100023
9. Vodnyj balans i kolebanija urovnja Kaspijskogo morja. Modelirovanie i prognoz. Moscow, Triada Ltd publ., 2016, 374 p. [in Russ.].
10. Vyruchalkina T.Y., Dianskii N.A., Fomin V.V. Effect of Long-term variations in wind regime over Caspian sea Region on the evolution of its level in 1948-2017. *Water Resources*, 2020, vol. 47, no. 2, pp. 348-357. DOI: 10.1134/S0097807820020190
11. Ginzburg A.I., Kostjanov A.G., Seryh I.V., Lebedev S.A. Climatic changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980–2020). *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2021, vol. 18, no. 5, pp. 277-291 [in Russ.].
12. Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Куреева М.Б., Степаненко В.М. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России. *Izvestiya Rossijskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2022, vol. 86, no. 3, pp. 435-446 [in Russ.].
13. Ermakov V.B. Long-Term Changes in the Level of the Caspian Sea and Modern Options for Their Forecasting. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya. [Bulletin of the Russian Academy*

of Sciences. Geography], 2023, vol. 87, no. 6, pp. 930-940 [in Russ.]. DOI: 10.31857/S2587556623060067

14. Kust G.S., Shklyajeva D.S., Lobkovskij V.A., Andreeva O.V. Ispol'zovanie metodologii nejtral'nogo balansa degradacii zemel' dlja ocenki territorii Prikaspijskogo regiona. *Aridnye ekosistemy [Arid ecosystems]*, 2024, vol. 30, no. 2(99), pp. 24-35 [in Russ.].

15. Mikhailov V.N., Mikhailova M.V., Isupova M.V. Hydrological and morphological processes at river mouths of the Caspian sea region as possible analogs of expected changes of mouths of other rivers in Russia and the world. *Water Resources*. 2014, vol. 41, no. 5, pp. 489-504. DOI: 10.1134/S0097807814050054

16. Nesterov E.S. Low-Frequency Atmospheric Circulation Variability and Caspian Sea Level in the Second Half of the 20th Century. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2001, no. 11, pp. 27-36 [in Russ.].

17. Nesterov E.S., Pavlova A.V. Influence of atmospheric circulation fluctuations on the Caspian Sea level. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2024, no. 1(391), pp. 56-70 [in Russ.].

18. Ostrovskaya E.V., Gavrilova E.V., Gontovaya I.V., Tatarnikov V.O., Ocheretnyi M.A. Hydrometeorological Parameters of the Marine Environment in the Russian Sector of the Caspian Sea under Changing Climate. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya. [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography]*, 2023, vol. 87, no. 6, pp. 914-929 [in Russ.]. DOI: 10.31857/S2587556623060109.

19. Panin G.N., Diansky N.A. On the correlation between oscillations of the Caspian sea level and the North Atlantic climate. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2014, vol. 50, no. 3, pp. 266-277. DOI: 10.1134/S000143381402008X

20. Panin G.N., Vyruchalkina T.Yu., Solomonova I.V. Climatic changes in the Arctic, North Atlantic, the Caspian Sea region, and their relationships. *Fundamental'naja i prikladnaja klimatologija [Fundamental and applied climatology]*, 2015, vol. 1, pp. 183-210 [in Russ.].

21. Rychagov G.I. Fluctuations of the Caspian sea level: Causes, effects, forecast. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5. Geography]*, 2011, no. 2, pp. 4-12 [in Russ.].

22. Svitoch A.A. Bol'shoj Kaspij: stroenie i istorija razvitiya. Moscow, Moscow university publ., 2014, 272 p. [in Russ.].

23. Seryh I.V., Kostjanov A.G. The Links of Climate Change in the Caspian Sea to the Atlantic and Pacific Oceans. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2020, no. 5, pp. 96-107 [in Russ.].

24. Holopcev A.V., Naurozbaeva Zh.K. Correlations of interannual variations in average monthly levels of the Caspian sea, as well as the total precipitation in its basin, and their changes under modern climate warming. *Geografija i vodnye resursy [Geography and water resources]*, 2024, no. 3, pp. 21-36 [in Russ.].

25. Ust'ja rek Kaspijskogo regiona: istorija formirovaniya, sovremennye gidrologo-morfologicheskie processy i opasnye gidrologicheskie javleniya. Moscow, GEOS publ., 2013, 703 p. [in Russ.].

26. Frolov A.V. Scenario forecasts of the Caspian sea fluctuations in the level under climatic and man-made impacts on the sea water balance. *Okeanologicheskie issledovaniya [Oceanological research]*, 2019, vol. 47, no. 5, pp. 130-148 [in Russ.].

27. Cherenkova E.A., Bardin M.Ju., Platova T.V., Semenov V.A. Influence of North Atlantic SST Variability and Changes in Atmospheric Circulation on the Frequency of Summer Droughts in the East European Plain. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, no. 12, pp. 819-829. DOI: 10.3103/S1068373920120018

28. Chuvashov A.V., Malov D.N., Stepanova N.Ju., Golub V.B. Ocenka dinamiki rastitel'nyh soobshestv v vostochnoj chasti del'ty r. Volgi (1980-2023 gg.). *Aridnye jekosistemy [Arid ecosystems]*, 2024, vol. 30, no. 1(98), pp. 67-74 [in Russ.].

29. Shiklomanov I.A., Georgievskij V.Ju., Shalygin A.L. Prichiny povysheniya urovnja Kaspijskogo morja. *Gidrometeorologicheskie aspekty problemy Kaspijskogo morja i ego bassejna*. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 2003, pp. 254-266 [in Russ.].

30. Ambaum M.H., Hoskins B.J., Stephenson D.B. Arctic oscillation or North Atlantic oscillation? *Journal of Climate*, 2001, vol. 14(16), pp. 3495-3507.

31. Arpe K., Bengtsson L., Golitsyn G.S., Mokhov I.I., Semenov V.A., Sporyshev P.V. Connection between Caspian Sea level variability and ENSO. *Geophysical Research Letters*, 2000, vol. 27(17), pp. 2693-2696.
32. Arpe K., Leroy, S.A.G., Wetterhall F. et al. Prediction of the Caspian Sea level using ECMWF seasonal forecasts and reanalysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, vol. 117, pp. 41-60.
33. Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tapley B D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., Safarov E.S. Long-term Caspian Sea level change. *Geophysical Research Letters*, 2017, vol. 44, pp. 6993-7001.
34. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N. The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Res. Met. Soc.*, 2020, vol. 146(730), pp. 1-51.
35. Huang L., Lee S.-S., Timmermann A. Caspian Sea and Black Sea response to greenhouse warming in a high-resolution global climate model. *Geophysical Research Letters*, 2021, vol. 48, e2020GL090270. DOI: 10.1029/2020GL090270
36. Koriche S.A., Singarayyer J.S., Cloke H.L. The fate of the Caspian Sea under projected climate change and water extraction during the 21st century. *Environmental Research Letters*, 2021, vol. 16(9). DOI: 10.1088/1748-9326/ac1af5
37. Kroonenberg S.B., Rusakov G.V., Svitoch A.A. The wandering of the Volga delta: a response to rapid Caspian Sea level change. *Sedimentary Geology*, 1997, vol. 107, pp. 189-209.
38. Lahidjani H.A.K., Ghaffari P., Leroy S.A.G. et al. A note on the silent decline of the Caspian environment. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, vol. 205, 1165551. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116551
39. Lavers D. A., Simmons A., Vamborg F., Rodwell M. J. An evaluation of ERA5 precipitation for climate monitoring. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2022. Vol. 148(748). P. 3124-3137. DOI: 10.1002/qj.4351
40. Leroy S.A.G., Gracheva R., Medvedev A. Natural hazards and disasters around the Caspian Sea. *Natural Hazards*, 2022, vol. 114, pp. 2435-2478. DOI: 10.1007/s11069-022-05522-5
41. Nandini-Weiss S.D., Prange M., Arpe K., Merkel U., Schulz M. Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area. *International Journal of Climatology*, 2020, vol. 40(5). DOI: 10.1002/joc.6362
42. Prange M., Wilke T., Wesselingh F.P. The other side of sea level change. *Communications Earth & Environment*, 2020, vol. 1(69). DOI: 10.1038/s43247-020-00075-6.
43. Safarov E., Bayramov E., Safarov S., Neafie J. Hedjazi A. Impact of changes in the wind regime on the Caspian Sea level fluctuation and its relationship with SOI and NAO. *Scientific reports*, 2025, vol. 15, pp. 36380.
44. Safarov E., Safarov S., Bayramov E. Changes in the Hydrological Regime of the Volga River and Their Influence on Caspian Sea Level Fluctuations. *Water*, 2024, vol. 16(12), pp. 1744. DOI: 10.3390/w16121744.
45. Samant R., Prange M. Climate-driven 21st century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections. *Communications Earth and Environment*, 2023, vol. 4(1). DOI: 10.1038/s43247-023-01017-8.
46. Semenov V.A., Latif M., Jungclaus J.H., Park W. Is the observed NAO variability during the instrumental record unusual? *Geophys. Research Letters*, 2008, no. 35. L11701.
47. UNEP (United Nations Environment Programme). Caspian Sea Fluctuations and Climate Change: Coordinated research is needed to understand how climate change is impacting Caspian Sea levels – Working paper. 2024. Available at: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/46560> (Accessed: 3 June 2025)

Поступила 04.11.2025; принята в печать 17.03.2026.
Submitted 04.11.2025; accepted for publication 17.03.2026.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-1-123-139>

УДК 551.465.6

Климатические изменения температуры воды в заливе Анива

**С.А. Мысленков^{1,2,3,4}, В.М. Пищальник⁵,
В.С. Архипкин^{1,2}, Е.М. Латковская¹**

¹Сахалинский государственный университет, г. Южно-Сахалинск, Россия;

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия;

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук, г. Москва, Россия;

⁴Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;

⁵Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия
stasocean@gmail.com

В работе представлен анализ температуры воды по архивным данным инструментальных наблюдений в заливе Анива с 1949 по 1994 год, по данным спутников – с 1981 по 2025 год, а также по данным измерений, выполненных в 2023 году. По данным метеостанции с 1969 по 2025 год минимальная величина тренда для температуры воздуха положительна, составляет 1.2 °С и наблюдается в декабре. Для августа рост температуры воздуха составляет около 1.6 °С, для марта – около 3.4 °С. По спутниковым данным для температуры воды наблюдается положительный тренд с величиной около 1.6 °С за весь период. В межгодовой изменчивости среднемесячной температуры воды максимальные положительные тренды наблюдаются в июле-августе – около 2.1–2.4 °С, а минимальные – в период с декабря по март (0.1–0.4 °С за весь период). По данным инструментальных наблюдений до 1994 года максимальные температуры наблюдались в августе и не превышали 20.1 °С. По данным судовых измерений в 2023 году зарегистрирована температура 21.46 °С, по спутниковым данным максимум наблюдался в июле 2021 года и составляет 22.55 °С. В среднем за исследуемый период практически во всем заливе тренды положительные и составляют 0.5–1 °С. Максимальное потепление отмечается в бухте Лососей и в северной части залива Анива.

Ключевые слова: температура воды, Охотское море, залив Анива, спутниковые данные, климатические тенденции

Climatic changes in water temperature in Aniva Bay

**S.A. Myslenkov^{1,2,3,4}, V.M. Pishchal'nik⁵,
V.S. Arkhipkin^{1,2}, E.M. Latkovskaya¹**

¹Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia;

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

³A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

⁴Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

⁵Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch
Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

stasocean@gmail.com

The paper presents an analysis of water temperature based on archived instrumental observations in Aniva Bay from 1949 to 1994, satellite data from 1981 to 2025, and direct measurements made in 2023. According to the weather station from 1969 to 1925, the minimum trend value for air temperature is positive and is 1.2 °C for the entire period and is observed in December. For August, the increase in air temperature is about 1.6 °C, and for March about 3.4 °C. According to satellite data, a positive trend is observed for water temperature, with a value of about 1.6 °C over the entire period. In the interannual variability of the monthly average water temperature, the greatest positive trends are observed in July–August – about 2.1–2.4 °C over the entire period. According to in situ measurements, until 1994, maximum temperatures were observed in August and did not exceed 20.1 °C. According to ship measurements, a temperature of 21.46 °C was recorded in 2023, according to satellite data, the maximum 22.55 °C was observed in July 2021. On average, the trends in almost the entire bay during the study period were positive and amounted to 0.5–1 °C. The maximum warming is observed in Salmon Bay and in the northern part of Aniva Bay

Keywords: water temperature, Sea of Okhotsk, Aniva Bay, satellite data, climatic trends

Введение

Процесс, называемый «глобальное потепление», проявляется в том числе в увеличении температуры воды в океане, однако динамика климатических изменений имеет существенные пространственные различия. Действительно, по различным данным средняя температура воздуха и воды на планете и на территории России увеличивается [1, 3, 12, 21]. Однако термин «глобальное потепление» предполагает повсеместное увеличение температуры, тогда как в реальности этот процесс в каких-то районах идет интенсивнее, а где-то вообще наблюдается похолодание. Также ученые высказывают обоснованные сомнения о корректности методики оценок глобального потепления [17], так как за последние 100 лет кардинально изменились как средства и методы измерений, так и количество станций, что особенно хорошо видно при оценке количества и пространственного охвата измерений температуры в «доспутниковую» эпоху и в настоящее время. Еще больше споров возникает о роли природных и антропогенных факторов в климатических изменениях [15]. С другой стороны, если уйти от термина «глобальное» и перейти к региональным оценкам, особенно для тех районов, где имеются продолжительные ряды инструментальных наблюдений, то можно более достоверно оценить существующие тенденции в изменении температуры.

Залив Анива расположен в южной части острова Сахалин. Залив имеет размеры приблизительно 100×100 км и длину береговой линии около 230 км. Глубины в северной части залива составляют 20–50 м, в южной части до 100 м (рис. 1). Залив Анива расположен вблизи пролива Лаперуза в зоне взаимодействия вод Охотского и Японского морей. Залив имеет важное транспортное и рыбохозяйственное значение. На побережье залива расположены крупные гидротехнические сооружения, такие как морской порт Корсаков и терминал по отгрузке нефти и сжиженного природного газа в порту Пригородное, которые являются потенциальными источниками техногенного загрязнения морских вод. Площадь акватории, пригодной под интенсивную марикультуру составляет 177 445 га [20].

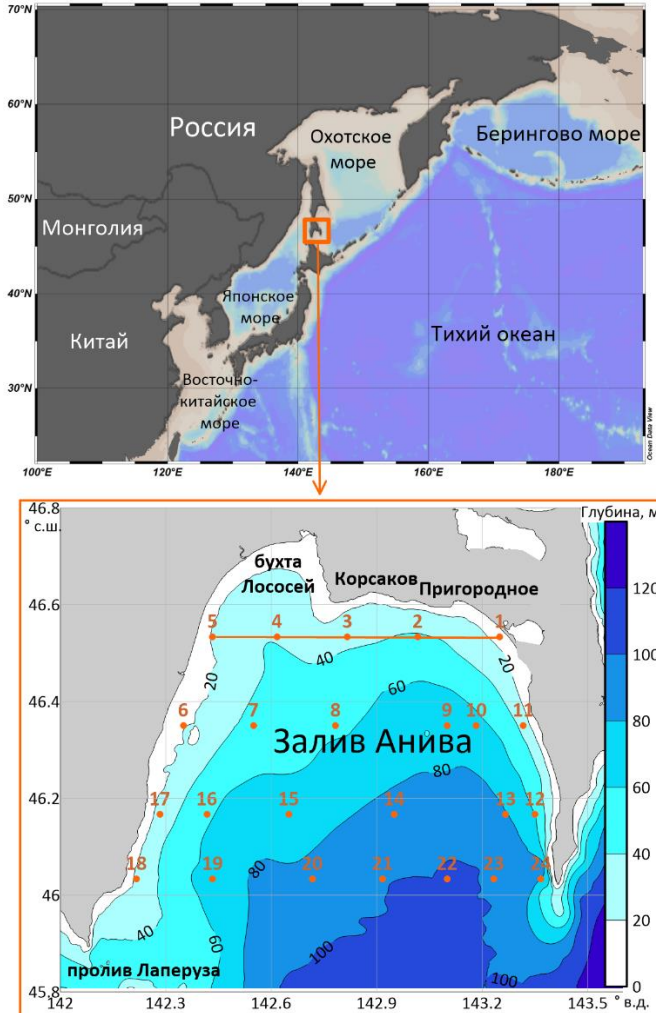


Рис. 1. Охотское море и залив Анива на врезке. Цифрами отмечены номера станций.

Fig. 1. The Sea of Okhotsk and Aniva Bay in the inset. The numbers indicate the station numbers.

С 2021 года в рамках проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в Сахалинской области функционирует карбоновый полигон «Сахалин», морские площадки которого расположены в заливе Анива. На полигоне планируется размещение марикультурной фермы, на которой будут получены оценки поглощающей способности CO_2 морскими экосистемами. Подробный анализ температуры воды залива Анива безусловно необходим для расчетов суммарного потока парниковых газов, а также для оценки климатических тенденций региона. На данный

момент в рамках работ на карбоновом полигоне Сахалин уже описаны гидрохимические особенности залива Анива [23], представлен климатический атлас [22], характеристики уровня моря и ветрового волнения [8, 9].

В настоящее время существует ряд работ, где рассматривалась температура воды в заливе на основе океанологических съемок [2] и по данным заякоренных станций [14]. Существует подробный анализ термохалинных характеристик пролива Лаперуза, включая часть залива Анива [24]. Также важные результаты получены на основе данных атласа Сахалинский шельф, где собраны все данные океанологических съемок с 1949 по 1994 год [10]. По данным заякоренных станций в 2002–2003 гг. [4, 14] на горизонте 6–7 м в августе зарегистрированы максимальные температуры 15–17 °С. В [6] показано, что в целом для Охотского моря за период 1998–2017 гг. наблюдается снижение температуры поверхностного слоя, наиболее существенное в его северной и западной частях.

Целью данного исследования является анализ сезонной и межгодовой изменчивости температуры воздуха и температуры воды на поверхности в заливе Анива по данным прямых измерений и по спутниковым данным за период.

Данные и методы

Данные температуры воздуха на метеостанции

Для анализа температуры воздуха мы использовали среднемесячные данные метеостанции Корсаков с 1969 года по октябрь 2025 года. Данные получены с сайта <http://www.pogodaiklimat.ru/>. По этим данным были построены графики изменения температуры воздуха и посчитаны линейные тренды.

Спутниковые данные по температуре поверхности моря

Для анализа температуры воды в заливе Анива использованы данные OSTIA с пространственным разрешением 0.05° за период с 1 октября 1981 г. по 30 сентября 2025 г. с шагом по времени 1 сутки. Анализ OSTIA формируется на основе данных следующих спутников: GCOM-W, MetOp-B, MSG, SNPP, NOAA-20, Sentinel 3A, Sentinel 3B [19]. Для анализа в заливе Анива была выбрана точка в северной части залива (46.52° с. ш., 142.77° в. д., рядом со станцией № 3 на рис. 1). Также были построены карты средних температур за периоды октябрь 1981 г. – сентябрь 1990 г. и октябрь 2015 г. – сентябрь 2025 г., а также карта разности температур за эти периоды.

Архивные инструментальные данные по температуре воды

В данной работе использована база данных программы «ATLAS» [13], в которую включены станции, выполненные по стандартной сетке разрезов из 24 станций в заливе Анива. Подробный анализ структуры вод по данным наблюдений сделан в работах [10, 22]. Данные судовых съемок доступны

за период 1948 по 1994 год и привлекались для оценки изменчивости температуры. Данные содержат 2663 профиля измерения температуры, на основе этих данных был создан климатический атлас шельфа Сахалина и монография, посвященная моделированию природных процессов [16, 22].

Результаты

На первом этапе был выполнен анализ температуры воздуха на метеостанции Корсаков, которая расположена на побережье в заливе Анива. На рис. 2 представлена среднеголетняя (с 1969 по 2025 г.) температура для разных месяцев года. Максимальная температура наблюдается в августе и составляет $17.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, минимальная температура наблюдается в январе и составляет $-9.9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

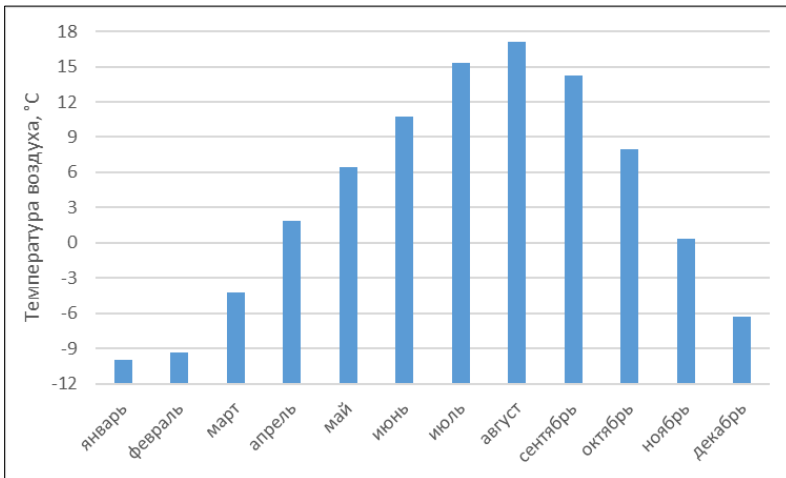


Рис. 2. Среднеголетняя температура воздуха по месяцам по данным метеостанции Корсаков.

Fig. 2. Average annual air temperature by month according to the Korsakov weather station.

Анализ климатических изменений среднемесячной температуры воздуха показал, что с 1969 по 2025 год наблюдаются положительные тренды для всех месяцев (рис. 3). Тренды несколько отличаются в зависимости от сезона. Минимальная величина тренда составляет $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ за весь период и наблюдается в декабре. Для августа рост температуры составляет около $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для марта около $3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отрицательные тенденции для температуры воздуха в некоторые месяцы наблюдались только в период с 1990–2000 гг. (рис. 3). Однако в общем за последние 57 лет температура воздуха увеличивается, что говорит о наличии достаточно устойчивой тенденции.

Для анализа климатических изменений температуры воды в пространстве были построены карты средней температуры для залива Анива за периоды 1981–1990 и 2016–2025 гг., а также карта разности температур в эти

периоды (из более позднего периода вычитался более ранний). На акватории залива Анива в период 1981–1990 гг. более теплые воды около $6.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдались вдоль западного побережья залива (рис. 4а), по всей видимости из-за влияния теплого течения Соя. В период 2016–2025 гг. наиболее теплые воды $7.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдались в мелководной бухте Лососей и в северной части залива (рис. 4б).

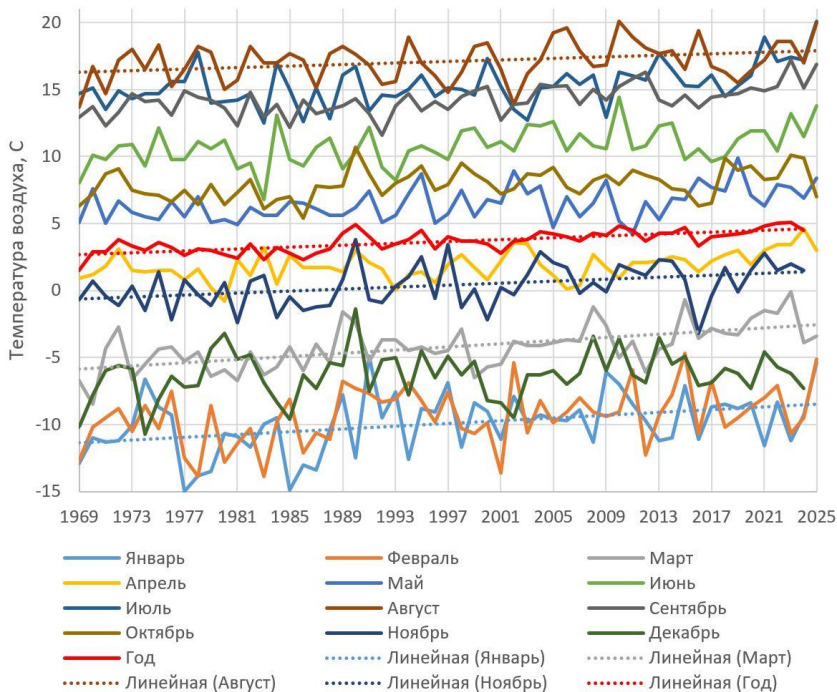


Рис. 3. Изменение среднемесячной температуры воздуха с 1969 г. по октябрь 2025 года по данным метеостанции Корсаков.

Fig. 3. Change in the average monthly air temperature from 1969 to October 2025 according to the Korsakov weather station.

Разности температур за два исследуемых периода практически во всем заливе положительные и составляют $0.5\text{--}1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Максимальное потепление отмечается в бухте Лососей и в северной части залива. Четко выделяется область с отрицательной разностью к юго-востоку от мыса Крильон. В этой области формируется приливной апвеллинг, описанный еще в работе С.О. Макарова [7]. Можно предположить, что подповерхностные воды (которые во время апвеллинга выходят к поверхности) становятся более холодными, так как интенсивность приливного апвеллинга не должна иметь выраженной многолетней изменчивости. Однако, вполне вероятно, что понижение температуры происходит не во время апвеллинга, а в «фоновом режиме», и может быть связано с изменением структуры течений: смещению ядра теплого течения Сои к югу или изменению его интенсивности,

или влиянию Западно-Сахалинского течения (где температура не растет, а, наоборот, понижается). Данный вопрос является дискуссионным и требует отдельного более детального рассмотрения.

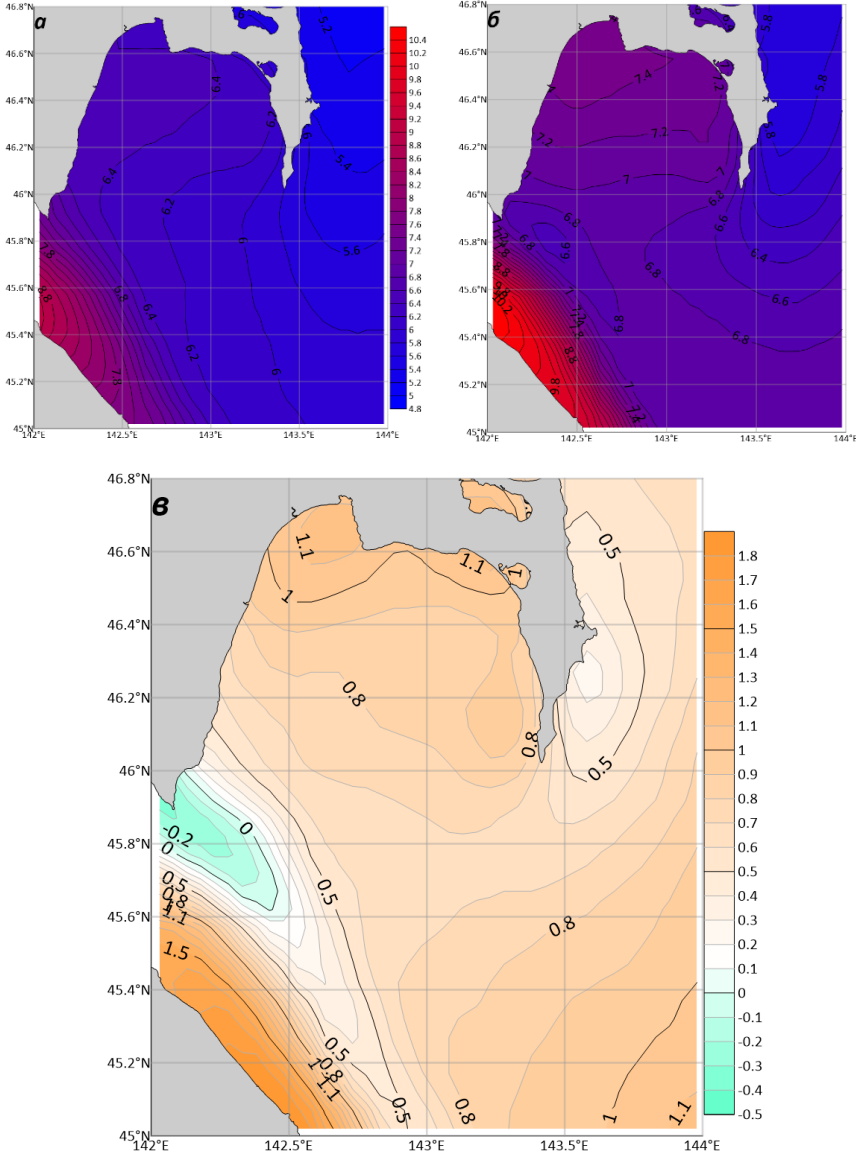


Рис. 4. Средняя спутниковая температура в заливе Анива за период с 1.10.1981 по 30.09.1990 (а); с 1.10.2016 по 30.09.2025 (б) и их разность (в).
Fig. 4. Average satellite surface water temperature in Aniva Bay for the period from 1.10.1981 to 30.09.1990 (a), from 1.10.2016 to 30.09.2025 (б) and their difference (в).

Так как воды залива Анива формируются преимущественно под влиянием вод Восточно-Сахалинского течения и течения Соя, то причиной увеличения температуры могут быть изменения в объемах и температуре поступающих вод. С другой стороны, максимальное потепление наблюдается в прибрежной мелководной части, где, вероятно, преобладающее влияние оказывают локальные факторы – радиационный погрев и обмен теплом с атмосферой.

Далее рассмотрим межгодовую изменчивость приповерхностной температуры воды по судовым данным на станциях № 2, 3, 4 (схема станций на рис. 1), где, судя по спутниковым данным, наблюдается максимальное потепление. К сожалению, измерения выполнялись в разные месяцы и самих съемок не так много, поэтому выполнить анализ тенденций затруднительно. Однако можно проанализировать максимумы температуры воды в разные годы. На станциях № 2, 3, 4, максимумы температуры за весь период составляют 20.1, 19.8 и 19.6 °С соответственно и зарегистрированы в августе 1958 и 1961 гг. (рис. 5). Анализируя график, можно отметить, что температура более 18 °С наблюдалась в разные годы в период с 1951 по 1962 год, а далее только один раз в 1970 году.

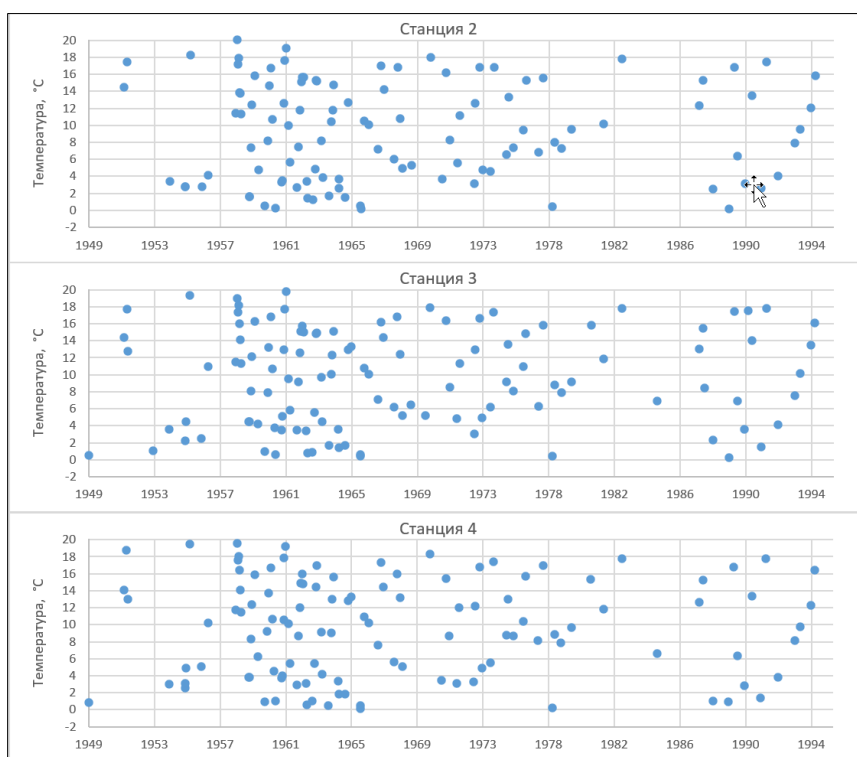


Рис. 5. Температура воды на поверхности на станциях № 2, 3, 4.

Fig. 5. Surface water temperature at stations No. 2, 3, 4 based on ship-based observations.

По имеющимся данным, на качественном уровне можно констатировать, что роста максимальных температур за период с 1949 по 1994 год не наблюдается.

Дополнительная информация об инструментальных измерениях имеется в литературных источниках. Подробные исследования гидрологической структуры для прибрежного района порта Пригородное были выполнены с апреля по декабрь 2003 года в рамках оценки фоновое экологического состояния при строительстве завода СПГ [5]. Максимальная температура наблюдалась в августе и составила 19.6°C . По данным океанологических съемок в 2001–2003 гг. [2] максимальные температуры в приповерхностном слое не превышали 19°C .

На следующем этапе был выполнен анализ доступных спутниковых данных за период с 1981 по 2025 г. в точке 46.52° с. ш., 142.77° в. д., расположенной рядом со станцией № 3. На рис. 6 представлен график изменения температуры воды для этой точки.

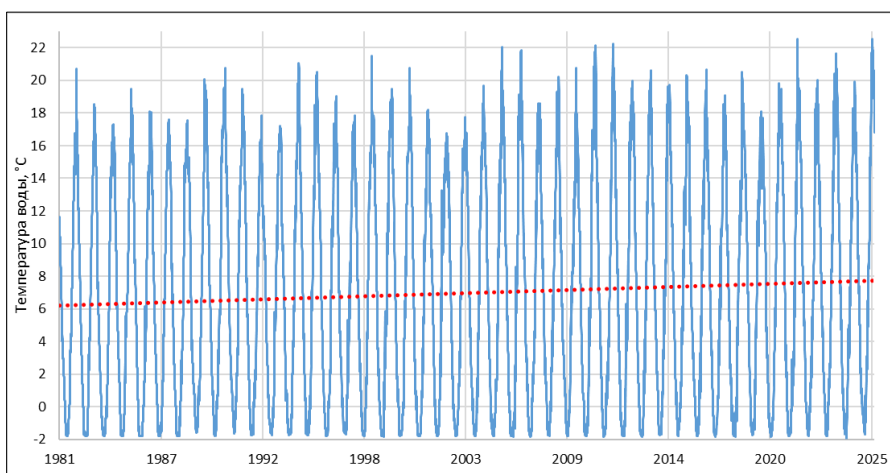


Рис. 6. Изменение температуры воды в заливе Анива (точка 46.52° с. ш., 142.77° в. д., рядом со станцией № 3) с 1.10.1981 по 30.09.2025.

Fig. 6. Change in surface water temperature in Aniva Bay (point 46.52°N , 142.77°E , near station No. 3) from 1.10.1981 to 30.09.2025.

Минимум температуры воды -1.86°C наблюдался 13.02.1985, максимум 22.55°C – 28.07.2021. Надо отметить, что отметка в 20°C достигается не каждый год, однако такие случаи зарегистрированы более чем в двадцати годах из всего рассматриваемого периода. По данным имеющихся инструментальных наблюдений превышение температуры 20°C зафиксировано только 1 раз. Это можно объяснить гораздо большим объемом спутниковых данных по сравнению с эпизодическими судовыми съемками, либо погрешностью спутниковых измерений. На графике выражен положительный многолетний тренд с величиной около 1.6°C за весь период

(рис. 6). Существенное влияние на итоговый тренд оказал период с 2021 по 2025 год, когда температура в двух годах превышала отметку 22 °С.

Также по спутниковым данным был выполнен анализ среднемесячной температуры воды с 1982 по 2025 г. в исследуемой точке отдельно для каждого месяца (рис. 7). Многолетние тренды для всех месяцев положительные. Минимальные величины трендов отмечаются в период с декабря по март (0.1–0.4 °С за весь период). Наибольшие тренды наблюдаются в июле-августе – около 2.1–2.4 °С за весь период. Максимальные температуры наблюдаются в августе. Максимальная среднемесячная температура зарегистрирована в августе 2025 года с составляет 21.3 °С, хотя ранее только в 2010 г. немного была превышена отметка в 20 °С. Наибольшая дисперсия среднемесячных значений наблюдается в период с июля по сентябрь.

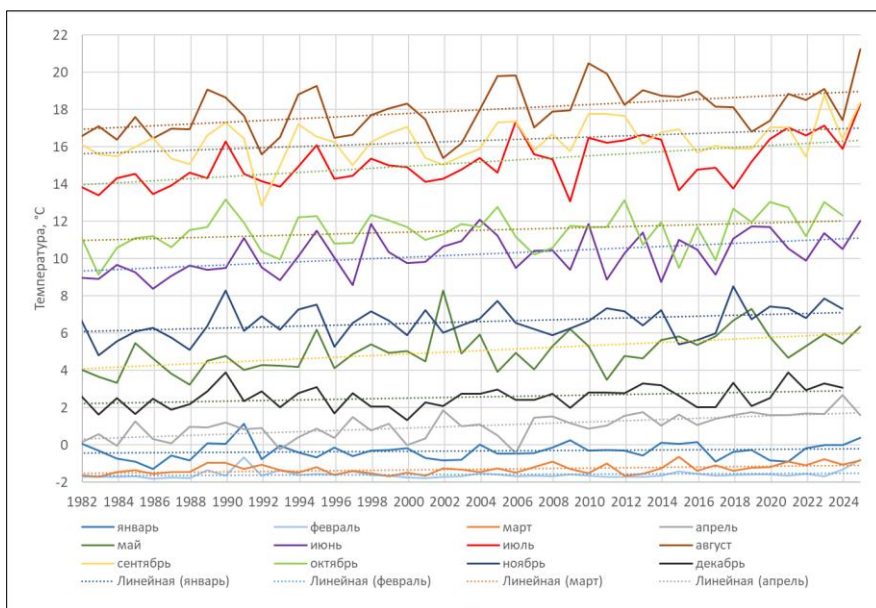


Рис. 7. Среднемесячная температура воды в заливе Анива (точка 46.52N, 142.77E, рядом со станцией № 3) с января 1982 по сентябрь 2025 г. по месяцам.

Fig. 7. Average monthly water temperature in Aniva Bay (point 46.52N 142.77E, near station No. 3) since January 1982 until September 2025 by month.

Необходимо отметить, что наблюдаемый рост температуры не является монотонным и наблюдаются периоды продолжительностью 1–4 года (например, для августа 1989–1992, 1995–1996, 2000–2002, 2006–2007, 2016–2019 гг.), когда температуры воды понижалась.

В [6] для периода с 1998 по 2017 г. для залива Анива получены слабые отрицательные тренды (около 0.5–1 °С). Если в наших расчётах сократить выборку до этого периода, то появляются отрицательные тренды в июне-июле и октябре-ноябре, а в остальные месяцы тренды остаются

положительными, но слабыми. Это может быть связано с разными исходными данными и их пространственным разрешением. В [6] используется собственная база данных СахНИРО на основе системы TerraScan. При формировании этой базы данных не использовались никакие иные процедуры, кроме усреднения. Как указывают авторы, нельзя считать эти данные эталонными, так как наличие пропусков из-за влияния облачности или ледяного покрова вносит определённые погрешности, но, с другой стороны, сопоставление с данными реанализа ERA5 показало, что в среднегодовых значениях отличия массивов невелики.

Но очевидно, что 2017 г. является локальным минимумом: для всех месяцев, кроме мая с 2018 по 2025 г., наблюдался рост температур (рис. 7). Поскольку при формировании базы данных СахНИРО не использовались никакие иные процедуры, кроме усреднения, она рассматривалась как некоторая условная основа сравнения. Нельзя сказать, что эти данные являются эталонными, так как наличие пропусков из-за влияния облачности или ледяного покрова вносит определённые погрешности, что не позволяет рассматривать их как «истинные» значения ТПО.

В [11] показано, что для Охотского моря с 1980 по 2015 г. наблюдается устойчивый отрицательный тренд ледовитости. Понятно, что оценки ледовитости только косвенно связаны с температурой воды, однако в целом для региона эти тенденции нельзя не отметить.

Если рассмотреть тренды по данным метеостанции за тот же период, когда имеются данные спутников (1981–2025 гг.), то величина тренда для среднегодовой температуры воздуха составляет около 1.5 °С, а для марта около 3.6 °С (тренд за весь период). Таким образом, мы имеем однонаправленные тренды в температуре воздуха и температуре воды с близкими по абсолютной величине значениями. Это говорит о возможном влиянии радиационного прогрева в мелководной прибрежной зоне. С другой стороны, опираясь на карты пространственного распределения разностей температуры воды (см. рис. 4), мы видим, что максимальный прогрев в исследуемой акватории наблюдается в районе теплого течения Соя, которое в свою очередь влияет на весь залив Анива. Также есть данные о более масштабных положительных аномалиях температуры воды в северной части Тихого океана в 2020–2021 гг. [18]. Данный вопрос также нуждается в более детальном рассмотрении.

Тем не менее данные спутниковых наблюдений могут иметь погрешность и не всегда являются надежным источником данных. 5 сентября 2023 г. в заливе Анива при помощи STD зонда Daowan был выполнен разрез от станции № 1 до станции № 5. Температура и солёность на разрезе приведены на рис. 8. На всех станциях в приповерхностном слое наблюдалась температура воды более 20 °С, а на станции А5 инструментально зарегистрирован максимум 21.46 °С.

Для сопоставления с данными измерений была построена карта поверхностной температуры по спутниковым данным для 5 сентября 2023 г. (рис. 9).

Как видно на рис. 9, спутниковые и судовые данные в целом согласуются с разбросом около $0.5\text{--}1\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом важно отметить, что точного совпадения между спутниковыми данными и данными STD измерений в нашем случае не может быть. Используемый массив спутниковых данных является результатом обработки данных из нескольких источников и содержит осредненные за сутки значения, а STD данные являются мгновенными измерениями и отражают в том числе суточный ход температуры.

Дополнительно были проанализированы данные заякоренной станции, которая была установлена на глубине 10 м в заливе Анива рядом с лагуной Буссе. Датчик температуры в составе инклинометра показал, что 2–3 августа 2023 г. температура воды на глубине 10 м превышала $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 10). Этот факт также должен быть учтен, так как это важное инструментальное подтверждение присутствия вод теплее $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на глубине 10 м в заливе Анива. Можно уверенно предполагать, что на поверхности температура была еще выше.

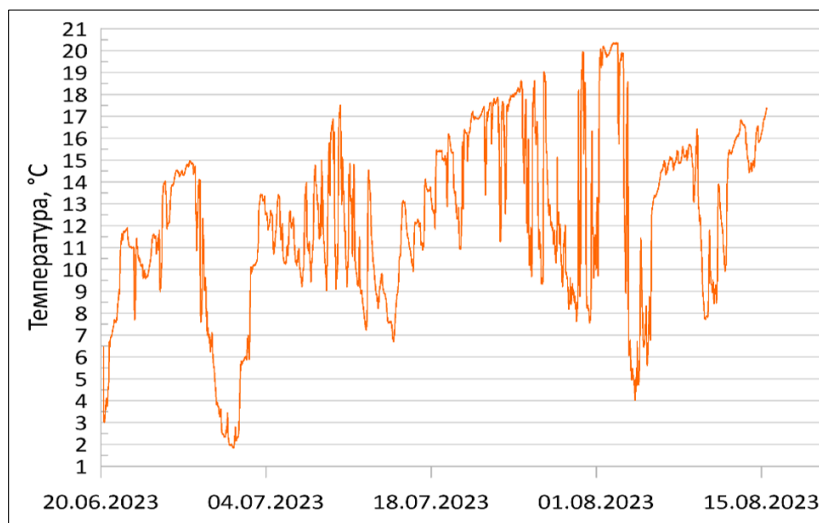


Рис. 10. Температура воды на заякоренной станции в заливе Анива в районе лагуны Буссе.

Fig. 10. Water temperature at the moored station in Aniva Bay in the area of Busse Lagoon.

Заключение

В результате анализа спутниковых и инструментальных данных в заливе Анива было установлено:

– для среднемесячной температуры воздуха на станции Корсаков с 1969 по 2025 г. наблюдаются положительные тренды для всех месяцев. Для августа рост температуры составляет около $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ за весь период, а для марта около $3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

– разности температуры воды за периоды с 1981 по 1990 г. и с 2016 по 2025 г. практически во всем заливе положительные и составляют 0.5–1 °С. Максимальное потепление отмечается в бухте Лососей и в северной части залива;

– по спутниковым данным за период с 1981 по 2025 г. на станции № 3 максимум температуры воды составляет 22.55 °С, наблюдается положительный тренд с величиной около 1.6 °С за весь период. По среднемесячным данным наибольшие тренды наблюдаются в июле-августе – около 2.1–2.4 °С за весь период;

– по данным архивных судовых съемок максимальная температура воды зарегистрирована в августе 1958 г. и составляет 20.1 °С. По данным съемки в сентябре 2023 г. инструментально зарегистрирован максимум температуры воды 21.46 °С.

Работа выполнена в рамках государственного задания Сахалинского государственного университета FEFF-2024-0004 (Архипкин В.С., Латковская Е.М.). Обработка данных метеостанции выполнена при поддержке темы государственного задания ИФА РАН № 125020501524-9 (Мысленков С.А.). Обработка спутниковых данных выполнена в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН FWWM-2024-0002 (Пищальник В.М.). Для измерений использовался комплекс научного оборудования МГУ «Гидрометеорологический комплекс: STD зонды, метеостанция» соглашение №196.

Список литературы

1. Брушков А.В., Васина А.И., Кияшко Н.В., Мельников М.И., Осокин А.А., Черняк Ю.В., Фалалеева А.А. Глобальное потепление и состояние вечной мерзлоты в России // Вестник московского университета. Серия 4. Геология. 2024. Т. 63, № 6. С. 4-11.
2. Будаева В. Д., Макаров В. Г., Частиков В. Н. Результаты гидрологических исследований залива Анива в 2001-2003 гг. (структура и циркуляция вод) // Труды СахНИРО. 2005. Том 7. С. 83-110.
3. Вакуленко Н. В., Серых И. В., Сонечкин Д. М. Колебания десятилетнего масштаба средней температуры Северного полушария в рамках современного глобального потепления // Океанология. 2025. Том 65, № 1. С. 5-22. DOI: 10.31857/S0030157425010015. EDN DRLMLS
4. Кантаков Г.А., Частиков В.Н., Шевченко Г.В. Современные исследования течений в рыбопромысловых районах Сахалино-Курильского региона // Труды СахНИРО. Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях. 2002. Т. 4. С. 3-21.
5. Коренева Т.Г., Латковская Е.М., Частиков В.Н. Сезонная динамика гидролого-гидрохимических характеристик и концентрации хлорофилла а в заливе Анива в 2003 г. // Вода: химия и экология. 2014. № 4. С. 33-45.
6. Ложкин Д.М., Шевченко Г.В. Тренды температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным 1998–2017 гг. // Исследование Земли из космоса. 2019. № 1. С. 55-61.
7. Макаров С.О. Гидрологические исследования, произведенные в 1895 и 1896 гг. в Лаперузском проливе и других местах // Океанографические работы. М.: Географгиз, 1950. С. 263-275.
8. Мысленков С. А., Пищальник В.М., Архипкин В.С., Латковская Е.М. Анализ ветрового волнения в заливе Анива по данным моделирования // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Т. 25, № 3. С. ES3012. DOI 10.2205/2025ES000957. EDN KTQGSC.

9. Мысленков С.А., Пищальник В.М., Кондрашов А.А. и др. Анализ измерений уровня моря и параметров ветрового волнения в заливе Анива (Охотское море) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. № 1 (395). С. 118-130.

10. Пищальник В.М., Бобков А.О. Океанографический атлас шельфовой зоны остро ва Сахалин. Ч. I. Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2000. 174 с.

11. Пищальник В.М. и др. Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1882 по 2015 г. // Известия ТИНРО. 2016. Т. 185. С. 228-239.

12. Росгидромет. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. СПб.: Научное издание, 2022. 676 с.

13. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 930078. Комплект прикладных программ для подготовки и графического представления гидролого-гидрохимических характеристик сахалинского шельфа («ATLAS»). Авторы: Пищальник В.М., Бобков А.О. Заявка № 930058. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08 декабря 1993 г.

14. Шевченко Г.В., Кантаков Г.А., Частиков В.Н. Экспериментальные исследования течений в заливе Анива осенью 2002 года // Труды СахНИРО. 2005. Т. 7. С. 224-244.

15. Шерстоков Б.Г. Глобальное потепление и его возможные причины // Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 7-37.

16. Цифровые технологии при моделировании природных процессов. / Под ред. В.М. Пищальника, В.А. Леонова. Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2020. 164 с.

17. Язев С.А., Леви К.Г., Задонина Н.В. Глобальное потепление и вопросы научной методологии // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2009. Т. 2, № 1. С. 198-213.

18. Feng W., Leung M.Y.T., Wang D. et al. An Extreme Drought over South China in 2020/21 Concurrent with an Unprecedented Warm Northwest Pacific and La Niña // Adv. Atmos. Sci. 2022. Vol. 39. P. 1637-1649. <https://doi.org/10.1007/s00376-022-1456-0>

19. Good S., Fiedler E., Mao C., Martin M.J., Maycock A., Reid R., Roberts-Jone, J., Searle T., Waters J., While J., Worsfold M. The Current Configuration of the OSTIA System for Operational Production of Foundation Sea Surface Temperature and Ice Concentration Analyses // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, no. 4. P. 720.

20. Maslennikov S.I. Marine Biological Resources in the Far Eastern Coast: Their Rational Use from Ecological and Economic Viewpoints // Energy and environment in Slavic Eurasia: toward the establishment of the network of environmental studies in the Pan-Okhotsk region. Sapporo: Slavik Research Center, Hokkaido University, 2008. P. 89-125.

21. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H., Roberts D., Skea J., Shukla P., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R. Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2018. 616 p.

22. Pishchalnik V.M., Arkhipkin V.S., Latkovskaya E.M., Myslenkov S.A., Bobkov A.O., Pishalnik A.V. Climatological oceanographic data of the shelf zone of Sakhalin island // Regional Studies in Marine Science. 2025. Vol. 89. P. 104389.

23. Pishchalnik V., Myslenkov S., Latkovskaya E., Arkhipkin V. Assessment of the Hydrochemical Characteristics of the Carbon Observational Site 'Carbon-Sakhalin' (Aniva Bay, Sea of Okhotsk) // Sustainability. 2024. Vol. 16, no. 7. P. 3031.

24. Pishchal'nik V.M., Arkhipkin V.S., Leonov A.V. Thermohaline analysis of the La Perouse Strait water // Water Resources. 2005. Vol. 32, no. 1. P. 13-22.

References

1. Broushkov A.V., Vasina A.I., Kiyashko N.V., Melnikov M.I., Osokin A.A., Chernyak Yu.V., Falaleeva A.A. Global warming and permafrost conditions in Russia. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologia [Moscow University Bulletin. Series 4. Geology]*, 2025, vol. 80, no. 1, pp. 1-8. DOI: 10.3103/S0145875225700103

2. Budaeva V.D., Makarov V.G., Chastikov V.N. Results of hydrological studies of Aniva Bay in 2001-2003 (waters structure and circulation). *Trudy SahNIRO [Transactions of the «SakhNIRO»]*, 2005, vol. 7, pp. 83-110 [in Russ.].

3. Vakulenko N.V., Serykh I.V., Sonechkin D.M. Decadal oscillations of the Northern Hemisphere average temperature within current global warming. *Okeanologiya [Oceanology]*, 2025, vol. 65, no. 1, pp. 5-22. DOI: 10.31857/S0030157425010015 [in Russ.].

4. Kantakov G.A., Chastikov V.N., Shevchenko G.V. New investigations of the currents in the fishing areas of Sakhalin and Kuril Region. *Trudy SahNIRO [Transactions of the «SakhNIRO»]*, 2002, vol. 4, pp. 3-21 [in Russ.].

5. Korneeva T.G., Latkovskaya E.M., Chastikov V.N. Sezonnaya dinamika gidrologo-gidrohimičeskikh harakteristik i koncentracii hlorofilla a v zalive Aniva v 2003 g. [Seasonal changes in the hydrological and hydrochemical characteristics and in the concentration of a-chlorophyll in Aniva Bay in 2005]. *Voda: himiya i ekologiya [Water: chemistry and ecology]*, 2014, no. 4, pp. 33-45 [in Russ.].

6. Lozhkin D.M., Shevchenko G.V. Trends in sea surface temperature of the Sea of Okhotsk and adjacent water areas by satellite data in 1998-2017. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth Research from Space]*, 2019, no. 1, pp. 55-61. DOI: 10.31857/S0205-96142019155-61 [in Russ.].

7. Makarov S.O. Gidrologičeskie issledovaniya, proizvedennye v 1895 i 1896 gg. v Laperuzovom prolive i drugih mestah. *Okeanograficheskie raboty*. Moscow: Geografiz Publ., 1950. P. 263-275. [in Russ.].

8. Myslenkov S., Pishchalnik V., Arkhipkin V., Latkovskaya E. Analysis of wind waves in Aniva Bay based on model results. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2025, vol. 25, no. 3, pp. ES3012. DOI 10.2205/2025ES000957. EDN KTQGSC.

9. Myslenkov S.A., Pishchalnik V.M., Kondrashov A.A., Kuptsova O.V., Arkhipkin V.S., Latkovskaya E.M. Analysis of sea level measurements and wind wave parameters in Aniva Bay (Sea of Okhotsk). *Gidrometeorologičeskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2025, vol. 395, no. 1, pp. 118-130. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-118-130> [in Russ.].

10. Pishhal'nik V.M., Bobkov A.O. Okeanograficheskiy atlas shel'fovoj zony ostro va Sahalin. Ch. I. Juzhno-Sahalinsk: Izd-vo SahGU, 2000. 174 p. [in Russ.].

11. Pishchalnik V.M., Romanyuk V.A., Minervin I.G., Batuhtina A.S. analysis of dynamics for anomalies of the ice cover in the Okhotsk Sea in the period from 1882 to 2015. *Izvestiya TINRO*, 2016, vol. 185, pp 228-239 [in Russ.].

12. Rosgidromet. Tretij ocenocnyj doklad ob izmenenijah klimata i ih posledstvijah na territorii Rossijskoj Federacii / pod red. V.M. Katcova. SPb.: Naukoemkie tehnologii, 2022. 676 s. [in Russ.].

13. Svidetel'stvo ob oficial'noj registracii programmy dlja JeVM № 930078. Komplekt prikladnyh programm dlja podgotovki i graficeskogo predstavlenija gidrologo-gidrohimičeskikh harakteristik sahalinskogo shel'fa («ATLAS»). Avtory: Pishhal'nik V.M., Bobkov A.O. Zajavka № 930058. Zaregistrovano v Reestre programm dlja JeVM 08 dekabrja 1993 g. [in Russ.].

14. Shevchenko G.V., Kantakov G.A., Chastikov V.N. Experimental investigations of currents in Aniva Bay in autumn 2002. *Trudy SahNIRO [Transactions of the «SakhNIRO»]*, 2005, vol. 7, pp. 224-244 [in Russ.].

15. Sherstyukov B.G. Global warming and its possible causes. *Hydrometeorology and Ecology*. 2023, no.70, pp. 7-37. DOI: 10.33933/2713-3001-2023-70-7-37 [in Russ.].

16. Cifrovye tehnologii pri modelirovanii prirodnyh processov. / Pod red. V.M. Pishhal'nika, V.A. Leonova. Juzhno-Sahalinsk: Izd-vo SahGU, 2020. 164 p.

17. Yazev S.A., Levi K.G., Zadonina N.V. The global warming and problems of methodology. *Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya Nauki o Zemle [The Bulletin of Irkutsk State University. Series EARTH SCIENCES]*, 2009, vol. 2, no. 1, pp. 198-213 [in Russ.].

18. Feng W., Leung M.Y.T., Wang D. et al. An Extreme Drought over South China in 2020/21 Concurrent with an Unprecedented Warm Northwest Pacific and La Niña. *Adv. Atmos. Sci.*, 2022, vol. 39, pp. 1637-1649. <https://doi.org/10.1007/s00376-022-1456-0>

19. Good S., Fiedler E., Mao C., Martin M.J., Maycock A., Reid R., Roberts-Jone, J., Searle T., Waters J., While J., Worsfold M. The Current Configuration of the OSTIA System for Operational Production of Foundation Sea Surface Temperature and Ice Concentration Analyses. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 4, pp. 720.

20. Maslennikov S.I. Marine Biological Resources in the Far Eastern Coast: Their Rational Use from Ecological and Economic Viewpoints. *Energy and environment in Slavic Eurasia: toward the establishment of the network of environmental studies in the Pan-Okhotsk region*. Sapporo: Slavik Research Center, Hokkaido University, 2008, pp. 89-125.

21. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H., Roberts D., Skea J., Shukla P., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R. Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2018, 616 p.

22. Pishchalnik V.M., Arkhipkin V.S., Latkovskaya E.M., Myslenkov S.A., Bobkov A.O., Pishalnik A.V. Climatological oceanographic data of the shelf zone of Sakhalin island. *Regional Studies in Marine Science*, 2025, vol. 89, pp. 104389.

23. Pishchalnik V., Myslenkov S., Latkovskaya E., Arkhipkin V. Assessment of the Hydrochemical Characteristics of the Carbon Observational Site 'Carbon-Sakhalin' (Aniva Bay, Sea of Okhotsk). *Sustainability*, 2024, vol. 16, no. 7, pp. 3031.

24. Pishchal'nik V.M., Arkhipkin V.S., Leonov A.V. Thermohaline analysis of the La Perouse Strait water. *Water Resources*, 2005, vol. 32, no. 1, P. 13-22.

Поступила 13.11.2025; принята в печать 17.03.2026.
Submitted 13.11.2025; accepted for publication 17.03.2026.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-1-140-158>

УДК 556.013

Анализ результатов прогнозирования весеннего половодья 2025 года с помощью модели искусственного интеллекта

**Ю.А. Симонов¹, А.В. Христофоров¹, В.М. Колий¹,
К.А. Ковалев², Е.В. Малыгин², А.А. Осипцов^{2,3}, Н.С. Сотириади²**

¹*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

²*ПАО «Сбербанк», Россия;*

³*Сколковский институт науки и технологий, г. Москва, Россия
simonov@mecom.ru, khristoforov_a@mail.ru, vkoliy@mecom.ru*

В рамках выполнения плана работ по Инциденту 53 «Паводки» произведена верификация прогнозов весеннего половодья 2025 года, полученных с помощью разработанной и используемой в ПАО «Сбербанк» методики на основе модели искусственного интеллекта, которая впервые была использована в данной сфере. Выполнена проверка прогнозов хода уровней воды в течение весеннего половодья 2025 года по методике ПАО «Сбербанк» для расположенных практически по всей территории России 1083 речных створов. Для 88 речных створов выполнена проверка долгосрочных прогнозов максимального уровня воды за период половодья 2025 года по различным методикам. Однако в настоящее время эти прогнозы не в полной мере удовлетворяют функциональным требованиям, которые предъявляют конечные потребители к прогнозной продукции Росгидромета, и уступают прогнозам, выпускаемым Гидрометцентром России. Предложен вариант коррекции прогнозов по методике Гидрометцентра России, позволяющий существенно повысить их точность. Рекомендована методика получения прогнозов в вероятностной форме, основанная на предположении, что ошибки прогнозов в детерминированной форме подчиняются нормальному распределению с постоянной дисперсией.

Ключевые слова: речной створ, уровень воды, гидрограф, половодье, искусственный интеллект, методика, долгосрочный прогноз, форма прогноза, проверка, коррекция

Analysis of the spring flood of 2025 forecasting using an artificial intelligence model

**Yu.A. Simonov¹, A.V. Khristoforov¹, V.M. Koliy¹,
K.A. Kovalev², E.V. Malygin², A.A. Osiptsov^{2,3}, N.S. Sotiriadi²**

¹*Hydrometeorological Research Center
of Russian Federation, Moscow, Russia;*

²*Public Joint-Stock Company Sberbank of Russia;*

³*Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia
simonov@mecom.ru,*

khristoforov_a@mail.ru, vkoliy@mecom.ru

Forecasts for the 2025 spring flood were verified based a methodology developed and used at Sberbank based on an artificial intelligence model. Water level forecasts for the 2025 spring flood were verified using Sberbank's model for 1,083 river gauges located virtually throughout Russia. Long-term maximum water level forecasts for the 2025 flood period were verified for 88 river gauges using various methodologies. However, these forecasts currently do not fully meet the functional requirements of end users for Roshydromet forecast products and are inferior to those issued by the Hydrometeorological Center of Russia. A proposed correction to the forecasts based on Hydrometcentre of Russia methodology significantly improves their reliability. A methodology for generating probabilistic forecasts is recommended, based on the assumption that deterministic forecast errors flow the normal distribution with constant variance.

Keywords: flood forecasts, artificial intelligence, hydrological model, river gauge, water level, hydrograph, long-term forecast, verification, correction

Введение

Эффективность мероприятий по защите населения и хозяйственных объектов от наводнений в значительной степени зависит от заблаговременности и точности прогнозов речного стока, и прежде всего прогнозов повышения и снижения уровней воды в реках в период половодья [4, 10–12, 18].

Современная гидрология располагает достаточно большим и постоянно увеличивающимся арсеналом средств получения таких прогнозов. Стали доступны более надежные и детальные метеорологические прогнозы, данные дистанционного зондирования наземными, авиационными и космическими средствами, данные учащенных наблюдений на гидрологических постах и площадные оценки метеорологических элементов. Совершенствуется программное обеспечение разработки и представления прогнозов с использованием геоинформационных и интернет-технологий. Одновременно с ростом информационной базы и развитием технических возможностей происходит разработка и внедрение новых математических моделей, дающих более детальное описание гидрологических процессов и предназначенных для получения не только краткосрочных, но и долгосрочных прогнозов. В последнее время методические основы гидрологического прогнозирования дополняются применением различных методов искусственного интеллекта, постоянно развиваются за счет обмена результатами, что в решающей степени обеспечивается деятельностью Всемирной метеорологической организации [4, 6, 10, 12, 14, 20].

Наиболее эффективными с практической точки зрения считаются прогнозы гидрографа в детерминированной и вероятностной форме, которые могут выпускаться в рамках автоматизированных систем подготовки и выпуска прогнозов и доведения прогностической продукции до всех заинтересованных потребителей для достаточно больших регионов с разнообразными природными условиями [5, 10, 17, 22]. Действующая с 2025 года методика, разработанная в ПАО «Сбербанк», позволяет выпускать

прогнозы гидрографа для различных периодов года, и в частности, для периода весеннего половодья, в течение которого вероятность наводнений на реках России особенно высока [8].

В международной практике активно развивается сотрудничество частных компаний и государственных гидрометеорологических служб по оценке климатических рисков, и в том числе по прогнозу наводнений [14, 15, 23]. Одним из ярких примеров участия частного сектора в разработке методов гидрологического прогнозирования является разработанная и используемая ПАО «Сбербанк» модель, предназначенная для анализа подверженности кредитного портфеля климатическим рискам. Увеличение частоты и тяжести последствий катастрофических климатических явлений вследствие глобального изменения климата представляет физический риск для активов контрагентов банка, что требует учета в кредитном процессе. При этом нарастание интенсивности опасных гидрологических явлений попадает в перечень физических рисков, которые требуют учета. Оценка применимости данной модели в практике оперативных гидрологических прогнозов Гидрометцентра России и Росгидромета дается в настоящей статье. Система методик прогнозирования, основанных на физико-статистических зависимостях и используемых в Гидрометцентре России, здесь и далее для краткости обозначена как Методика 1. Описание данных методик представлено в работах [4, 5, 7].

Методика ПАО «Сбербанк»

Методика прогнозирования гидрографа от ПАО «Сбербанк» здесь и далее обозначена как Методика 2 для краткости изложения. Методика 2 получена с использованием искусственного интеллекта, что отличает её от классических физико-статистических подходов, которые используются в данной области. Методика 2 изначально предназначена для использования во внутренних процессах Банка, таких как оценка кредитного риска клиентов Банка на всей территории Российской Федерации, в этом смысле она по построению имеет несколько иные цели и задачи, чем Методика 1. Вместе с тем представляет интерес задача сравнения двух методик в общей области применимости.

В качестве исходной информации рассматриваемая Методика 2 использует:

- данные ежедневных наблюдений среднесуточного уровня воды на гидрологических постах;
- прогнозы ICON и ERA5-Seasonal хода метеорологических элементов;
- данные ежедневных наблюдений за приземной температурой воздуха и осадками;
- данные о ландшафтной структуре водосборов и их хозяйственной освоенности;
- физико-географические атрибуты HydroATLAS;

– цифровую модель рельефа.

Для прогнозирования уровней воды использована рекуррентная нейронная сеть Handoff-Forecast LSTM с входными данными ERA5-Land или ERA-Seasonal [19]. Для обучения использована метеорологическая и гидрологическая информация за период с 2008 по 2022 год (АИС ГМВО, на момент разработки эти данные были в открытом доступе, на данный момент источник недоступен). После получения уровней воды производилась помесечная корректировка модели в соответствии со средним помесечным расхождением на тестовом периоде.

Долгосрочные метеорологические прогнозы выражаются в виде ансамбля вероятного хода осадков и температуры воздуха в течение периода их заблаговременности. Подстановка этих ансамблей в нейронную сеть Handoff-Forecast LSTM позволяет получать ансамбль вероятного хода уровней воды в течение прогнозируемого периода. Это позволяет получать гидрологические прогнозы в вероятностной форме. Такие прогнозы гидрографа различных периодов 2025 года получены для 1083 оборудованных гидрологическими постами речных створов, расположенных практически по всей территории России (рис. 1).

Приведем подробное описание архитектуры модели в рамках Методики 2. Разработанная методика базируется на модификации архитектуры Long Short-Term Memory (LSTM), реализованной в рамках библиотеки NeuralHydrology. Используется структура Handoff-Forecast LSTM, которая разделяет процесс на два этапа:

- Handoff (Инициализация): Сеть обрабатывает исторические данные (осадки, температура, расход воды) за период $t=1, \dots, T$ handoff для обновления скрытых состояний (h, c). Это формирует внутреннее представление гидрологического состояния водосбора.

- Forecast (Прогноз): Используя финальные состояния этапа Handoff, сеть генерирует прогноз уровней воды на будущий период. На этом этапе модель не получает фактических измерений уровня воды, а опирается на метеорологические прогнозы.

Гиперпараметры. Скрытый слой LSTM-Handoff (256), скрытый слой LSTM-Forecast (128), оптимизатор AdamW, функция потерь RMSE.

Используются следующие *данные и периоды обучения*. Обучение проводилось на выборке из 1389 речных водосборов Российской Федерации, не имеющих пропусков в данных. Целевая переменная: среднесуточные уровни воды (АИС-ГМВО). Периоды: тренировка (01.01.2008 – 31.12.2018); валидация (01.01.2019 – 31.12.2020); тест (01.01.2021 – 31.12.2022).

Учет физико-географических характеристик. Для учета пространственной неоднородности используется вектор статических атрибутов (geo_вес), полученный из глобального набора HydroATLAS и HydroBASINS. Включает: морфологию (лес, пашня, урбанизация), гидрологию (озерность, болота), морфометрию (площадь, высота, уклоны), геологию (типы почв, карст).

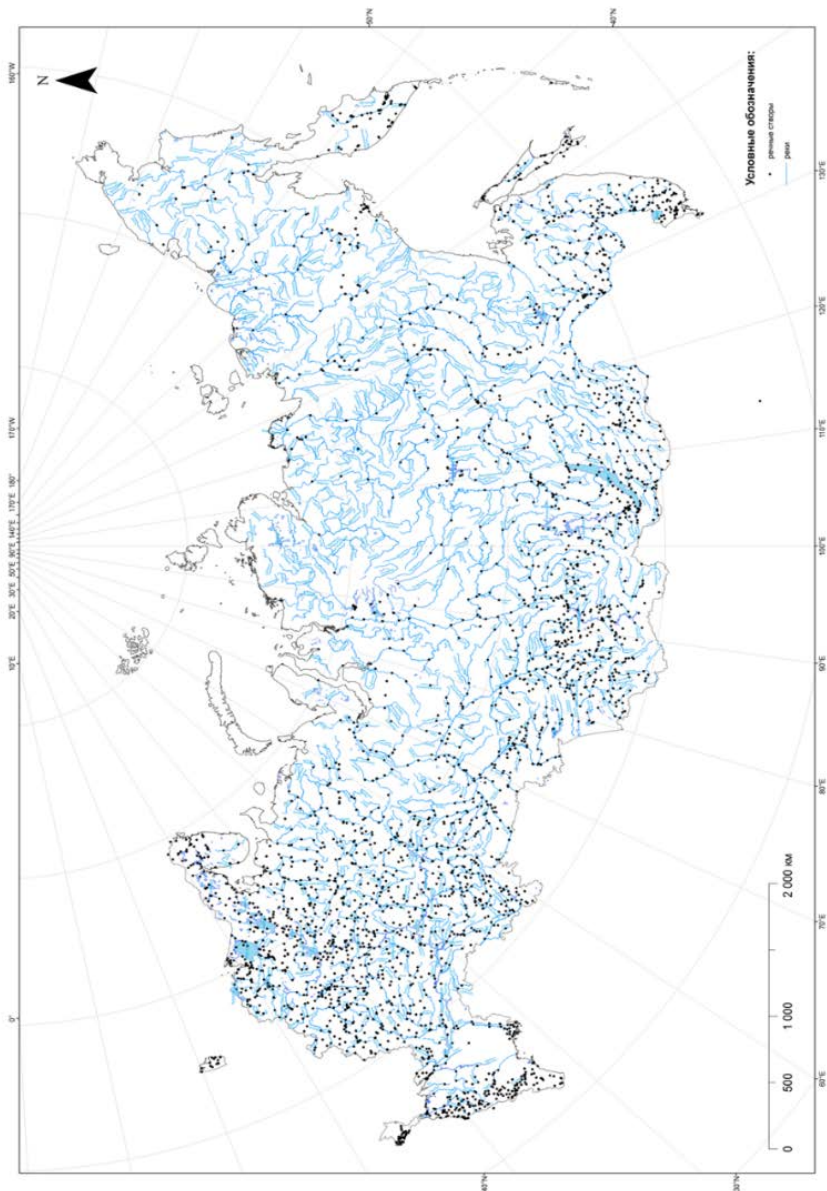


Рис. 1. Расположение прогнозируемых речных створов.
Fig. 1. Location of forecast river gauges.

Метеорологические данные и реанализ. Для обучения используется реанализ ERA5-Land ($0.1 \times 0.1^\circ$) – суточные осадки, min/max температуры. Привязка к водосборам осуществляется методом взвешенной пространственной агрегации. Для прогноза (инференс) используется комбинация источников: краткосрочный прогноз (модель ICON, 0.1°) и долгосрочный прогноз до 30 дней (ERA-Seasonal, 1.0°).

Верификация и оценка качества проводилась на тестовом периоде (2021–2022 гг.) для 2803 гидропостов. Характеристики точности прогноза (10 дней, ERA5-Land): медианное RMSE = 29.3 см, коэффициент корреляции $r = 0.82$. Для оценки точности зон затопления использовался алгоритм HAND. Критерий совпадения: ошибка уровня $\leq \pm 50$ см, ROC-AUC: 0.74, Recall: 0.87.

Описание архитектуры системы. Библиотека NeuralHydrology выступает в качестве вычислительного ядра, вокруг которого развернута промышленная инфраструктура оценки рисков (End-to-End Pipeline). Процесс обработки данных разделен на 4 функциональных слоя.

Слой данных отвечает за сбор и подготовку исторической базы для обучения. Агрегация источников: автоматический сбор данных из АИС-ГМВО (гидрология), ERA5-Land/Seasonal (метеорология) и MERIT Hydro/HydroATLAS (география). ETL-процессы включают расчет контуров водосборов (библиотека rpysheds) и поддержку «виртуальных постов», пространственную агрегацию метеоданных на сетку водосборов и формирование векторов статических признаков.

Слой прогноза и хранения. Оперативный контур для регулярного прогнозирования. Инференс: запуск скрипта `short_forecast_run.py`, реализующего цепочку `Handoff` → `Forecast`. Входные потоки: ансамбль данных (ERA5-Land для контекста, ICON/Seasonal для будущего). Преобразование прогноза уровня (1D) в карту затопления (2D) с использованием метода HAND (Height Above Nearest Drainage). Сохранение результатов в витрину данных.

Аналитический слой. Преобразование прогнозов в оценки рисков. Вероятностное моделирование: расчет вероятности затопления для каждой ячейки раstra (использование распределения Гумбеля). Бизнес-логика: пересечение зон затопления с геопозициями активов Банка. Оценка ущерба: расчет потенциальных финансовых рисков и формирование сигналов для оповещения.

Слой визуализации. Интерфейс конечного пользователя. Дашборд: отображение данных из витрины. Функционал: графики хода уровней, интерактивные тепловые карты глубин и вероятностей затопления, алерты.

Начиная с некоторой даты, методика дает прогнозы уровня воды в заданном речном створе. Прогнозы выпускаются на сутки вперед, на двое суток вперед и так далее в течение достаточно продолжительного периода (это ансамблевый прогноз на основе предварительно обученной нейросетевой модели; период заблаговременности определяется либо доступным

оперативным прогнозом погоды, либо сезонными прогнозами. В нашем случае использована комбинация прогноза погоды на 14 дней и прогноза климатических параметров сезонного ансамблевого прогноза от ECMWF до 7 месяцев). Таким образом, в течение первых пяти суток прогнозы относятся к категории краткосрочных, в течение последующих десяти суток прогнозы относятся к категории среднесрочных, но подавляющая часть прогнозов имеет заблаговременность более 10 суток, и следовательно, в основном выпускаемые прогнозы относятся к категории долгосрочных [1, 4].

Анализировались результаты прогнозирования гидрографа в течение периода с 03.02.2025 по 31.05.2025. Выбор этого варианта Методики 2 обусловлен тем, что, за исключением случаев экстремального подъема уровня воды при ледовых заторах, именно в течение этого периода на реках России проходит пик половодья. С учетом аномально теплой весны 2025 года активные весенние процессы на реках ЕТР и юга Западной Сибири начали развиваться во второй половине февраля и в первой декаде марта, в связи с этим было использован выпуск прогноза от 3 февраля 2025 года.

Для указанного периода вероятностная форма выпуска прогноза гидрографа определяется рассчитанными квантилями $H(25\%)$, $H(50\%)$ и $H(75\%)$, меньше которых ожидаемое значение уровня воды должно оказаться с вероятностями 25 %, 50 % и 75 % соответственно.

Проверка методики

Получаемые с помощью проверяемой методики прогнозы сравнивались с фактическими значениями уровня воды H см, наблюдавшимися в рассматриваемом речном створе в течение всего прогнозируемого периода. Вероятностная форма выпуска прогноза определяет специфику такой проверки.

По всему ряду проверочных прогнозов рассчитывались частоты P_1^* , P_2^* и P_3^* случаев, когда фактические уровни воды H оказывались меньше прогнозируемых значений $H(25\%)$, $H(50\%)$ и $H(75\%)$. Качество прогнозов определяется близостью этих частот к заданным вероятностям $P_1 = 0,25$, $P_2 = 0,50$ и $P_3 = 0,75$.

Согласно теореме Муавра – Лапласа, при достаточно большом числе проверочных прогнозов $n = 118$ и существенно отличающихся от 0 и 1 вероятностях $P_1 = 0,25$, $P_2 = 0,50$, $P_3 = 0,75$ распределение вероятностей частот P_1^* , P_2^* и P_3^* практически не отличается от нормального [2].

При уровне значимости (вероятности ошибки критерия) α стандартного статистического критерия разница между частотой P_i^* и заданной вероятностью P_i при $i = 1, 2, 3$ не выходит за пределы случайных ошибок определения частоты, обусловленных ограниченностью ряда проверочных прогнозов, если выполняется неравенство:

$$\frac{|P_i^* - P_i| \sqrt{n}}{\sqrt{P_i(1-P_i)}} < t\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad (1)$$

где $t\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ – квантиль нормального распределения, равный 2,576 при $\alpha = 1\%$ [2].

В табл. 1 приведено относительное число створов (в долях от 1083), для которых неравенство (1) выполняется для каждой из частот P_1^* , P_2^* и P_3^* при уровне значимости $\alpha = 1\%$. Там же в столбце «Все» приведено относительное число створов, для которых неравенство (1) выполняется для всех трех частот, то есть вероятностный прогноз оказался удовлетворительным.

Таблица 1. Относительное число створов, для которых выполняется неравенство (1)

Table 1. Relative number of gauges for which inequality (1) is satisfied

α	$P^*(25\%)$	$P^*(50\%)$	$P^*(75\%)$	Все
1 %	19 %	20 %	17 %	1 %

Из 1083 речных створов методика дала удовлетворительные результаты для всех трех квантилей для 11 створов, то есть в 1% случаев.

Оценить соответствие всех трех частот P_1^* , P_2^* и P_3^* заданным вероятностям $P_1 = 0,25$, $P_2 = 0,50$, $P_3 = 0,75$ позволяет другой критерий. При уровне значимости α стандартного статистического критерия разница между всеми частотами P_i^* и заданными вероятностями P_i при $i = 1, 2, 3$ не выходит за пределы случайных ошибок определения этих частот, если выполняется неравенство:

$$n \sum_{i=1}^3 \frac{(P_i^* - P_i)^2}{P_i(1-P_i)} < \chi_3^2(\alpha), \quad (2)$$

где $\chi_3^2(\alpha)$ – квантиль распределения «хи – квадрат» с тремя степенями свободы, равный 11,345 при $\alpha = 1\%$ [2].

Из 1083 речных створов неравенство (2) выполняется всего для 12 створов, то есть в 1,1% случаев.

Таким образом, для подавляющего числа прогнозируемых створов (99%) Методика 2 в первоначальной редакции не позволит использовать ее для потребителей прогнозной продукции Росгидромета. Поэтому было принято решение Методике 2 скорректировать, чтобы убрать систематическую погрешность, о чем будет рассказано подробно далее.

Прогноз максимальных уровней воды за период половодья

Наибольший практический интерес представляет качество прогнозирования максимальных уровней воды за период половодья. Для половодья 2025 года фактическое значение максимального уровня воды сравнивалось с тремя вариантами прогноза в детерминированной форме:

- 1) максимальное за период половодья значение квантиля $H(50\%)$, прогнозируемого по Методике 2;
- 2) долгосрочный прогноз максимального уровня воды за период половодья, ежегодно выпускаемый по Методике 1.

Сравнение выполнялось для всех 88 речных створов, для которых такие прогнозы были выпущены по Методикам 1 и 2. Разумеется, сравнение фактического значения максимального уровня воды с вариантами его прогноза всего за один год не позволяет оценить точность прогнозирования для каждого конкретного речного створа. Однако наличие таких результатов для 88 речных створов позволяет получить представление о возможностях каждой из сравниваемых методик в целом.

Сравнение абсолютных ошибок прогноза максимального уровня воды за период половодья 2025 года для 88 речных створов, расположенных практически по всей территории России, показало, что по сравнению с Методикой 2 выпускаемые по Методике 1 прогнозы в целом оказались точнее в 2,2 раза. Абсолютные значения ошибок прогноза по Методике 1 оказались меньше ошибок прогноза по Методике 2 для 64 речных створов (73 %).

Для исходных нескорректированных прогнозов по Методике 2 характерна значительная систематическая ошибка прогнозов – среднее значение разности $H - H(50\%)$ составляет 64 см, то есть проверяемые прогнозы в основном занижают уровни воды периода половодья. Другая причина, связанная с существенным уменьшением диапазона вероятных значений прогнозируемой величины, рассмотрена в разделе, посвященном получению вероятностной формы выпуска прогноза.

Выводы, полученные по результатам проверки прогнозов по Методике 2, наглядно иллюстрируются рис. 2, 3 и 4. На этих рисунках для половодья 2025 года на реках Кама и Ишим представлены совмещенные графики хода фактических уровней воды H (факт) и прогнозируемых значений $H(25\%)$, $H(50\%)$ и $H(75\%)$ см. Оба рисунка демонстрируют занижение уровней воды и сужение диапазона их вероятных значений.

При этом стоит отметить, что результат моделирования уровня воды на части гидростовов улучшается при обновлении прогноза климатических параметров, используемых моделью. Так, прогноз, рассчитанный от 8 марта 2025 года, дает намного более точное предсказание относительно исходного расчета (рис. 4). Это говорит о значительном влиянии климатических параметров на качество модели.

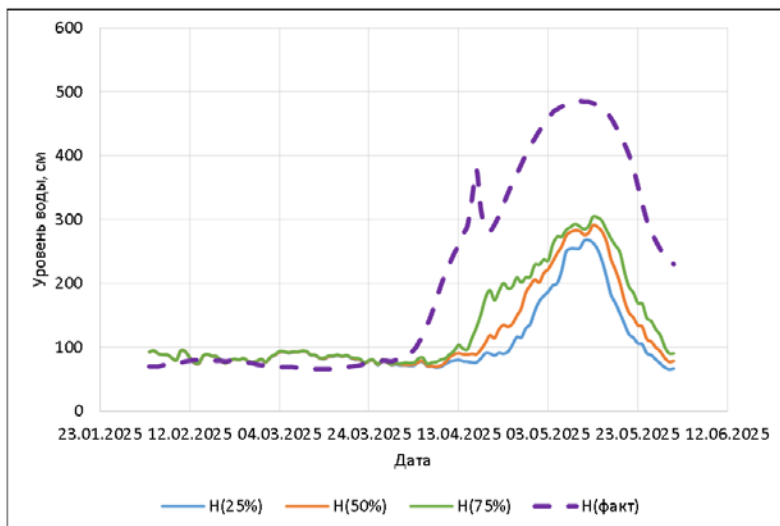


Рис. 2. Совмещенные графики хода фактических уровней воды H (факт) и прогнозируемых значений $H(25\%)$, $H(50\%)$ и $H(75\%)$ в течение половодья 2025 года на реке Кама.

Fig. 2. Combined graphs of the observed water levels H (observed) and predicted values $H(25\%)$, $H(50\%)$ and $H(75\%)$ during the 2025 flood on the Kama River.

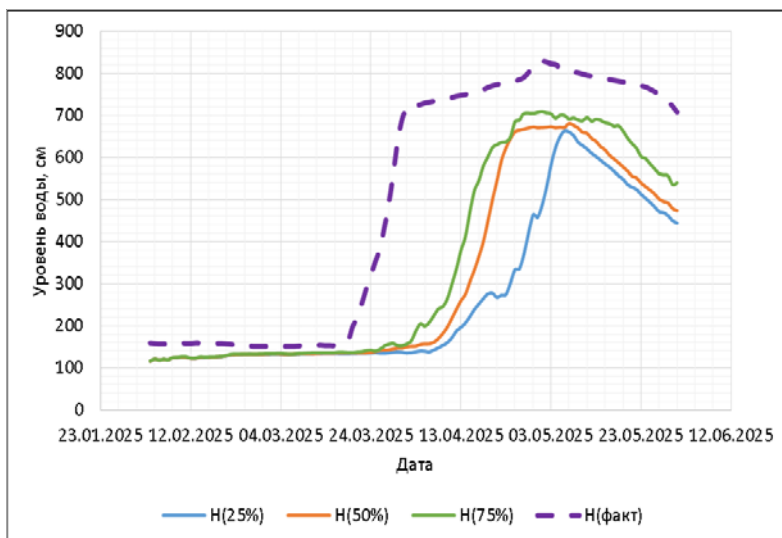


Рис. 3. Совмещенные графики хода фактических уровней воды H (факт) и прогнозируемых значений $H(25\%)$, $H(50\%)$ и $H(75\%)$ в течение половодья 2025 года на реке Ишим.

Fig. 3. Combined graphs of the observed water levels H (observed) and predicted values $H(25\%)$, $H(50\%)$ and $H(75\%)$ during the 2025 flood on the Ishim River.

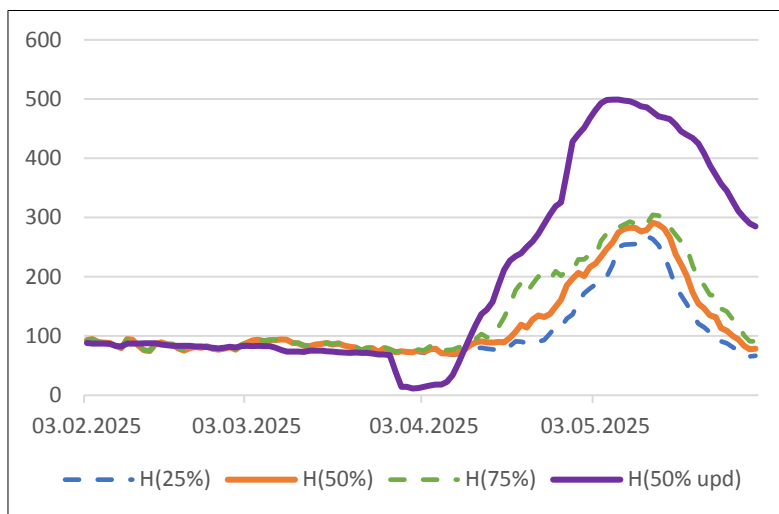


Рис. 4. Совмещенные графики прогнозируемых значений от 8 марта $H(50\% \text{ upd})$ и исходного прогноза от начала февраля $H(25\%)$, $H(50\%)$ и $H(75\%)$ в течение половодья 2025 года на реке Кама.

Fig. 4. Combined graphs of the observed water levels H (observed) and predicted values $H(25\%)$, $H(50\%)$ and $H(75\%)$ during the 2025 flood on the Kama River.

Коррекция прогнозов

Для многих речных створов имеет место достаточно высокая корреляция между фактическими уровнями воды H и прогнозируемыми по Методике 2 квантилями, что позволяет ввести процедуру корректировки. В частности, для 457 прогнозируемых створов (42 %) коэффициент корреляции между фактическим уровнем воды H и прогнозом $H(50\%)$ превышает значение 0,60. Это позволяет воспользоваться методом коррекции прогнозов, предложенным в работе [3].

Рекомендуемый метод коррекции уже достаточно широко применяется в практике гидрологического прогнозирования и в большинстве случаев позволяет существенно повысить точность прогнозов речного стока, выпускаемых в детерминированной форме [3, 4].

Так как коэффициент корреляции между прогнозами $H(25\%)$, $H(50\%)$ и $H(75\%)$ близок к единице, в качестве исходной можно было использовать любую из этих характеристик, однако представляется наиболее удобным корректировать прогноз $H(50\%)$, наиболее близкий к среднему значению ожидаемых уровней воды.

В качестве предварительной подготовки на основе ряда фактических значений уровня воды H и соответствующих им прогнозов $H(50\%)$ необходимо получить стандартные статистические оценки:

– математического ожидания $M(H)$ и стандартного отклонения $S(H)$ фактических значений уровня воды H ;

– аналогичных характеристик $M[H(50\%)]$ и $S[H(50\%)]$ значений прогноза $H(50\%)$;

– коэффициента корреляции R между величинами H и $H(50\%)$.

Параметры коррекции определяются формулами:

$$a = R \frac{S(H)}{S[H(50\%)]}, \quad (3)$$

$$b = M(H) - aM[H(50\%)]. \quad (4)$$

В качестве прогноза уровня воды в детерминированной форме следует использовать скорректированное значение прогноза $H(50\%)$:

$$\tilde{H}(50\%) = aH(50\%) + b. \quad (5)$$

Скорректированный по формуле (5) прогноз $\tilde{H}(50\%)$ имеет такое же среднее значение $M(H)$, что и прогнозируемая величина, то есть данный метод коррекции позволяет устранить возможную систематическую ошибку прогноза.

Среднеквадратическая погрешность такого прогноза равна

$$S_{\text{пп}} = S(H)\sqrt{1-R^2}. \quad (6)$$

Если использовать в качестве детерминированной формы прогноза по Методике 2 величину $H(50\%)$, то среднеквадратическая погрешность такого прогноза больше определяемой формулой (6) среднеквадратической погрешности скорректированного прогноза $S_{\text{пп}}$ в среднем по всем 1083 речным створам в 3,4 раза. Таким образом, предлагаемая коррекция дает очень большой эффект.

Согласно Наставлению по службе прогнозов [7], выпускаемый в детерминированной форме такой скорректированный прогноз относится к категории хороших при условии $S_{\text{пп}} / S(H) \leq 0,50$ и к категории удовлетворительных при условии $0,50 < S_{\text{пп}} / S(H) \leq 0,80$.

Из 1083 рассматриваемых речных створов прогнозы уровня воды по формуле (5) относятся к категории хороших для 120 створов (11 %) и к категории удовлетворительных для 337 створов (31 %). Таким образом, скорректированный вариант Методики 2 позволяет получать хорошие и удовлетворительные прогнозы гидрографа половодья для 457 речных створов (42 %).

В конце каждого половодья рекомендуется пересчитывать параметры коррекции a и b по формулам (3) и (4) с учетом всех данных об уже выпущенных прогнозах $H(50\%)$ и соответствующих фактических значениях уровня воды H . В течение следующего половодья эти параметры должны использоваться в формуле (5) для получения прогноза $\tilde{H}(50\%)$. Описанная процедура должна ежегодно повторяться. Таким образом, следует получать периодически корректируемый долгосрочный прогноз уровней воды в детерминированной форме.

Получение вероятностной формы выпуска прогноза

Анализ результатов прогнозирования уровней воды по Методике 2 показал, что частота P_1^* , как правило, превышает 25 %. Ее среднее для всех 1083 створов значение равно 41,2 %. Частота P_3^* , как правило, меньше 75 %. Ее среднее для всех 1083 створов значение равно 51,9 %. Это указывает на то, что прогнозы по Методике 2 систематически занижают диапазон вероятных значений уровня воды.

Отмеченная закономерность обусловлена тем, что в данной методике используется ансамблевый подход, который в последние годы получил большое распространение в зарубежной и отечественной практике прогнозов речного стока [6, 9, 13, 14, 22]. Главный недостаток этого подхода состоит в том, что при получении прогнозов речного стока в вероятностной форме учитывается не вся неопределенность возможных значений прогнозируемой величины, а только та ее часть, которая обусловлена неопределенностью хода метеорологических характеристик в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза. При этом не учитывается вклад в погрешность прогноза неизбежных случайных ошибок определения используемых гидрометеорологических характеристик, ошибок определения самой прогнозируемой величины, недостаточной адекватности и полноты описания процессов формирования речного стока в используемой методике и ограниченности данных наблюдений, используемых для ее построения [1, 4, 9].

В работе [9] приведены примеры, когда использование ансамблевого подхода сужает доверительные интервалы для вероятных значений прогнозируемой величины на 40 % и даже на 80 %, что является недопустимым с точки зрения потребителей прогностической продукции, которые стремятся учесть наиболее неблагоприятные и опасные проявления водного режима рек.

В тех случаях, когда ансамблевый подход слишком сильно занижает возможный диапазон ожидаемых значений уровня воды, для получения вероятностной формы выпуска прогноза рекомендуется подход, основанный на статистическом анализе ошибок проверочных прогнозов. Правила реализации такого подхода подробно изложены в работах [1, 9].

Для долгосрочных прогнозов уровней воды на многочисленных примерах проверен и рекомендуется вариант, в котором предполагается нормальное распределение вероятностей ошибок прогнозирования с постоянным стандартным отклонением $S_{\text{пр}}$ [1].

Если скорректированное с помощью формул (3), (4) и (5) значение $\tilde{H}(50\%)$ использовать в качестве детерминированной формы выпуска долгосрочного прогноза уровней воды, то вероятностная форма выпуска прогноза определяется квантилем $\tilde{H}(P_0)$, меньше которого ожидаемое значение уровня воды должно оказаться с заданной вероятностью P_0 .

При нормальном распределении вероятностей ошибок прогноза $H - \tilde{H}(50\%)$ эти значения определяются формулой:

$$\tilde{H}(P_0) = \tilde{H}(50\%) + t(P_0)S_{\text{ГП}}, \quad (7)$$

где $S_{\text{ГП}}$ – среднеквадратическая погрешность скорректированного прогноза, определяемая формулой (6). При различных вероятностях P_0 значения $t(P_0)$ приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения $t(P_0)$ при различных вероятностях P_0

Table 2. Values $t(P_0)$ for different probabilities P_0

P_0	5 %	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %
$t(P_0)$	-1,6448	-1,2816	-0,6745	0	0,6745	1,2816	1,6448

В качестве примера для 12 речных створов, расположенных в различных регионах России, в табл. 3 приведены характеристики прогнозов уровней воды в период весеннего половодья, полученных по Методике 2 и по ее скорректированному варианту.

Таблица 3. Характеристики прогнозов уровней воды

Table 3. Characteristics of water level forecasts

Река	P_1^*	P_2^*	P_3^*	$S_{\text{ГП}}/S(H)$	\tilde{P}_1^*	\tilde{P}_2^*	\tilde{P}_3^*
Печора	9%	10%	13%	0,53	19%	55%	72%
Ока	62%	62%	66%	0,79	31%	53%	80%
Сылва	51%	52%	55%	0,56	35%	53%	76%
Малка	100%	100%	100%	0,93	31%	47%	72%
Обь	14%	17%	25%	0,46	18%	56%	75%
Енисей	62%	67%	69%	0,75	33%	60%	92%
Лена	15%	16%	18%	0,59	26%	59%	78%
Амур	90%	91%	96%	0,44	30%	56%	81%
Зея	0%	0%	0%	0,99	23%	61%	88%
Ишим	0%	0%	0%	0,99	13%	28%	86%
Урал	29%	30%	31%	0,63	29%	58%	80%
Дон	0%	0%	0%	0,48	26%	59%	74%

Частоты P_1^* , P_2^* и P_3^* случаев, когда фактические уровни воды H см оказывались меньше прогнозируемых по Методике 2 квантилей $H(25\%)$,

$H(50\%)$ и $H(75\%)$, достаточно сильно отличаются от заданных вероятностей 25 %, 50 % и 75 %. Даже при уровне значимости $\alpha = 1\%$ неравенство (1) одновременно для всех трех частот и неравенство (2) не выполняются ни для одного из рассматриваемых речных створов.

Как уже было отмечено, скорректированное по формуле (5) значение $\tilde{H}(50\%)$ может использоваться в качестве долгосрочного прогноза уровня воды в детерминированной форме. Приведенные в табл. 3 показатели качества таких прогнозов $S_{\text{пр}}/S(H)$ свидетельствуют о том, что для трех речных створов скорректированные прогнозы дают хорошие результаты с соотношением $S_{\text{пр}}/S(H) \leq 0,50$. Для шести створов скорректированные прогнозы дают удовлетворительные результаты с соотношением $0,50 < S_{\text{пр}}/S(H) \leq 0,80$.

Таким образом, для 9 речных створов с выделенными жирным шрифтом значениями $S_{\text{пр}}/S(H)$ получена вполне рабочая схема долгосрочного прогнозирования ежедневного хода уровней воды в период половодья.

Вероятностная форма скорректированного прогноза определяется квантилями $\tilde{H}(25\%)$, $\tilde{H}(50\%)$ и $\tilde{H}(75\%)$, рассчитанными по формуле (7).

Приведенные в табл. 3 частоты \tilde{P}_1^* , \tilde{P}_2^* и \tilde{P}_3^* случаев, когда фактические уровни воды оказывались меньше этих прогнозируемых квантилей, оказались достаточно близкими к заданным вероятностям 25 %, 50 % и 75 %. При уровне значимости $\alpha = 1\%$ неравенство (1) выполняется для всех трех частот одновременно для большинства рассматриваемых речных створов. Исключение составляют створы на реках Енисей, Зея и Ишим.

Их всех 1083 прогнозируемых речных створов для 474 створов (44 %) при уровне значимости $\alpha = 1\%$ неравенство (1) выполняется для всех трех частот \tilde{P}_1^* , \tilde{P}_2^* и \tilde{P}_3^* одновременно. Неравенство (2) выполняется для 498 створов (46 %). При этом удовлетворительные результаты проверки этих частот дали положительные результаты практически для всех створов с удовлетворительными скорректированными прогнозами в детерминированной форме. Следовательно, для значительной части рассмотренных речных створов предлагаемая схема получения прогнозов уровней воды в вероятностной форме выглядит вполне удовлетворительно.

Таким образом, наиболее точными оказались прогнозы максимального уровня воды за период половодья 2025 года, выпускаемые по Методике 1. Менее точными оказались первоначальные прогнозы по нескорректированной Методике 2. По своей точности предлагаемый скорректированный вариант Методики 2 занимает промежуточное положение. С точки зрения широты выборки данных, на которых обучена и откалибрована модель, то Методика 2 базируется на данных по 2803 гидропостам, тогда как Методика 1 охватывает 88 гидропостов. Обе Методики для выполнения расчетов для одного гидропоста требуют считанные секунды машинного времени и с точки зрения вычислительной эффективности являются сравнимыми.

Заключение

Рассмотрена используемая в ПАО «Сбербанк» методика прогноза наводнений (Методика 2), которая впервые в данной области разработана на основе методов искусственного интеллекта. Выполнена проверка прогнозов суточного хода уровней воды, полученных по данной Методике 2, в течение половодья 2025 года для расположенных практически по всей территории России 1083 речных створов. Проверка показала, что частоты случаев, когда фактические уровни вод оказываются меньше прогнозируемых для каждых суток квантилей $H(25\%)$, $H(50\%)$ и $H(75\%)$, значительно отличаются от заданных вероятностей 25 %, 50 % и 75 %.

Проведено сравнение с физико-статистической методикой прогнозирования речного стока, которая разработана и используется в ФГБУ «Гидрометцентр России» (Методика 1). Выполненное для расположенных в различных регионах страны 88 речных створов сравнение ошибок прогноза максимального уровня воды за период половодья 2025 года показало, что наиболее точными оказались прогнозы, выпускаемые по Методике 1.

Причинами выявленных недостатков Методики 2 являются значительные систематические ошибки прогнозирования и использование ансамблевого подхода, который может существенно снижать диапазон вероятных значений прогнозируемой величины.

Достаточно высокая корреляция между фактическими уровнями воды и прогнозируемыми квантилями для большинства рассматриваемых речных створов позволила использовать хорошо себя зарекомендовавший и достаточно простой метод коррекции прогнозируемых квантилей $H(50\%)$. Скорректированные значения $\tilde{H}(50\%)$ могут использоваться в качестве детерминированной формы прогноза ежесуточных уровней воды в период половодья. Предлагаемая коррекция прогнозов повышает их точность в 3,4 раза и позволяет получать хорошие и удовлетворительные прогнозы гидрографа половодья для 457 речных створов.

Предположение о нормальном распределении вероятностей ошибок такого прогноза позволило предложить достаточно простую методику получения прогнозов уровня воды в вероятностной форме. Близость получаемых по этой методике частот \tilde{P}_1^* , \tilde{P}_2^* и \tilde{P}_3^* к заданным вероятностям 25 %, 50 % и 75 % для многих речных створов свидетельствует о правомочности используемого предположения и об удовлетворительном качестве предлагаемой методики получения прогнозов в вероятностной форме.

Предлагаемая коррекция прогнозов по Методике 2 повышает их точность. В связи с этим данную коррекцию можно рассматривать в качестве первого, но достаточно важного шага на пути к совершенствованию Методики 2. К другим возможным шагам по совершенствованию Методики 2 можно отнести расширение используемых гидрометеорологических баз данных для выполнения оптимизации гидрологических моделей и обучения модели искусственного интеллекта, учет динамики снежного покрова

и промерзания почв, использование актуальных зависимостей «расход – уровень» воды, а также использование детальных цифровых моделей рельефа для повышения точности расчета зон затоплений.

Список литературы

1. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 355. 198 с.
2. Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Статистический анализ в гидрологических прогнозах. М.: Гидрометцентр России, 2018. 160 с.
3. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Методы коррекции прогнозов речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 162-175.
4. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. М.: Гидрометцентр России, 2023. 200 с.
5. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Выбор методов прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 1 (391). С. 71-117.
6. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Ансамблевые долгосрочные прогнозы весеннего половодья с помощью физико-математических моделей формирования стока // Метеорология и гидрология. 2007. № 2. С. 76–88.
7. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 193 с.
8. Наука в Сбере 2023: информационный сборник / Под общ. ред. А. Р. Ефимова. М.: Сбер, 2023. 92 с.
9. Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Вероятностная форма выпуска прогнозов речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. № 2 (396). С. 141-158.
10. Симонов Ю.А. Оперативная гидрология в деятельности Всемирной метеорологической организации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. № 2 (396). С. 121-140.
11. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting – A Global Perspective. Academic Press, 2016. 480 p.
12. Assessment Guidelines for End-to-End Flood Forecasting and Early Warning Systems // WMO-No. 1293. 2022. 61 p.
13. Buizza R., Hollingsworth A., Lalaurette F., Ghelli A. Probabilistic Predictions of Precipitation Using the ECMWF Ensemble Prediction System // Weather and Forecasting. 1999. Vol. 14. P. 168-189.
14. Establishing a Flood-Proof District in Bilbao, Spain. -Public-Private Partnerships to adapt to floods of a Former Industrial Peninsula. Published 25 Apr 2025. Modified 25 Apr 2025. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/mission/solutions/mission-stories/flood-proof-district-in-bilbao-story44>
15. EU-US Insurance Dialogue Project. Climate Risk and Resilience Workstream. June 2023 Summary Report. <https://home.treasury.gov/system/files/311/government-affairs-eu-us-insurance-dialogue-project-ws2-climate-risk-and-resilience-summary-report-june-2023.pdf>
16. Gelfan A., Moreydo V., Motovilov Y., Solomatine D. Long-term ensemble forecast of snowmelt inflow into the Cheboksary Reservoir under two different weather scenarios // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2018. Vol. 22. P. 2073-2089.
17. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004. 1024 p.
18. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168. 2009. 302 p.
19. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabate, J., ... & Thépaut J.N. The ERA5 global reanalysis // Quarterly journal of the royal meteorological society. 2020. Vol. 146 (730). P. 1999-2049.
20. Manual on Flood Forecasting and Warning // WMO-No 1072. 2011. 138 p.

21. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., ... & Thépaut J.N. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // Earth system science data. 2021. Vol. 13(9). P. 4349-4383.

22. Pappenberger F., Pagano T.C., Gelfan A., Kuchment L. et al. Hydrological ensemble prediction systems around the Globe // Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting. Berlin: Springer Heidelberg, 2016. P. 1.35.

23. Sally Priest Shared roles and responsibilities in flood risk management // Journal of Flood Risk Management. March 2019. Vol. 12, is. 1. DOI: 10.1111/jfr3.12528

References

1. Borsch S.V., Khristoforov A.V. Hydrologic flow forecast verification. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 355, 198 p. [in Russ.].

2. Borsch S.V., Khristoforov A.V., Yumina N.M. Statisticheskij analiz v gidrologicheskikh prognozakh [Statistical Analysis in Hydrologic Forecasts]. Moscow: Gidrometcentr Rossii Publ., 2018, 160 p. [in Russ.].

3. Borsch S.V., Simonov Y.A., Khristoforov A.V. Metody korrekcii prognozov rechnogo stoka [Methods for the streamflow forecast correction] *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, vol. 375, no. 1, pp. 162-175. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-162-175> [in Russ.].

4. Borshch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Prognozirovaniye stoka rek Rossii [Streamflow forecasting in Russia]. Moscow, Hydrometcenter of Russia Publ., 2023, 200 p. [in Russ.].

5. Borshch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Vybory metodov prognozirovaniya rechnogo stoka [Selection of methods for streamflow forecasting] *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2024, vol. 391, no. 1, pp. 71-117. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-1-71-117> [in Russ.].

6. Kuchment L.S., Gel'fan A.N. Long-Term Ensemble Forecast of Snowmelt Runoff with the Help of the Physics-Based Models of Runoff Generation. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 32, no. 2, pp. 126-134.

7. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Part 1. Prognozy rezhima vod sushi. Lenin-grad, Gidrometeoizdat Publ., 1962, 193 p. [in Russ.].

8. Nauka v Sbere 2023: informacionnyj sbornik / Pod obshh. red. A. R. Efimova. Moscow: Sber Publ., 2023. 92 p. [in Russ.].

9. Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Veroyatnostnaya forma vypuska prognozov rechnogo stoka [A probabilistic form of streamflow forecasts]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2025, vol. 396, no. 2, pp. 141-158. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-141-158> [in Russ.].

10. Simonov Yu.A. Operativnaya gidrologiya v dejatel'nosti Vsemirnoj meteorologicheskoy organizacii [Activities of the World Meteorological Organization in the field of operational hydrology]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2025, vol. 396, no. 2, pp. 121-140. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-121-140> [in Russ.].

11. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting – A Global Perspective. Academic Press, 2016. 480 p.

12. Assessment Guidelines for End-to-End Flood Forecasting and Early Warning Systems. *WMO-No. 1293*, 2022, 61 p.

13. Buizza R., Hollingsworth A., Lalaurette F., Ghelli A. Probabilistic Predictions of Precipitation Using the ECMWF Ensemble Prediction System. *Weather and Forecasting*, 1999, vol. 14, pp. 168-189.

14. Establishing a Flood-Proof District in Bilbao, Spain. -Public-Private Partnerships to adapt to floods of a Former Industrial Peninsula. Published 25 Apr 2025. Modified 25 Apr 2025. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/mission/solutions/mission-stories/flood-proof-district-in-bilbao-story44>

15. EU-US Insurance Dialogue Project. Climate Risk and Resilience Workstream. June 2023 Summary Report. <https://home.treasury.gov/system/files/311/government-affairs-eu-us-insurance-dialogue-project-ws2-climate-risk-and-resilience-summary-report-june-2023.pdf>
16. Gelfan A., Moreydo V., Motovilov Y., Solomatine D. Long-term ensemble forecast of snowmelt inflow into the Cheboksary Reservoir under two different weather scenarios. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2018, vol. 22, pp. 2073-2089.
17. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004, 1024 p.
18. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. WMO-No. 168, 2009, 302 p.
19. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabate, J., ... & Thépaut J.N. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 2020, vol. 146 (730), pp. 1999-2049.
20. Manual on Flood Forecasting and Warning. WMO-No 1072, 2011, 138 p.
21. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., ... & Thépaut J.N. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth system science data*, 2021, vol. 13(9), pp. 4349-4383.
22. Pappenberger F., Pagano T.C., Gelfan A., Kuchment L. et al. Hydrological ensemble prediction systems around the Globe. *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*. Berlin: Springer Heidelberg, 2016, pp. 1.35.
23. Sally Priest Shared roles and responsibilities in flood risk management. *Journal of Flood Risk Management*, March 2019, vol. 12, is. 1. DOI: 10.1111/jfr3.12528

Поступила 06.11.2025; принята в печать 17.03.2026.
Submitted 06.11.2025; accepted for publication 17.03.2026.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-1-159-170>

УДК 556.013

Адаптация модели формирования стока для некоторых рек юга Европейской территории России

Н.К. Семенова^{1,2}, Ю.А. Симонов^{1,2}, М.В. Шатохин¹

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*²Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука
Российской академии наук, г. Москва, Россия
simonov@mecom.ru*

С целью выполнения оценки водности рек юга Европейской территории России в последующие 5 лет, предложена к использованию усовершенствованная модель формирования стока и сверхдолгосрочный прогноз метеорологических характеристик модели INM-CM5 с заблаговременностью 1–5 лет для некоторых речных бассейнов Дона, Кубани и Кумы. Данные речные бассейны отличаются высокой нагрузкой на водохозяйственный комплекс, что определяет их чувствительность как к межгодовой, так и внутригодовой изменчивости речного стока и его основных характеристик. С целью уточнения моделирования стока с помощью гидрологической модели, выполнено усовершенствование гидрологической модели формирования стока на водосборе НВУ путем внедрения алгоритма описания динамики плотности и высоты снежного покрова, а также блока расчета глубины промерзания почвогрунтов. Произведена адаптация усовершенствованной версии гидрологической модели для исследуемых рек, включающая вычисление расчетных коэффициентов модели, оптимизацию параметров и верификацию расчетов основных характеристик речного стока. Верификация модельных результатов на независимой выборке показала хорошую эффективность модели и ее применимость для выпуска сверхдолгосрочного прогноза характеристик стока. Разработан оптимальный алгоритм коррекции расчетов и прогнозов гидрологической модели, основанный на учете автокорреляции их ошибок, повышающий качество моделирования до 15–20 % для исследуемых водосборов.

Ключевые слова: речной сток, сверхдолгосрочный прогноз, гидрологическая модель, верификация

Adaptation of the runoff formation model for several southern rivers of Russia

N.K. Semenova^{1,2}, Yu.A. Simonov^{1,2}, M.V. Shatokhin¹

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

*²Marchuk Institute of Numerical Mathematics
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
simonov@mecom.ru*

To assess river water availability in the south of European Russia over the next 5-year period, it is proposed to use a modified runoff formation model and a long-term meteorological forecast of the INM-CM5 model with a lead time of 1–5 years for several basins of the Don, Kuban, and Kuma rivers. These river basins are characterized by high loads on water management systems, which determines their sensitivity to both interannual and

intraannual variability of river runoff and its main characteristics. To estimate such variability, the HBV hydrological runoff formation model was modified using an algorithm for describing the dynamics of snow density and snow depth, as well as a module for calculating the freezing depth. The modified version of the hydrological model was adapted for the studied rivers. The adaptation included the calculation of model coefficients, parameter optimization, and verification of calculations of the main river characteristics. A validation of the model results on an independent sample demonstrated a good performance of the model and its applicability for producing long-term forecasts of runoff characteristics. An optimum algorithm for correcting hydrological model calculations and forecasts taking into account autocorrelation of their errors was developed, which increased the modeling accuracy by 15–20 % for the study watersheds.

Keywords: river runoff, long-term forecast, hydrological model, verification

Введение

Как показывают результаты ряда работ, в последние десятилетия произошли существенные изменения водности рек юга европейской части страны в части как изменения основных характеристик водности рек, так и внутригодового распределения стока [6, 14, 13], что приводит к росту нагрузки на воднохозяйственный комплекс данных рек. К основным пользователям прогнозов рек юга европейской территории относится сельское хозяйство, гидроэнергетика, речной транспорт и другие. Для повышения эффективности использования водных ресурсов рек пользователям гидрологической информации требуется оценка основных характеристик стока рек с заблаговременностью от месяцев до первых лет. Прогнозы различных гидрологических характеристик с заблаговременностью до 3 месяцев выпускают оперативно прогностические подразделения Росгидромета [2, 9, 10]. Была показана возможность сверхдолгосрочного прогнозирования стока рек России на основе динамического подхода [4, 17, 21, 23, 24], при котором водно-балансовая модель формирования речного стока HBV-96 используется совместно со сверхдолгосрочным ансамблевым метеорологическим прогнозом, полученным с помощью модели INM5 [5, 11]. Для анализа выбраны 12 речных бассейнов, расположенных в различных климатических и физико-географических зонах России. С заблаговременностью 1–5 лет прогнозировались среднегодовой и среднемесячные расходы воды, а также годовой максимум речного стока. Данные реанализа за период с 1980 по 2020 г. показали, что используемый динамический подход позволяет адекватно оценивать возможные межгодовые колебания речного стока и его внутригодовое распределение. Полученный с помощью моделей HBV-96 и INM5 ансамбль прогнозов годового и максимального стока для периода с 2023 по 2026 г. в достаточной степени согласуется с данными о водном режиме рассматриваемых рек [5, 11].

Для выпуска сверхдолгосрочного прогноза аномалий водности данных рек были рассмотрены четыре водосбора: два крупных притока р. Дон – реки Хопер и Медведица, а также реки Кубань и Кума. Выбранные гидрологические посты и их характеристики за многолетний период представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики исследуемых речных бассейнов
Table 1. The characteristics of the studied river basins

№	Индекс	Река	Пункт	Площадь, км ²
1	78013	Дон	ст-ца Казанская	102000
2	78017	Дон	г. Серафимович	169000
3	78141	Хопер	г. Поворино	19100
4	78202	Медведица	ст-ца Арчединская	33700
5	83157	Кубань	с. Успенское	12800
6	84037	Кума	г. Буденновск	15000

Выбор данных речных бассейнов обусловлен их важностью для водопотребителей и водопользователей южных районов европейской территории нашей страны, а также значимыми отрицательными трендами годового стока на некоторых из них [13], что накладывает дополнительное давление на водохозяйственный комплекс в пределах их бассейнов. В то же время в связи с большой антропогенной нагрузкой на бассейны данных рек отмечаются затруднения с водопользованием и водопотреблением. Основными пользователями гидрологической информационной и аналитической продукции в данное время являются гидроэнергетика, речной транспорт, забор воды на орошение [8].

В работе использованы данные гидрологических и метеорологических наблюдений за 35-летний период с 1991 по 2024 г., полученных с наблюдательной сети метеорологических станций Росгидромета (рис. 1). Вычисление среднего значения по бассейну за расчетные сутки производилось путем расчета среднеарифметического значения в связи с однородным пространственным распределением метеорологических станций на территории изучаемых бассейнов. За этот же период использованы данные ежедневных расходов воды, полученных из архивов ВНИИГМИ-МЦД и Гидрометцентра России.

Усовершенствование модели формирования стока

В работах [5, 11] использована модель формирования стока HBV-96, широко используемая в практике гидрологических прогнозов в России и по всему миру [20, 22]. Одним из недостатков данной модели является отсутствие блока расчета глубины промерзания почв, что в условиях российских рек имеет ограничение для ее использования. В условиях сезонного промерзания почвогрунтов на большинстве рек России, включая реки юга Европейской территории России, процессы формирования стока в весенний период года отличаются своей спецификой, приводящей к формированию так называемых запирающих слоев [7], приводящих к повышенному поверхностному стоку в период весеннего снеготаяния. Для устранения данного недостатка предложена схема расчета глубины промерзания

почвы, основанная на ранее используемых подходах в модели формирования стока Гидрометцентра СССР [7]. Включение расчета глубины промерзания почв в модель формирования стока НВВ-96 представлялось необходимым действием для ее дальнейшего применения для речных бассейнов России по причине широкого влияния эффекта промерзания почвогрунтов на процессы формирования талого стока.

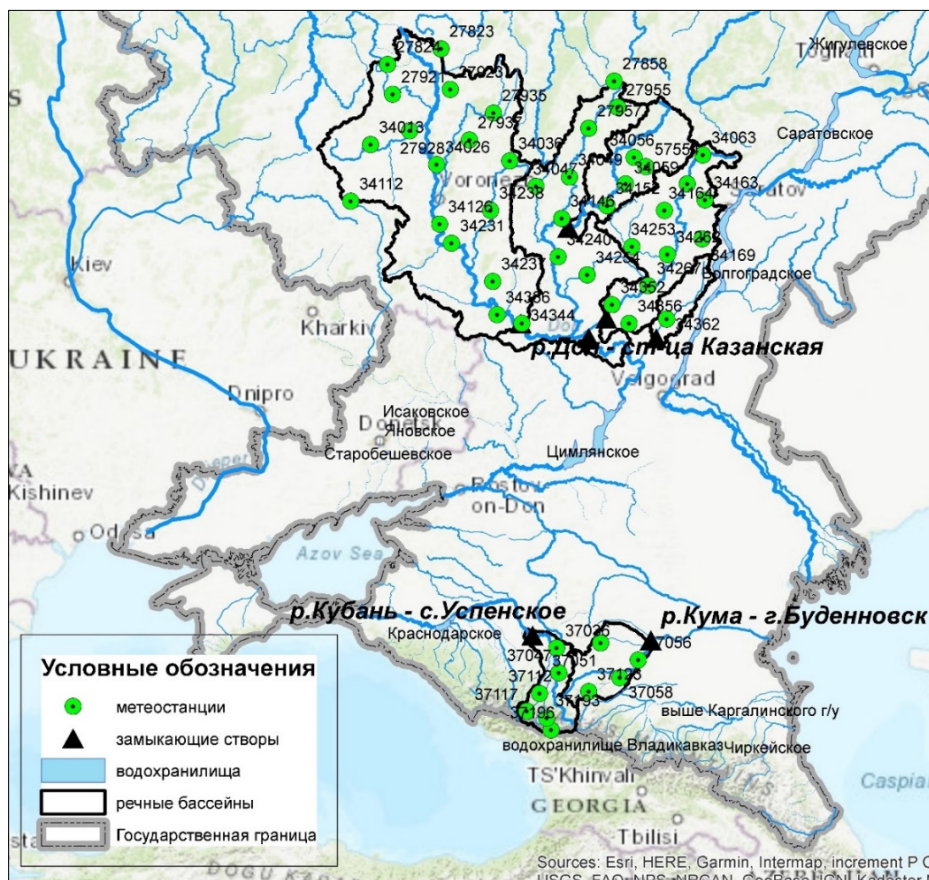


Рис. 1. Расположение исследуемых речных бассейнов, замыкающих створов их водосборов, а также метеорологических станций.

Fig. 1. The location of the studied river basins, their outlets, as well as weather stations.

В соответствие со схематизацией [7], в слое почвы выделяется верхний слой толщиной Z_{\max} . При отрицательной температуре часть воды в почве будет превращаться в лед, что приводит к формированию слоя промерзания. При наступлении положительных температур будет происходить обратный процесс. Переход температуры почвы через 0°C будет приводить к образованию нового слоя промерзания (оттаивания). При перепадах

температуры по данной схеме могут образовываться несколько слоев промерзшей и талой почвы, слои могут сливаться. В расчетную схему положено, что фазовые переходы влаги происходят только на фронте промерзания или оттаивания, а в зоне отрицательной температуры вся влага замерзает. Поток тепла и влаги с нижней границы отсутствует, а фильтрующаяся при таянии вода не участвует в процессах теплообмена. В этом случае уравнение для расчета глубины промерзания (оттаивания) выглядит следующим образом:

$$Z_i(t + \Delta t) = - \left(\frac{\lambda_{\text{п}}}{\lambda_{\text{с}}} \right) H_{\text{с}} + \sqrt{\left[\left(\frac{\lambda_{\text{п}}}{\lambda_{\text{с}}} \right) H_{\text{с}} + Z_i(t) \right]^2 + \frac{2\lambda_{\text{п}}|T_{\text{с}}|\Delta t}{\rho_{\text{в}}L_{\text{л}}\theta_{\text{п}}}}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды; $L_{\text{л}}$ – удельная теплота плавления льда; $\theta_{\text{п}}$ – влажность почвы (по объему); $H_{\text{с}}$ – толщина снежного покрова; $T_{\text{с}}$ – температура поверхности снега; $\lambda_{\text{п}}$, $\lambda_{\text{с}}$ – теплопроводности почвы и снега соответственно. Параметры $H_{\text{с}}$, $T_{\text{с}}$, $\theta_{\text{п}}$ берутся средние за промежуток времени Δt ; $\rho_{\text{в}}$, $L_{\text{л}}$ – константы. Теплопроводность снега рассчитывается по зависимости:

$$\lambda_{\text{с}} = 1.373 \cdot 10^{2.25\rho_{\text{с}}}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{с}}$ в Дж/(см²·ч·°С); $\rho_{\text{с}}$ – плотность снега, г/см³. Теплопроводность почвы – более сложный параметр, формула расчета которого будет меняться в зависимости от текущего слоя. Выражение для талой почвы будет иметь следующий вид:

$$\lambda_{\text{п.т}} = \left[(5.42\rho_{\text{п}} - 3.34) \left(\ln \frac{\theta_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}}} + 4.6 \right) - (1.6\rho_{\text{п}} - 0.5) \right] \cdot 4.19, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{п}}$ – плотность почвы (по объему); $\theta_{\text{п}}$ – влажность почвы (по объему). Следуя [3] запишем выражение для теплопроводности мерзлой почвы:

$$\lambda_{\text{п.м}} = \lambda_{\text{п.т}} + \left[0.8 + 26.7 \left(\frac{\theta_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}}} - 0.1 \right) \right] \cdot 4.19. \quad (4)$$

Соответственно, для слоя оттаивания $\lambda_{\text{п}} = \lambda_{\text{п.т}}$, для промерзания $\lambda_{\text{п}} = \lambda_{\text{п.м}}$.

В используемом уравнении (1) присутствует высота снежного покрова. Задание данной величины возможно либо с учетом данных наблюдений (на метеорологических станциях или при использовании данных снегомерных маршрутов), либо с помощью ее моделирования. Для задания данной величины в настоящей работе использован усовершенствованный ранее вариант модели динамики снежного покрова с внедренным алгоритмом расчета плотности снега и его высоты [12]. Верификация алгоритма для выбранных водосборов показала хорошее качество сходимости фактически наблюдаемых и смоделированных величин плотности снега и его высоты [12].

Проверка предложенного алгоритма расчета глубины промерзания выполнена с использованием данных наблюдений за температурой воздуха, суммой осадков, глубиной промерзания почвы на наблюдательной сети Росгидромета за период 2010–2024 гг. для используемых водосборов. Выполнялась проверка как для отдельных станций, так и для среднего значения по водосборам. Разработан код программы, полностью моделирующий данный процесс на основе ежесуточных значений температуры воздуха, влажности почвы, а также характеристик почвенного покрова (в т. ч. полевой влагоемкости, влажности завядания).

Адаптация гидрологической модели

Подготовка гидрологической модели к использованию в рамках поставленной задачи сверхдолгосрочного прогноза характеристик водности исследуемых рек в 2026–2030 гг. состояла в её адаптации, включая расчет всех необходимых расчетных коэффициентов модели и «априорных» параметров, автоматической оптимизации параметров модели, ручной калибровки параметров, верификации результатов моделирования и внедрения алгоритма коррекции выходного результата моделирования. Расчетные коэффициенты, а также априорные параметры модели рассчитаны на основе цифровой модели рельефа, карт типов растительности и почвенного покрова (например, площади и среднего уклона водосбора, его широты, гидрофизических параметров почвенного покрова, доли непроницаемой поверхности и т. д.) в рамках программных ГИС средств.

Оптимизация параметров гидрологической модели выполнялась с помощью алгоритма перемешивания и эволюции комплексов (выборок) значений параметров SCE-UA [18]. Для нахождения оптимальных значений параметров модели использована обучающая выборка, образованная данными гидрологических и метеорологических наблюдений за период с 01.01.2001 по 31.12.2016. Данный период можно считать репрезентативным, так как практически для всех рассматриваемых рек в течение этого периода наблюдались многоводные, маловодные и средние по водности годы. Оптимизация включала следующие этапы:

- случайным образом генерируется выборка значений векторов, образованных оцениваемыми параметрами;
- ранжирование членов выборки по значению целевой функции, т. е. суммы квадратов ошибок расчета;
- выполняется процедура разбиения выборки на ряд «комплексов» (перетасовка векторов) и последующая эволюция каждого из комплексов;
- производится обратное объединение измененных комплексов (после эволюции значений векторов) в единую выборку;
- повторяется процедура ранжирования на основе оценки значений целевой функции, перетасовка, разбиение на комплексы, эволюция комплексов.

Цикл процедур повторяется до тех пор, пока не выполняется изначально заданное условие сходимости. Изначальная случайная перетасовка пространства параметров создает предпосылку для поиска глобального оптимума целевой функции без привязки к заранее заданным начальным значениям параметров. Использовано программное обеспечение PEST, которое позволяет производить оптимизацию параметров широкого круга моделей, в том числе при помощи рассматриваемого алгоритма оптимизации [16, 19]. Скорость выполнения оптимизации с помощью данного алгоритма и используемых программных средств составила от 20 до 30 минут при размере обучающей выборки $N = 2557$.

Оптимизация выполнена с использованием данных наблюдений за период 2010–2015 гг. Значение NSE 0.8 свидетельствует об удовлетворительном качестве расчетов с использованием входной информации и подобранных параметров модели.

В рамках выполнения проекта было разработано веб-приложение на базе пакета *Dash*, которое обеспечивает возможность как автоматической калибровки параметров используемой гидрологической модели (усовершенствованной модели HBV-96), так и ручной настройки для более точной оптимизации. Такой подход позволяет гибко управлять процессом калибровки и повышать точность моделирования. Библиотека *Dash* основана на архитектуре *React* и представляет из себя инструмент для создания интерактивных веб-интерфейсов с использованием различных компонентов, что обеспечивает высокую гибкость и расширяемость разрабатываемых приложений. Благодаря интеграции с библиотеками визуализации *Dash* позволяет реализовать динамичные графики и аналитические панели. Дополнительно к процедуре оптимизации была выполнена ручная настройка (калибровка) параметров модели с использованием ранее разработанного программного обеспечения (рис. 2).

В целях повышения точности модельных расчетов применен метод коррекции, который учитывает автокорреляцию их ошибок и широко используется в мировой практике гидрологических прогнозов. Идея метода состоит в том, что если к дате t получения расчетного значения $\hat{Q}(t)$ уже известные результаты расчета за предыдущие сутки демонстрируют завышение или, наоборот, занижение фактических значений среднесуточного расхода воды $Q(t)$, то расчет для этой даты целесообразно уменьшить или, соответственно, увеличить [15]. Обоснованность такого приема возрастает, если ошибки предшествующих расчетов образуют серию отрицательных или положительных значений, что и было отмечено для подавляющего большинства рассматриваемых речных бассейнов.

Скорректированные расчетные значения среднесуточных расходов воды определяются формулой:

$$\tilde{Q}(t) = \hat{Q}(t) + \sum_{i=1}^k a_i [Q(t-i) - \hat{Q}(t-i)] + b. \quad (5)$$

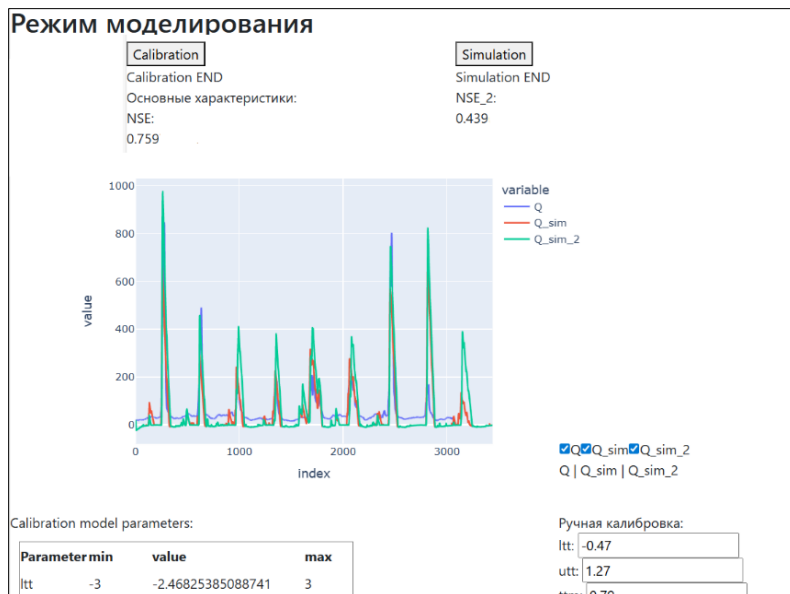


Рис. 2. Веб-приложение для оптимизации параметров используемой в исследовании гидрологической модели.

Fig. 2. A web application for optimizing the parameters of the hydrological model used in the study.

Дополнительный свободный член b в формуле (5) обеспечивает отсутствие систематической ошибки расчета. При любом заданном значении k оптимальные значения параметров a_1, \dots, a_k и b формулы (3) оценивались методом наименьших квадратов, который обеспечивает минимум суммы квадратов ошибок расчета за весь предназначенный для калибровки период с 01.01.2010 по 31.12.2016 продолжительностью $N = 2557$ суток. Оптимальное число k определялось с помощью критерия Акаике, в котором учитывается не только погрешность расчета для калибровочного периода, но и соотношение между числом $k + 1$ оцениваемых параметров и его длиной N . Сравнение полученных таким образом оптимальных значений k для всех 590 речных бассейнов позволило в целях упрощения методики расчета принять для них единое значение $k = 5$.

Использование усовершенствованной концептуальной модели формирования речного стока НВВ-96 с последующей коррекцией модельных расчетов описанным выше способом составляет основу предлагаемой методики получения среднесуточных расходов воды. Верификация модели выполнена для периода 2017–2024 гг. с использованием тех же критериев качества. Результаты моделирования расходов воды с применением усовершенствованной версии гидрологической модели НВВ-96, с учетом оптимизации параметров и процедуры коррекции позволяют получать модельные гидрографы стока с хорошей степенью точностью (рис. 3). Значения критерия Нэша – Сатклифа NSE и коэффициента корреляции R представлены в табл. 2.

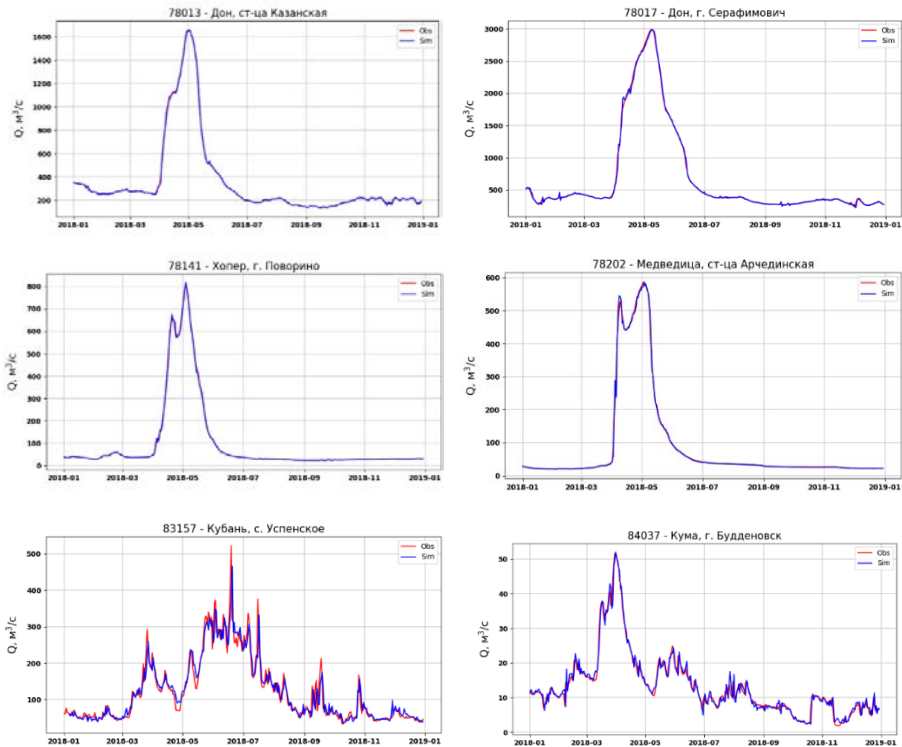


Рис. 3. Пример моделирования графиков хода расходов воды по фактическим метеорологическим данным для рассматриваемых гидрологических постов.

Fig. 3. An example of modeling graphs of water discharges according to actual meteorological data for the analyzed gaging stations.

Таблица 2. Значения критериев качества моделирования ежедневных расходов воды у рассматриваемых створов

Table 2. The values of the skill scores of modeling daily water discharges at the analyzed gages

№	Индекс	Река	Пункт	До коррекции		После коррекции	
				NSE	R	NSE	R
1	78013	Дон	ст-ца Казанская	0.42	0.69	0.67	0.83
2	78017	Дон	г. Серафимович	0.52	0.75	0.71	0.90
3	78141	Хопер	г. Поворино	0.71	0.84	0.89	0.95
4	78202	Медведица	ст-ца Арчединская	0.67	0.87	0.85	0.97
5	83157	Кубань	с. Успенское	0.82	0.91	0.91	0.98
6	84037	Кума	г. Буденновск	0.49	0.73	0.65	0.87

Заключение

Выполнено усовершенствование гидрологической модели формирования стока на водосборе путем внедрения алгоритма описания динамики плотности снежного покрова, а также блока промерзания почвогрунтов на основе решения уравнения теплового баланса в зоне аэрации. Результаты моделирования стока рек бассейнов Дона, Кубани и Кумы продемонстрировали хорошую эффективность новой версии модели.

Произведена адаптация усовершенствованной версии гидрологической модели для рек бассейнов Дона, Кубани и Кумы, включающая вычисление расчетных коэффициентов модели, оптимизацию модельных параметров и верификацию расчетов основных характеристик речного стока. Верификация модельных результатов на независимой выборке показала хорошую эффективность модели и ее применимость для выпуска сверхдолгосрочного прогноза характеристик стока.

Разработан и внедрен оптимальный алгоритм коррекции расчётов и прогнозов выходов гидрологической модели, основанный на учете автокорреляции их ошибок. Предлагаемый метод коррекции расчетов ежедневных расходов воды позволяет повысить качество моделирования до 15–20 % для исследуемых водосборов.

Адаптированная модель формирования стока будет использована совместно с выходами климатической модели INM-CM5 для составления сверхдолгосрочного прогноза характеристик водного стока рек на период 2026–2030 годов.

Работа выполнена в Институте вычислительной математики имени Г.И. Марчука Российской академии наук при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-17-00247).

Список литературы

1. Борц С.В., Гельфан А.Н., Морейдо В.М., Мотовилов Ю.Г., Симонов Ю.А. Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище на основе гидрологической модели: результаты проверочных и оперативных испытаний // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 366. С. 68–86.
2. Борц С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. М.: Гидрометцентр России, 2023. 200 с.
3. Борц С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный вып. 355. 198 с.
4. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 276 с.
5. Грицун А.С., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Хан В.М., Христофоров А.В. Анализ сверхдолгосрочных прогнозов метеорологических характеристик речных бассейнов России с помощью модели климата INM-CM5 // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. №4 (394). С. 39–57.
6. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б. Современные изменения водного режима рек в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 40. С. 544–556.
7. Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 200 с.
8. Лурье П.М., Панов В.Д., Ткаченко Ю.Ю. Река Кубань: гидрография и режим стока. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 498 с.

9. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 193 с.
10. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 356 с.
11. Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Сверхдолгосрочный прогноз стока рек России // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 12. С. 47-56
12. Симонов Ю.А., Семенова Н.К., Христофоров А.В. Методика краткосрочных прогнозов расходов воды на реках бассейна Камы на основе использования модели HBV // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 6. С. 55-65
13. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. СПб.: Научно-технические технологии, 2022. 676 с.
14. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. Часть 1 // *Водные ресурсы*. 2022. Т. 49, № 3. С. 251-269.
15. Христофоров А.В., Юмина Н.М. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: АИП, 2017. 151 с.
16. Doherty J. Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models: Second Edition. Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia, 2025. 318 p.
17. Driessen T.L.A., Hurkmans R.T.W.L., Terink W., Hazenberg P., Torfs P.J.J.F., Uijlenhoet R. The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modeled by HBV model // *Hydrol. Earth System Sci*. 2010. Vol. 14, no. 4. P. 651-665.
18. Duan Q., Sorooshian S., Gupta V. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models // *Journal of Hydrology*. 1994. Vol. 158, is. 3-4. P. 265-284.
19. Duan Q.Y., Gupta V.K., Sorooshian S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization // *J. Optimum Theory Application*. 1993. Vol. 76. P. 501-521.
20. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168. World Meteorological Organization, 2009. 302 p.
21. Guidelines on Seasonal Hydrological Prediction // WMO-No. 1274. World Meteorological Organization, 2021. 67 p.
22. Lindström G., Johansson B., Persson M., Gardelin M., Bergström S. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model // *Journal of Hydrology*. 1997. Vol. 201 (1-4). P. 272-288.
23. Prudhomme C., Hannaford J., Harrigan S. et al. Hydrological Outlook UK: An Operational Streamflow and Groundwater Level Forecasting System at Monthly to Seasonal Time Scales // *Hydrological Sciences Journal*. 2017. Vol. 62 (16). P. 2753-2768.
24. Zhu E., Yuan X., Wood A.W. Benchmark decadal forecast skill for terrestrial water storage estimated by an elasticity framework // *Nat Commun*. 2019. Vol. 10. P. 1237.

.References

1. Borsch S.V., Gelfan A.N., Moreydo V.M., Motovilov Yu.G., Siminov Yu.A. Long-term ensemble forecasting of spring inflow into the Cheboksary reservoir based on the hydrological model: results of operational testing. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 366, pp. 68-86 [in Russ.].
2. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Prognozirovanie stoka rek Rossii [Streamflow forecasting in Russia]. Moscow, Hydrometcenter of Russia publ., 2023, 200 p. [in Russ.].
3. Borsch S.V., Khristoforov A.V. Hydrologic flow forecast verification. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 355, 198 p. [in Russ.].
4. Gelfan A.N. Dinamiko-stokhasticheskoe modelirovanie formirovaniya talogo stoka. M.: Nauka Publ., 2007, 276 p. [in Russ.].
5. Gritsun A.S., Semenova N.K., Simonov Yu.A., Khan V.M., Khristoforov A.V. Analysis of ultra-long-term forecasts of meteorological characteristics of Russian river basins using the

INM-CM5 climate model outputs. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2024, vol. 394, no. 4, pp. 39-57. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-4-39-57> [in Russ.].

6. *Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B.* Current changes in river water regime in the Don River basin. *Water Resources*, 2013, vol. 40, no. 6, pp. 573-584.

7. *Koren' V.I.* Matematicheskie modeli v prognozhah rechnogo stoka. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1991, 200 p. [in Russ.].

8. *Lur'e P.M., Panov V.D., Tkachenko Ju.Ju.* Reka Kuban': gidrografija i rezhim stoka. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat publ., 2005, 498 p. [in Russ.].

9. *Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Part 1. Prognozy rezhima vod sushi.* Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1962, 193 p. [in Russ.].

10. *Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 1. Dolgosrochnye prognozy elementov vodnogo rezhima rek i vodohranilishch.* Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 356 p. [in Russ.].

11. *Semenova N.K., Simonov Y.A., Khristoforov A.V.* Extended Streamflow Prediction for Russian Rivers. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, vol. 48, pp. 1019-1028. DOI: 10.3103/S1068373923120026.

12. *Simonov Y.A., Semenova N.K., Khristoforov, A.V.* Short-range Streamflow Forecasting of the Kama River Based on the HBV Model Application. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2021, vol. 46, pp. 388-395. DOI: 10.3103/S1068373921060054.

13. *Tretij ocenochnyj doklad ob izmenenijah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii / pod red. V.M. Katcova.* Saint Petersburg: Naukoemkie tehnologii publ., 2022, 676 p.

14. *Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigoriev V.Yu., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I.* Streamflow of Russian Rivers under current and forecasted climate changes: a review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of russian Rivers by observation data. *Water Resources*, 2022, vol. 49, no. 3, pp. 333-350.

15. *Khristoforov A.V., Yumina N.M.* Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: Uchebnoe posobie. Moscow, APR publ., 2017, 151 p. [in Russ.].

16. *Doherty J.* Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models: Second Edition. Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia, 2025, 318 p.

17. *Driessen T.L.A., Hurkmans R.T.W.L., Terink W., Hazenberg P., Torfs P.J.J.F., Uijlenhoet R.* The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modeled by HBV model. *Hydrol. Earth System Sci.*, 2010, vol. 14, no. 4, pp. 651-665.

18. *Duan Q., Sorooshian S., Gupta V.* Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 1994, vol. 158, is. 3-4, pp. 265-284.

19. *Duan Q.Y., Gupta V.K., Sorooshian S.* Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *J. Optimum Theory Application*, 1993, vol. 76, pp. 501-521.

20. *Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. WMO-No. 168.* World Meteorological Organization, 2009, 302 p.

21. *Guidelines on Seasonal Hydrological Prediction. WMO-No. 1274.* World Meteorological Organization, 2021, 67 p.

22. *Lindström G., Johansson B., Persson M., Gardelin M., Bergström S.* Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 1997, vol. 201 (1-4), pp. 272-288.

23. *Prudhomme C., Hannaford J., Harrigan S. et al.* Hydrological Outlook UK: An Operational Streamflow and Groundwater Level Forecasting System at Monthly to Seasonal Time Scales. *Hydrological Sciences Journal*, 2017, vol. 62 (16), pp. 2753-2768.

24. *Zhu E., Yuan X., Wood A.W.* Benchmark decadal forecast skill for terrestrial water storage estimated by an elasticity framework. *Nat Commun.*, 2019, vol. 10, pp. 1237.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-1-171-188>

УДК 556.06+556.535.5

Прогнозирование сроков формирования первичных ледовых явлений на реках Кольского полуострова

С.А. Канашин¹, Л.С. Банщикова¹, А.Э. Сумачев²

¹Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия;

²Санкт-Петербургский государственный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия
ckanashin@yandex.ru

Целью данного исследования является оценка возможности применения методов машинного обучения для совершенствования зависимостей, связанных с прогнозом сроков появления первичных устойчивых ледовых явлений. В качестве объекта изучения выбраны реки Кольского полуострова с различными условиями формирования ледового режима. Выполнен пространственно-временной анализ сроков появления первичных ледовых явлений, анализ многолетней изменчивости сумм отрицательной температуры воздуха на исследуемой территории. Сформирована база данных гидрологической и метеорологической информации за характерные даты, собран предиктивный состав модели. В работе представлен прогноз осенних ледовых явлений с использованием двух подходов – регрессионного и классификационного. Регрессионный подход предполагает использование деревьев решений (XGBoost), классификационный, в свою очередь, опирается на гибридную нейросетевую модель (XGBoost – CNN-GRU). Прогноз, полученный гибридным подходом, не превышает допустимые погрешности и может быть рекомендован к использованию.

Ключевые слова: ледовый режим, Кольский полуостров, прогноз ледовых явлений, нейронные сети, машинное обучение, глубокое обучение, XGBoost, LSTM

Forecasting the dates of initial ice formation on the Kola Peninsula rivers

S.A. Kanashin¹, L.S. Banshchikova¹, A.E. Sumachev²

¹State Hydrological Institute, Saint Petersburg, Russia;

²Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia
ckanashin@yandex.ru

The objective of the present study is to evaluate the feasibility of using machine and deep learning methods to improve dependencies associated with forecasting the dates of occurrence of initial persistent ice phenomena. The study focuses on the rivers of the Kola Peninsula with varying ice formation conditions. A spatiotemporal analysis of the dates of initial ice phenomena and long-term variability of negative air temperature totals in the study area was performed. A database of hydrological and meteorological information for characteristic dates was compiled, and a predictive model was assembled. The paper presents a forecast of autumn ice phenomena using two approaches: regression and classification. The regression approach utilizes decision trees (XGBoost), while the classification approach relies on a hybrid neural network model (XGBoost – CNN-GRU). The forecast obtained by the hybrid approach does not exceed permissible errors and can be recommended for use.

Keywords: ice regime, Kola Peninsula, ice phenomena forecast, neural networks, machine learning, deep learning, XGBoost, LSTM

Введение

Формирование устойчивых ледовых явлений является неотъемлемой частью гидрологического цикла. Сроки появления, продолжительность формирования, интенсивность являются важными характеристиками, необходимыми как для безаварийной эксплуатации ГТС, так и для работы служб спасения, рыболовных хозяйств, проектирования и строительства газопроводов, автодорожных и железнодорожных мостов.

Начало формирования ледового покрова на реках Кольского полуострова определяются рядом физико-географических факторов, среди которых ключевую роль играют широтное положение, интенсивность охлаждения водной массы, морфометрические характеристики русла, а также степень естественной и антропогенной зарегулированности стока.

Формирование первичных устойчивых ледовых явлений на реках зависит от комплекса факторов: достижение критических сумм отрицательных температур, наличие течения, морфологических особенности русел, региональных климатических условий и степени антропогенного воздействия. В более холодных внутренних районах полуострова на малых реках появление первичных заберегов происходит уже в начале ноября. В то же время, например, в прибрежных районах Баренцева моря, благодаря смягчающему влиянию морского климата и относительно тёплым погодным условиям в осенний период, сроки начала ледообразования, как правило, приходятся на более поздние даты. Кроме того, на участках с высокими уклонами и порогами, где наблюдаются большие скорости течения, происходит интенсивное шугообразование.

Анализу изменчивости указанных выше характеристик посвящен ряд работ, в том числе [1, 3–7, 9, 12, 15, 16]. Выявленные изменения характеристик ледового режима, включая сроки появления ледовых явлений и установления ледостава, имеют значимый тренд за многолетний период, более того, изменилась последовательность и продолжительность формирования различного вида ледовых явлений.

В работе [8] указано, что запросы потребителей в области ледовых прогнозов во многом свелись к решению проблем, связанных с обеспечением гидрометеорологической безопасности страны. В этой связи в Гидрометцентре России продолжают исследования по созданию методов и методик прогнозирования сроков наступления осенних и весенних ледовых явлений, заторов и зажоров льда, в основу которых положен синоптико-статистический метод.

Разработанные в 40-х годах прошлого века как краткосрочные методы, основанные на физико-статистических зависимостях и уравнении теплового баланса, так и долгосрочные прогнозы, учитывающие закономерности развития атмосферных процессов [11], не учитывают современные изменения климата и, соответственно, параметров ледового режима, требуют уточнения и модернизации в условиях изменяющегося климата и роста объёма доступных данных.

За последние десять лет глубокое обучение – направление машинного обучения, использующее многослойные нейронные сети – значительно расширило возможности построения прогностических моделей в различных областях знаний. Такие модели активно применяются в обработке изображений, распознавании речи, машинном переводе и других сферах. В области наук о Земле, включая гидрологию, они также демонстрируют высокую эффективность [18].

Преимущество нейронных сетей заключается в их универсальности, способности выявлять сложные скрытые зависимости и учитывать большое количество предикторов, включая климатические, морфологические и антропогенные факторы. Всё это делает их перспективным инструментом для моделирования и прогнозирования ледовых явлений.

Целью данного исследования является анализ условий формирования ледового режима предзимнего периода рек Кольского полуострова и оценка возможности применения методов машинного обучения для совершенствования зависимостей, связанных с прогнозом сроков появления первичных устойчивых ледовых явлений.

В ходе работы была создана база данных, включающая основные характеристики ледового режима рек Кольского полуострова и метеопараметры, обобщающая расчетные характеристики ледового режима за период с 1930 по 2022 год; количественно и качественно проанализирована межгодовая изменчивость данных характеристик; выявлены основные статистические зависимости; разработана классификация рек.

Данная работа является частью диссертационного исследования, в рамках которого рассматривались такие модели машинного обучения, как XGBoost, CatBoost, LSTM, GRU, TCN, Transformer. В настоящей работе представлены результаты для лучших моделей регрессионного и классификационного подходов (XGBoost и XGBoost-CNN-GRU соответственно).

Материалы и методы

Объект исследования – реки Кольского полуострова. Для проведения исследования была сформирована база данных по 24 гидрологическим постам и по 11 метеостанциям [14]. В качестве предикторов прогностической зависимости на основе среднесуточных данных выбраны: даты наступления ледового явления, вид ледового явления, уровень воды, условные обозначения ледовых явлений, которые были систематизированы и приведены к единой классификации. Метеорологические данные – накопленная сумма отрицательных температур воздуха, накопленная сумма осадков. Данные представлены с 1936 по 2020 год за период с 1 октября по 31 января соответствующего водохозяйственного года. Выбор временного периода продиктован наиболее ранним началом перехода температуры воздуха через 0 °C и наиболее поздней датой формирования ледостава.

Вследствие того, что большинство рек Кольского полуострова относятся к малым водотокам, большое влияние на формирование первичных ледовых явлений и установление ледостава оказывают локальные факторы.

Реки Кольского полуострова, в зависимости от рельефа и ряда других географических особенностей, подразделяются на три типа: полуравнинные, озёрного типа и горные (рис. 1). Данная классификация также может быть применена для типизации водотоков по условиям замерзания.

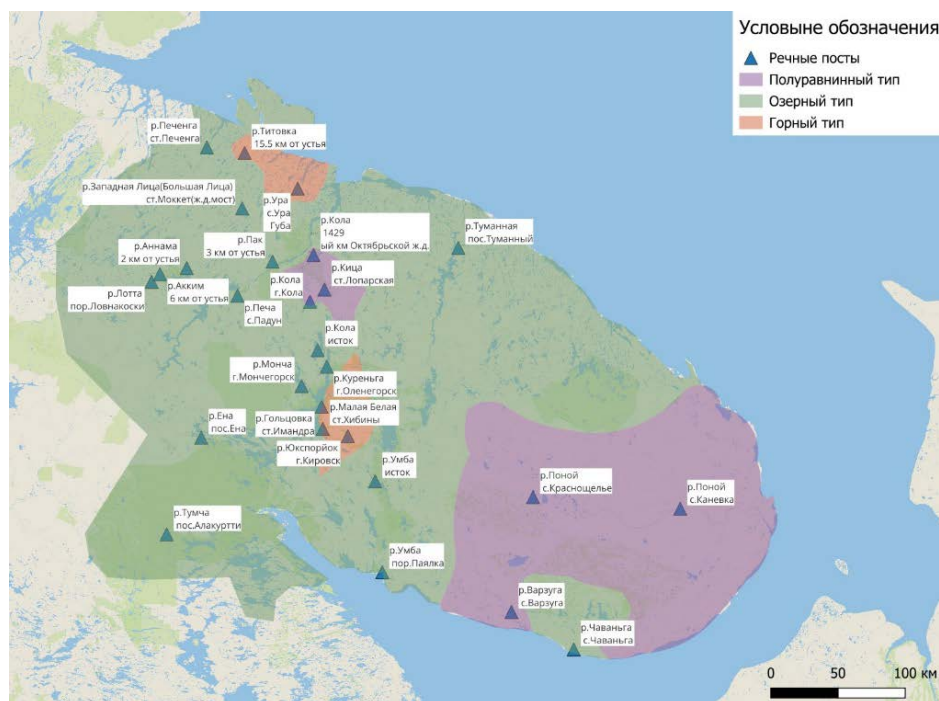


Рис. 1. Типизация рек по условиям их протекания.

Fig. 1. Classification of rivers according to their flow conditions.

К рекам полуравнинного типа следует отнести реки Варзуга, Поной, Кица и участки реки Кола в нижнем и среднем течении. Замерзание на этих реках, как правило, начинается с образования заберегов и сала. На реке Варзуга эти явления, как правило, носят кратковременный характер, после чего наблюдается образование шуги в 64 случаях из 100 лет наблюдений [7].

Большинство малых и средних рек Мурманской области относятся к водотокам озёрного типа. Среди исследуемых объектов к данной категории можно отнести, в частности, реки Чаваньга, Кола, Ура, Умба, Печенга, Титовка, Западная Лица и ряд других. На формирование ледового режима, помимо озёр, оказывают существенное влияние тёплые морские течения Баренцева и Белого морей.

К горному типу относятся малые водотоки, берущие начало на возвышенностях Кольского полуострова. Эти реки характеризуются значительными уклонами русел, протекают в узких скалистых долинах и имеют

развитую порожисто-водопадную структуру. К данному типу относятся реки Малая Белая, Юкспорйок, Тумча, Ура, Титовка.

Для прогноза сроков появления льда и установления ледостава были созданы модели, разработанные на языке программирования Python с использованием библиотек XGBoost, TensorFlow (Keras), Scikit-learn. Эти инструменты позволяют эффективно решать как задачи регрессии, так и задачи классификации, в частности – многоклассовой классификации ледовых явлений, что является задачей повышенной сложности из-за сезонной и пространственной неоднородности. Таким образом, в данной работе реализован регрессионный подход методами градиентного бустинга. Результатом работы этой прогностической модели является дата появления первичного ледового явления. Также был реализован классификационный подход с использованием гибридной модели XGBoost-CNN-GRU. Результатом работы модели является вероятность появления класса ледового явления на каждый интересующий пользователя день. На данный момент переход от вероятностей появления первичных ледовых явлений к датам осуществлялся вручную.

Все наблюдаемые ледовые явления были учтены (обработаны) и распределены по четырём классам: отсутствие льда, устойчивые первичные ледовые явления, неполный ледостав, установившийся ледостав. Выбранными предикторами служили: сумма отрицательной температуры воздуха, сумма осадков, уровень воды, характеристика ледового режима, а также их статистические характеристики: среднее, стандартное отклонение, минимум, максимум, разность между максимальной и минимальной величиной и тренд изменения характеристики. Процесс образования ледовых явлений обладает кумулятивным эффектом: гидрологическая и метеорологическая обстановка за предыдущие дни влияет на текущую вероятность ледообразования. Для учета погодных условий и водности рек за предшествующий замерзанию период расчет статистических характеристик предиктивного состава производился за 3, 5, 7, 14 дней до появления ледового явления. В общей сложности для прогноза сроков осенних ледовых явлений использовалось 102 признака. В качестве целевых переменных выступали: класс прогнозируемого явления и дата появления соответствующего класса. Для решения задач регрессии наилучшие результаты показали модели, использующие деревья решений, например, модель градиентного бустинга XGBoost Regressor, предложенная Т. Ченом и К. Гестрином [20]. Такой механизм машинного обучения позволяет улавливать сложные нелинейные зависимости и взаимодействия между предикторами и целевой переменной, с которыми простые модели или линейные методы не справляются. Кроме того, деревья решений устойчивы к пропущенным значениям и различным масштабам признаков, а бустинг снижает риск переобучения за счет усреднения множества моделей. В научной литературе представлено несколько успешных примеров использования XGBoost – от моделирования речного стока и уровня воды до оценки качества и состояния подземных вод. Например, моделирование ледовых явлений на реке Варта

показало, что градиентный бустинг (XGBoost) не уступает по точности нейросетям и позволяет оценить важность разных предикторов (температура воздуха, температура воды, уровень и расход воды) в формировании льда [22]. Преимущество XGBoost не только в точности, но и в скорости: благодаря параллельной реализации алгоритм способен быстро обрабатывать большие массивы данных [17].

Наличие многолетних суточных данных наблюдений за метеорологическими и гидрологическими характеристиками, фазами водного режима позволяют применить методы нейросетевого моделирования, основанные на типизации характеристик ледового режима. Так же как и для регрессионных моделей, исходные данные были разбиты на четыре класса ледовых явлений. Целевой переменной модели является характеристика ледового явления: появление первичных ледовых явлений, установление ледостава и отсутствие ледовых явлений на интересующую дату. Для решения задачи классификации ледовых явлений была использована гибридная модель, объединяющая метод машинного обучения XGBoost и нейросетевые модели CNN, GRU. Применение моделей гибридного типа в гидрологических задачах успешно зарекомендовало себя в ряде зарубежных исследований [19, 21, 23]. Подобные архитектуры позволяют учитывать сложные временные зависимости и пространственную изменчивость гидрологических процессов.

Долгосрочная память (Long Short-Term Memory, LSTM) – это разновидность рекуррентных нейронных сетей, специально разработанная для преодоления проблемы «затухающего градиента», присущей классическим рекуррентным нейронным сетям (РНС). В стандартных рекуррентных сетях при длительных последовательностях градиенты ошибки при обратном распространении стремительно уменьшаются, из-за чего сеть утрачивает способность учиться на дальних зависимостях во времени. Архитектура LSTM включает особые управляющие элементы, так называемые «gates» (входной, выходной и «затвор забывания»), и ячейку памяти, позволяющую хранить информацию на протяжении многих шагов, предотвращая ее стирание при обновлении весов [22]. В данном исследовании используется облегченная альтернатива LSTM – GRU (gated recurrent unit), имеющая упрощенную структуру, которая, однако, во многих задачах показывает сравнимую с моделями LSTM точность.

Комплексное моделирование природных процессов часто выигрывает от объединения разнородных методов, где каждый восполняет недостатки других. Гибридная архитектура, сочетающая градиентный бустинг деревьев (XGBoost) и рекуррентные сети, позволяет одновременно учитывать как сложные нелинейные зависимости между всеми входными признаками, так и временную последовательность и долгосрочную память явления. Идея такого ансамбля опирается на принцип комплементарности моделей: дерево решений лучше улавливает отношения между статическими или мгновенными признаками, выявляет важные факторы и нелинейные

правила, тогда как рекуррентная сеть превосходно моделирует эволюцию системы во времени и помнит предысторию процесса [24]. Гибридные архитектуры могут быть реализованы по-разному – от параллельного обучения двух моделей с последующим объединением их прогнозов до последовательной схемы, где вывод одной модели используется как дополнительный вход для другой. В работе по прогнозу ледовых явлений сочетание разных подходов уже показало себя: так, объединение сверточной сети и LSTM дало значительно более высокую метрику F1-score при классификации ледяных заторов, чем каждая из моделей по отдельности, доказав их взаимодополняемость [22].

В качестве основного инструмента оценки эффективности классификационных моделей в исследовании применяется анализ матрицы ошибок (confusion matrix), на основе которой рассчитываются метрики Accuracy, Precision, Recall и F1-score. Каждая из них отражает разные аспекты качества классификации: Accuracy характеризует общую долю верно классифицированных наблюдений, Precision описывает точность положительных предсказаний, Recall отражает полноту выявления положительных случаев, а F1-score, являясь гармоническим средним между Precision и Recall, обеспечивает интегральную оценку, учитывающую одновременно и точность, и полноту.

Заблаговременность прогнозов первичных ледовых явлений, полученных с помощью моделей, которые разработаны на методах машинного обучения, соответствует заблаговременности прогнозов метеорологических параметров и составляет четыре дня. Применительно к долгосрочному прогнозированию, разработанные модели могут иметь рекомендательный характер, так как прогноз появления классов ледовых явлений выполняется на каждый день интересующего периода. Точность же данного прогноза будет зависеть от точности долгосрочных прогнозов метеорологических и гидрологических параметров.

Обсуждение и результаты

Несмотря на отмечаемые изменения многолетних сроков ледообразования, средняя дата появления первичных ледовых явлений на реках первого типа все также приходится на третью декаду октября. Под влиянием современных климатических изменений сроки начала ледообразования на реках полуравнинного типа также существенно не изменились: для р. Варзуги – 2 дня, для р. Поной – 4 дня (рис. 2).

На формирование ледового режима, помимо озёр, оказывают существенное влияние тёплые морские течения Баренцева и Белого морей, в связи с чем первичные ледовые явления наблюдаются, как правило, с середины октября до начала ноября. Проведённый анализ не выявил статистически значимого влияния климатических изменений на сроки начала ледообразования. Замерзание рек, как правило, происходит за счёт срастания берегов. Ледоход на большинстве рек не наблюдается; шугоход, при его наличии, продолжается, как правило, не более 10 дней.

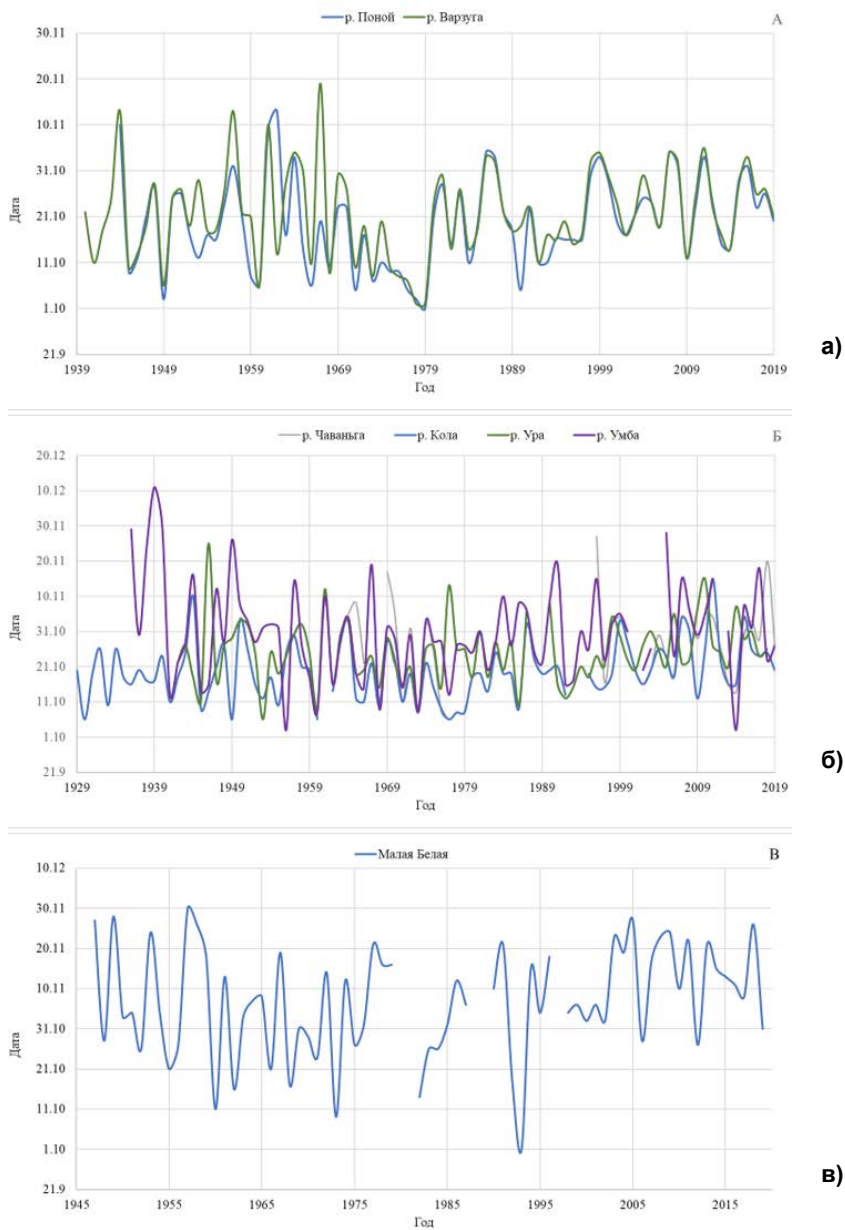


Рис. 2. Хронологические графики появления первичных ледовых явлений на реках Кольского полуострова по типам рек: полуравнинные (а); озерного типа (б); горные (в).

Fig. 2. Chronological graphs of the appearance of primary ice phenomena on the rivers of the Kola Peninsula by river type: semi-plain (a); lake type (б); mountain (в).

Появление льда (6 ноября) на р. Малой Белой наиболее позднее из всех исследуемых рек за счет турбулентного перемешивания и высокой скорости потока (рис. 2). Устойчивые первичные ледовые явления на реке Малая Белая преимущественно представлены заберегами. В верховьях и на мелководных перекатах морозы быстро образуют забереги, после чего в течение нескольких недель происходит становление ледяного покрова. Так же как и для всех рек Кольского полуострова, для р. Малой Белой значимый тренд на раннее появления первичных ледовых явлений не выявлен.

Отсутствие выраженных тенденций к смещению сроков формирования первичных ледяных явлений на реках Кольского полуострова объясняется озёрным регулированием стока, широким распространением шугообразования, а также тем, что для установления устойчивого ледостава в регионе, как правило, достаточно сравнительно невысоких отрицательных температур воздуха. Анализ метеорологических данных за октябрь-ноябрь показывает, что характерные температурные значения и даты их наступления остаются относительно стабильными на протяжении исследуемого периода.

Основным предиктором для прогноза сроков появления первичных ледовых явлений и установления ледостава является накопленная сумма отрицательных температур воздуха. В условиях современного изменения климата увеличение сумм отрицательных температур воздуха (рис. 3) приводит к увеличению периода замерзания рек от появления первичных ледовых явлений до установления ледостава. Существенное влияние на формирование ледовых явлений оказывают атмосферные осадки. Увеличение их количества в период становления ледостава способствует образованию снежуры и шуги, что изменяет тип и сроки формирования ледового покрова. Поскольку прогностические модели обоих подходов разрабатывались для всех исследуемых постов Кольского полуострова, одним из признаков выступает код поста. Так как этот признак является категориальным, его непосредственное использование в большинстве алгоритмов машинного обучения затруднено. Для приведения его к требуемому формату применялось кодирование методом one-hot encoding. Обучение моделей производилось с помощью кросс-валидации. Из всего набора данных выделен независимый набор данных для оценки точности работы модели (с 2010 по 2019 г.). На первом этапе оставшиеся данные были разделены на обучаемый и тестовый наборы в соотношении 80 % и 20 % соответственно. На втором этапе модель обучалась на всех оставшихся данных и результат ее прогноза оценивался по независимым данным.

В целом качество работы модели по распознаванию классов ледового режима можно охарактеризовать как среднее: общая точность составляет 77 %. Средние значения $\text{precision} = 63 \%$, $\text{recall} = 62 \%$ и $\text{F1-score} = 63 \%$ показывают, что модель в сопоставимой степени подвержена как ложным срабатываниям, так и пропускам событий, обеспечивая сбалансированный, но требующий дальнейшего улучшения уровень классификации ледовых явлений. Архитектура гибридной нейросетевой модели (классификационный подход) приведена в табл. 1.

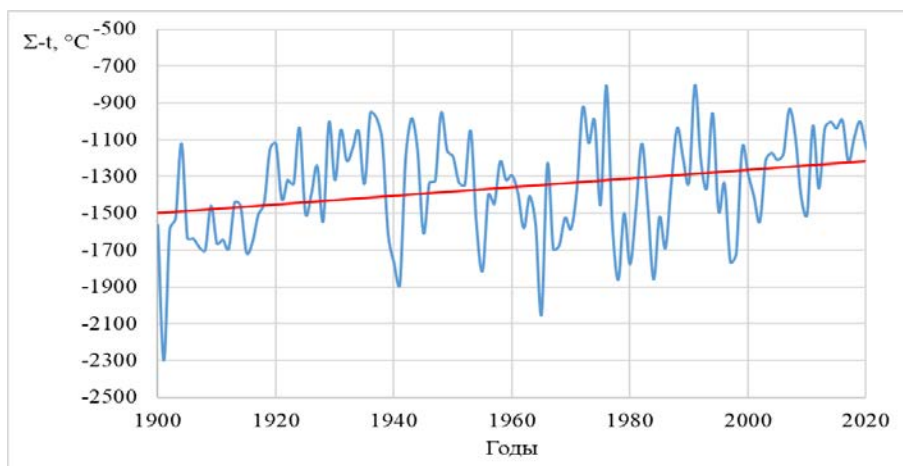


Рис. 3. Среднемноголетние суммы отрицательных температур воздуха Кольского полуострова.

Fig. 3. Average long-term sums of negative air temperatures on the Kola Peninsula.

Таблица 1. Архитектура нейросетевой модели типа XGBoost+CNN-GRU

Table 1. Architecture of the XGBoost+CNN-GRU neural network model

Слой	Параметры	Назначение слоя
XGBoost	Число деревьев 300, глубина деревьев 6, скорость обучения = 0.05	Обучение на исходных признаках; получение вероятностей принадлежности к классам
Конкатенация	–	Объединение нормализованных признаков с выходом XGBoost (4 признака)
Conv1D	32 фильтра, метод активации Relu	Выделение локальных закономерностей во временном ряду (например, всплесков температуры)
BatchNormalization	–	Стабилизация обучения, ускорение сходимости
GRU	Количество нейронов 64	Учет долгосрочных зависимостей и запоминание временной информации
Dropout	30 % отключаемых нейронов	Предотвращение переобучения путем случайного "выключения" нейронов
GRU	Количество нейронов 32	Углубленная обработка временного контекста и извлечение финального состояния
Dropout	30 % отключаемых нейронов	Регуляризация модели
Dense	Количество нейронов 16, метод активации Relu	Промежуточная нелинейная трансформация признаков
Dense	Количество нейронов 4, метод активации softmax	Финальная классификация по 4 классам ледового явления

Для сравнения регрессионного и классификационных подходов использованы средняя квадратической погрешности проверочных прогнозов (S). Методика считается допустимой для выпуска прогнозов, если погрешность проверочных прогнозов в 85 % случаев из их общего числа не превышает допустимую. Допустимая погрешность назначается исходя из средней заблаговременности прогнозов, которая для осенних ледовых явлений составляет 4 дня. Хорошей модель считается при соотношении $S \leq 3.0$, удовлетворительной при $S \leq 4.8$ [8]. Стоит отметить, что для оценки качества методик будет использоваться ненормированная S на число постоянных в прогностическом уравнении, так как построенные архитектуры имеют достаточно большое количество параметров.

Результаты прогноза дат появления первичных ледовых явлений приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты прогноза дат появления первичных ледовых явлений
Table 2. Results of forecasting the dates of occurrence of primary ice phenomena

Река – пост	XGBoost (регрессия)		XGBoost+CNN+GRU (классификация)	
	S	%4дня	S	%4дня
Полуравнинные реки				
р. Кола – 1429-й км Октябрьской ж. д.	2.1	100	4.5	78
р. Кица – ст. Лопарская	1.8	100	3.0	90
р. Поной – с. Краснощелье	1.6	100	1.8	100
р. Поной – с. Каневка	1.8	100	1.0	100
р. Варзуга – с. Варзуга	1.4	100	3.4	80
Озерные реки				
р. Туманная – пос. Туманный	2.3	90	6.2	80
р. Печа – с. Падун	1.8	100	4.3	78
р. Чаваньга – с. Чаваньга	1.4	100	3.8	78
р. Умба – исток	1.5	100	3.6	80
р. Умба – пор. Паялка	1.5	100	6.5	90
р. Ена – пос. Ена	1.7	100	2.1	90
р. Монча – г. Мончегорск	2.4	90	11.3	30
Горные реки				
р. Ура – с. Ура-Губа	1.8	100	1.9	100
р. Малая Белая – ст. Хибины	2.6	100	5.6	78
р. Юкспорйок – г. Кировск	2.4	100	15.6	22
р. Тумча – пос. Алакуртти	1.4	100	1.9	100

Наилучшие результаты показал регрессионный подход (табл. 3). По выбранным параметрам оценки модель, основанную на деревьях решений XGBoost, можно рекомендовать для прогноза первичных ледовых явлений для всех исследуемых водотоков.

Таблица 3. Архитектура модели градиентного бустинга XGBoost
Table 3. Architecture of the XGBoost gradient boosting model

Слой / блок	Параметры	Назначение слоя
Подготовка целевой переменной	Target_Date → число дней от 1 сентября соответствующего сезона	Преобразование дат наступления ледового явления в непрерывную регрессионную переменную (число дней до события)
Кодирование признака Post	OneHotEncoder(sparse=False, handle_unknown='ignore')	Преобразование категориального признака гидрологического поста в набор бинарных признаков
Формирование матрицы признаков X	Исключение Season, Target_Class, Target_Date; конкатенация числовых и one-hot признаков	Получение полного набора входных признаков для обучения модели
Деление на выборки по годам	Обучающая выборка: Season < 2010; тестовая выборка: Season ≥ 2010	Разделение данных во времени для имитации прогноза «на будущее» и корректной оценки обобщающей способности
Масштабирование признаков	StandardScaler (обучение по train, применение к train и test)	Нормализация числовых признаков, улучшение сходимости и стабильности обучения XGBoost
Модель XGBoost-регрессии	XGBRegressor (n_estimators=100, max_depth=4, learning_rate=0.1, eval_metric='mae', random_state=42)	Обучение градиентного бустинга по деревьям решений для прогноза числа дней до наступления ледового явления
Логирование обучения	eval_set = (train, test), вывод MAE по boosting-итерациям, график MAE	Контроль процесса обучения и выявление возможного переобучения по кривым ошибок на train и test
Постобработка предсказаний	Прогноз y_pred → календарные даты; расчёт ошибок в сутках, MAE, долей попаданий в интервалы	Оценка точности прогноза дат (в сутках) и характеристика распределения ошибок по величине
Метрики по классам ледовых явлений	Группировка по Target_Class; расчёт MAE и долей попаданий в интервалы для каждого класса	Анализ качества прогноза отдельно для разных типов ледовых явлений

Качество модели, основанной на классификационном подходе, для большинства рек можно оценить как удовлетворительное. Однако для выполнения прогноза осенних ледовых явлений данный подход можно рекомендовать только для рек Поной (посты Краснощелье и Каневка), Ена, Ура и Тумча.

Большие отличия между прогнозными и историческими данными могут возникнуть из-за временного запаздывания сумм отрицательных температур воздуха и появления первичных ледовых явлений. Подбор репрезентативных данных для части постов Кольского полуострова был затруднен доступностью данных. Кроме того, для улучшения качества моделей, в том числе классификационного подхода, следует рассмотреть расширенный список предикторов, включающий приращение отрицательных температур воздуха в явном виде, учет дней с оттепелью, количество дней с жидкими и твердыми осадками.

Выводы

Анализ данных показал, что большое влияние на формирование первичных ледовых явлений и установление ледостава оказывают локальные факторы, поскольку большинство рек Кольского полуострова относятся к малым водотокам. Принцип классификации участков рек по типу замерзания: полуравнинные, озерного типа и горные – позволил учесть эти факторы при разработке прогностических зависимостей.

Использование нейронных сетей на основе длительных рядов гидрологических и метеорологических наблюдений значительно повышает эффективность существующих методов прогнозирования параметров ледового режима рек Кольского полуострова.

Благодаря возможности включения большого числа предикторов становится возможным построение уникальных прогностических моделей для различных типов ледообразования, с учётом как естественной и антропогенной зарегулированности водотоков, так и морфологических особенностей русел, климатических изменений и других факторов.

Наиболее оправданным подходом для прогноза элементов ледового режима является регрессионный подход (метод градиентного бустинга XGBoost). Однако также следует более подробно рассмотреть классификационный подход с гибридной моделью, учитывающей нелинейные зависимости между предикторами и целевой переменной, и модели, учитывающие временные зависимости (LSTM, GRU, TCN и др.) для исследования паттернов изменения предикторов и целевой переменной во времени.

Заблаговременность прогноза первичных ледовых явлений, полученных с помощью моделей, которые разработаны на методах машинного обучения, соответствует заблаговременности прогнозов метеорологических параметров и составляет 4 дня. В контексте долгосрочного прогнозирования разработанные модели могут использоваться в рекомендательном режиме. Они позволяют получать прогноз появления классов ледовых

явлений для каждого дня интересующего периода, но полученные даты следует рассматривать как ориентировочные, а не как оперативный прогноз.

Полученные результаты являются частью диссертационного исследования и темы НИР 125022702938-5, в настоящее время проходят апробацию на сети Мурманского УГМС, а также являются частью исследования в рамках научного проекта № 03/2025-И Русского географического общества «Оценка изменений гидролого-гидрохимического режима водных объектов Кольского полуострова и прилегающих территорий под воздействием естественных и антропогенных факторов».

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам Мурманского УГМС за ценные советы и помощь в организации исследования.

Acknowledgments

The authors of the article express their gratitude to the staff of the Murmansk UGMS for valuable advice and assistance in organizing the study.

Список литературы

1. Агафонова С.А., Василенко А.Н., Мироненко А.А., Фролова Н.Л. Ледовый режим и его опасные проявления на реках Арктической зоны России // Ледовые и термические процессы на водных объектах России. Труды V Всеросс. конференции М.: Изд-во РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2016. С. 15-21.

2. Агафонова С.А., Фролова Н.Л., Василенко А.Н. и др. Ледовый режим и опасные гидрологические явления на реках Арктической зоны европейской территории России // Вестник Моск. ун-та. Серия 5. География. 2016. № 6. С. 41-49.

3. Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. Антропогенные и естественные изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек Российской Арктики // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 1. С. 14-31.

4. Баклагин В.Н. Зависимости характерных дат ледового режима Белого моря от температурного фона над его акваторией // Успехи современного естествознания. 2020. № 7-0. С. 55-60.

5. Банищикова Л.С., Банищikov А.А., Сумачев А.Э. Распространение зажоров и заторов льда на реке Варзуга // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН и 75-летию со дня рождения доктора биологических наук, профессора В.В. Никонова. 2019. С. 102-104.

6. Банищикова Л. С., Сумачев А. Э. Вариация температуры воздуха холодного периода на Кольском полуострове как фактор изменения ледового режима // Арктика: экология и экономика. 2021. Том 11, № 3. С. 397-405.

7. Банищикова Л.С., Сумачев А.Э., Бирюкова В.А., Канахин С.А. Ледовый режим реки Варзуга. Оценка их риска и негативных последствий // Сборник трудов VI Всероссийской конференции с международным участием «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития/MGO 2022», Санкт-Петербург, 14–15 декабря 2022 г. С. 28-31.

8. Бельчиков В.А., Борщ С.В., Павроз Ю.А., Романов А.В., Сильницкая М.И., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Современное состояние и перспективы совершенствования системы оперативного гидрологического прогнозирования в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. №. 4 (374). С. 184-202.

9. Бефани Н.Ф., Калинин Г.П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 390 с.

10. Василенко А.Н., Агафонова С.А., Фролова Н.Л. Исследования связи термического и ледового режимов рек Российской Арктики по данным многолетних наблюдений // Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)». Тверь, 2020. Т. 2 (3). С. 98101.

11. Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы. СПб.: РГТМУ, 2007. 436 с.

12. Георгиевский Ю.М. Краткосрочные и долгосрочные прогнозы ледовых явлений на реках, озерах и водохранилищах. Л.: ЛПИ, 1986. 50 с.

13. Крастынь Е.А. и др. Зимний режим приливных устьев рек Терского берега Белого моря // Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению». 2020. С. 1092-1097.

14. Ресурсы поверхностных вод СССР. Кольский полуостров Т. 1. Л: Гидрометеиздат, 1966–1970. 316 с.

15. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025622437 «Многолетние гидрометеорологические характеристики ледового режима рек и озер Кольского полуострова». Правообладатель: ФГБУ «Государственный гидрологический институт». Авторы: Канашин С.А., Банщикова Л.С. Заявл. 19.05.2025 г., опублик. 03.06.2025 г.

16. Смирнова Д.А. и др. Основные черты зимнего гидрологического режима приливных устьев рек Терского берега Белого моря на примере рек Умба и Кузрека // Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование» (MARESEDU-2020). 26-30 октября 2020 г. Том II (III). Тверь: ПолиПРЕСС, 2020. С. 94-97.

17. Фролова Н.Л. и др. Антропогенные и климатически обусловленные изменения стока воды и ледовых явлений рек Российской Арктики // Вопросы географии. 2018. № 145. С. 233-251.

18. Adli Zakaria M.N., Ahmed A.N., Abdul Malek M. et al. Exploring machine learning algorithms for accurate water level forecasting in Muda River, Malaysia. Heliyon. URL: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(23\)04897-1?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2405844023048971%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)04897-1?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2405844023048971%3Fshowall%3Dtrue)

19. Ayzel G.V. Deep neural networks in hydrology: the new generation of universal and efficient models // Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences. 2021. Vol. 66, no. 1. P. 5-18.

20. Chang W., Chen X., He Z., Zhou S.A Prediction Hybrid Framework for Air Quality Integrated with W-BiLSTM(PSO)-GRU and XGBoost Methods // Sustainability, 2023, vol. 15, no 22, pp. 16064. DOI: 10.3390/su152216064.

21. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016. P. 785-794. DOI: 10.1145/2939672.2939785.

22. Fan H., Zhao Y., Liu Z., Li D., Wang B. Flood flow prediction based on combined CNN-GRU-XGBoost model // ResearchGate. 2023. URL: https://www.researchgate.net/publication/372423866_Flood_flow_prediction_based_on_combined_CNN-GRU-XGBoost_model.

23. Madaeni F., Chokmani K., Lhissou R., Homayouni S. et al. Convolutional neural network and long short-term memory models for ice-jam predictions. URL: <https://doi.org/10.5194/tc-16-1447-2022>.

24. Kratzert F., Klotz D., Brenner C., Schulz K., Herrnegger M. Rainfall–runoff modelling using Long Short-Term Memory (LSTM) networks. URL: <https://doi.org/10.5194/hess-22-6005-2018>.

25. Huang X., Zhuang X., Tian F., Niu Z., Chen Y., Zhou Q., Yuan C. A Hybrid ARIMA-LSTM-XGBoost Model with Linear Regression Stacking for Transformer Oil Temperature Prediction // Energies. 2025. Vol. 18, no. 6. P. 1432. <https://doi.org/10.3390/en18061432>

26. Ougahi J.H., Rowan J.S. Enhanced streamflow forecasting using hybrid modelling integrating glacio-hydrological outputs, deep learning and wavelet transformation // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article 2762. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87187-1>.

27. Tran T.V., Peche A., Kringel R., Brömme K., Altfelder S. Machine Learning-Based Reconstruction and Prediction of Groundwater Time Series in the Allertal, Germany // *Water*. 2025. Vol. 17, no. 3. P. 433. <https://doi.org/10.3390/w17030433>

28. Wu Y., Ding Y., Feng J. SMOTE-Boost-based sparse Bayesian model for flood prediction // *J. Wireless Com Network*. 2020. Vol. 78. <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01689-2>

References

1. Agafonova S.A., Vasilenko A.N., Mironenko A.A., Frolova N.L. Ledovyj rezhim i ego opasnye projavlenija na rekah Arkticheskoj zony Rossii [Ice regime and its dangerous manifestations on the rivers of the Arctic zone of Russia]. *Ice and thermal processes on water bodies of Russia*. Proceedings of the V All-Russian Conf. Moscow: Publishing house of the Russian State Agrarian University – Moscow, Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 2016, pp. 15-21 [in Russ.].

2. Agafonova S.A., Frolova N.L., Vasilenko A.N. et al. Ledovyj rezhim i opasnye gidrologicheskie javlenija na rekah Arkticheskoj zony evropejskoj territorii Rossii [Ice regime and dangerous hydrological phenomena on the rivers of the Arctic zone of European Russia]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5. Geography]*, 2016, no. 6, pp. 41-49 [in Russ.].

3. Alekseevsky N.I., Magritsky D.V., Mikhailov V.N. Antropogennye i estestvennye izmenenija gidrologicheskijh ograničenij dlja prirodnopol'zovanija v del'tah rek Rossijskoj Arktiki [Anthropogenic and natural changes in hydrological constraints for nature management in the river deltas of the Russian Arctic]. *Vodnoe hozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie [Water Sector of Russia: problems, technologies, management]*, 2015, no. 1, pp. 14-31 DOI: 10.35567/1999-4508-2015-1-2 [in Russ.].

4. Baklagin V.N. Zavisimosti harakternyh dat ledovogo rezhima Belogo morja ot temperaturnogo fona nad ego akvatoriej [Dependence of characteristic dates of the White Sea ice regime on the temperature background above its water area]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya [Advances in modern natural science]*, 2020, no. 7-0, pp. 55-60 [in Russ.].

5. Bانشchikova L.S., Bانشchikov A.A., Sumachev A.E. Rasprostranenie zazorov i zatorov l'da na reke Varzuga [The spread of ice jams and ice dams on the Varzuga River]. *Environmental problems of the northern regions and ways to solve them*. Tezisy dokladov VII Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvjashhennoj 30-letiju Instituta problem promyshlennoj jekologii Severa FIC KNC RAN i 75-letiju so dnja rozhdenija doktora biologicheskijh nauk, professora V.V. Nikonova, 2019, pp. 102-104 [in Russ.].

6. Bانشchikova L.S., Sumachev A.E. Variacija temperatury vozduha holodnogo perioda na Kol'skom poluostrove kak faktor izmenenija ledovogo rezhima [Variation of air temperature during the cold period on the Kola Peninsula as a factor in changing the ice regime]. *Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: ecology and economy]*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 397-405 [in Russ.].

7. Bانشchikova L.S., Sumachev A.E., Biryukova V.A., Kanashin S.A. Ledovyj rezhim reki Varzuga. Ocenka ih riska i negativnyh posledstvij [Ice regime of the Varzuga River. Assessment of their risk and negative consequences]. VI All-Russian Conference with international participation "Hydrometeorology and Ecology" / MGO 2022, Saint Petersburg, December 14–15, 2022, pp. 28-31 [in Russ.].

8. Belchikov V.A., Borsch S.V., Pavroz Yu.A., Romanov A.V., Silnitskaya M.I., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Sovremennoe sostojanie i perspektivy sovershenstvovanija sistemy operativnogo gidrologicheskogo prognozirovanija v Gidrometcentre Rossii [Current state and prospects for improving the operational hydrological forecasting system in the Hydrometeorological Center of Russia]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 74, no. 4, pp. 184-202 [in Russ.].

9. Befani N.F., Kalinin G.P. Uprazhnenija i metodicheskie razrabotki po gidrologicheskim prognozam [Exercises and methodological developments on hydrological forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1983. 390 p. [in Russ.].

10. Vasilenko A.N., Agafonova S.A., Frolova N.L. Issledovaniya svjazi termicheskogo i ledovogo rezhimov rek Rossijskoj Arktiki po dannym mnogoletnijh nabljudenij [Studies of the rela-

tionship between thermal and ice regimes of rivers in the Russian Arctic based on long-term observations]. Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference "Marine Research and Education (MARESEDU-2020)". Tver, 2020, vol. 2 (3), pp. 98-101 [in Russ.].

11. *Georgievskiy Yu.M., Shanochkin S.V.* Hidrologicheskie prognozy [Hydrological forecasts]. Saint Petersburg, RSHU Publ., 2007, 436 p. [in Russ.].

12. *Georgievskiy Yu.M.* Kratkosrochnye i dolgosrochnye prognozy ledovyh javlenij na rekah, ozerah i vodohranilishhah [Short-term and long-term forecasts of ice phenomena on rivers, lakes and reservoirs]. Leningrad, LPI Publ., 1986, 50 p [in Russ.].

13. *Krastyn E.A. et al.* Zimnij rezhim prilivnyh ust'ev rek Terskogo berega Belogo morja [Winter regime of tidal estuaries of the rivers of the Tersky coast of the White Sea]. Sbornik dokladov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii pamjati vydajushhegosja russkogo uchenogo Jurija Borisovicha Vinogradova «Chetvertye Vinogradovskie chtenija. Hidrologija: ot poznaniya k mirovozzreniju», 2020, pp. 1092-1097 [in Russ.].

14. Resursy poverhnostnyh vod SSSR. Kol'skij poluostrov. T. 1 [Surface Water Resources of the USSR. Kola Peninsula. Vol. 1]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1966-1970, 316 p. [in Russ.].

15. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh № 2025622437 «Mnogoletnie gidrometeorologicheskie harakteristiki ledovogo rezhima rek i ozer Kol'skogo poluostrova» Certificate of state registration of database No. 2025622437 "Long-term hydrometeorological characteristics of the ice regime of rivers and lakes of the Kola Peninsula". Copyright holder: Federal State Budgetary Institution "State Hydrological Institute". Authors: Kanashin S.A., Banshchikova L.S, declared 19.05.2025, published 03.06.2025 [in Russ.].

16. *Smirnova D.A. et al.* Osnovnye cherty zimnego gidrologicheskogo rezhima prilivnyh ust'ev rek Terskogo berega Belogo morja na primere rek Umba i Kuzreka [Main features of the winter hydrological regime of tidal estuaries of the rivers of the Tersky coast of the White Sea on the example of the Umba and Kuzreka rivers]. Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference "Marine Research and Education (MARESEDU-2020)". Tver, 2020, vol. 2 (3), pp. 98-101[in Russ.].

17. *Frolova N.L. et al.* Antropogennye i klimaticheski obuslovlennye izmenenija stoka vody i ledovyh javlenij rek Rossijskoj Arktiki [Anthropogenic and climate-induced changes in water runoff and ice phenomena of rivers in the Russian Arctic]. *Voprosy geografii [Questions of geography]*, 2018, no. 145, pp. 233-251 [in Russ.].

18. *Adli Zakaria M.N., Ahmed A.N., Abdul Malek M. et al.* Exploring machine learning algorithms for accurate water level forecasting in Muda River, Malaysia. *Heliyon*. URL: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(23\)04897-1?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2405844023048971%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)04897-1?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2405844023048971%3Fshowall%3Dtrue)

19. *Ayzel G.V.* Deep neural networks in hydrology: the new generation of universal and efficient models. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2021, vol. 66, no. 1, pp. 5-18.

20. *Chang W., Chen X., He Z., Zhou S.* A Prediction Hybrid Framework for Air Quality Integrated with W-BiLSTM(PSO)-GRU and XGBoost Methods. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no 22, pp. 16064. DOI: 10.3390/su152216064.

21. *Chen T., Guestrin C.* XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2016, pp. 785-794. DOI: 10.1145/2939672.2939785.

22. *Fan H., Zhao Y., Liu Z., Li D., Wang B.* Flood flow prediction based on combined CNN-GRU-XGBoost model. *ResearchGate*. 2023. URL: https://www.researchgate.net/publication/372423866_Flood_flow_prediction_based_on_combined_CNN-GRU-XGBoost_model.

23. *Madaeni F., Chokmani K., Lhissou R., Homayouni S. et al.* Convolutional neural network and long short-term memory models for ice-jam predictions. URL: <https://doi.org/10.5194/tc-16-1447-2022>.

24. Kratzert F., Klotz D., Brenner C., Schulz K., Herrnegger M. Rainfall–runoff modelling using Long Short-Term Memory (LSTM) networks. URL: <https://doi.org/10.5194/hess-22-6005-2018>.
25. Huang X., Zhuang X., Tian F., Niu Z., Chen Y., Zhou Q., Yuan C. A Hybrid ARIMA-LSTM-XGBoost Model with Linear Regression Stacking for Transformer Oil Temperature Prediction. *Energies*, 2025, vol. 18, no. 6, pp. 1432. <https://doi.org/10.3390/en18061432>
26. Ougahi J.H., Rowan J.S. Enhanced streamflow forecasting using hybrid modelling integrating glacio-hydrological outputs, deep learning and wavelet transformation. *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, article 2762. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87187-1>.
27. Tran T.V., Peche A., Kringel R., Brömme K., Altfelder S. Machine Learning-Based Reconstruction and Prediction of Groundwater Time Series in the Allertal, Germany. *Water*, 2025, vol. 17, no. 3, pp. 433. <https://doi.org/10.3390/w17030433>
28. Wu Y., Ding Y., Feng J. SMOTE-Boost-based sparse Bayesian model for flood prediction. *J. Wireless Com Network*, 2020, vol. 78. <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01689-2>

Поступила 15.10.2025; принята в печать 17.03.2026.
Submitted 15.10.2025; accepted for publication 17.03.2026.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ**журнала «Гидрометеорологические исследования и прогнозы»**

1. В журнале публикуются статьи по проблемам современных исследований в области теории и практики гидрометеорологического прогнозирования. Статья должна быть оригинальным законченным научным исследованием, в ней рекомендуется особо подчеркнуть научный вклад автора.

Согласно этике научных публикаций, авторы не должны допускать дублирования публикаций, предоставлять в журнал рукопись, которая была отправлена в другой журнал и находится на рассмотрении, а также статью, уже опубликованную в другом журнале.

2. В целях обеспечения качества публикуемых материалов и соблюдения авторских прав, все поступающие в редакцию журнала статьи проходят проверку на плагиат (наличие заимствований) через систему «*Antiplagiat*» и только после этого отправляются на рецензирование.

3 Статьи, поступающие в редакцию журнала, подлежат обязательному одностороннему слепому *рецензированию*. Порядок рецензирования рукописей представлен на сайте: <http://www.meteoinfo.ru/review-order>.

4. Статьи должны быть оформлены в строгом соответствии с изложенными ниже требованиями. Не соответствующие требованиям рукописи будут возвращены авторам.

5. В комплект статьи должны входить:

- основной текст статьи с заглавием статьи на русском и английском языках;
- индекс УДК, соответствующий теме статьи;
- фамилии и инициалы всех авторов (полностью). Для группы авторов необходимо указать, с кем вести переговоры и переписку;
- аффилиация (организация и ее местонахождение) для всех авторов. Автор может указать в аффилиации более одной (2–3) организации с условием, что такая множественная аффилиация при приведении описываемых результатов научных исследований полностью оправдана и достоверна;
- текст авторского резюме (далее – аннотация) на русском и английском языках;
- ключевые слова на русском и английском языках;
- иллюстративный материал в виде отдельных файлов в соответствии с нижеприведенными требованиями;
- названия таблиц и подрисуночные подписи на русском и английском языках;
- акт(ы) экспертизы (1 экз.).

6. *Структура статьи* обычно включает введение с постановкой проблемы и указанием актуальности, цели и задачи, методы, результаты, заключение. В конце статьи могут быть приведены благодарности лицам, оказавшим помощь в подготовке статьи, дана ссылка на номера грантов на выполнение работы. *Благодарности даются на русском, а затем на английском языках.*

Объем статьи – до 20 стр. текста (через 1,5 интервала), включая таблицы, рисунки и список литературы. Объем заказных статей определяется редколлегией.

Текст набирается в формате Word шрифтом Times New Roman 12 кеглем на листе форматом А4 с полями: нижнее, верхнее и левое – 25 мм, правое – 15 мм. Выравнивание по ширине. Абзацный отступ 1 см. Не допускается формирование

абзацкого отступа с помощью пробелов и табуляции. Все слова внутри абзаца разделяются одним пробелом.

Подзаголовки набираются отдельной строкой жирным шрифтом; могут быть пронумерованы или без нумерации (на усмотрение авторов).

7. Для всех журналов без исключения существуют требования, предъявляемые зарубежными базами данных к *заглавиям* статей:

- заглавия научных статей должны быть информативными (Web of Science это требование рассматривает в экспертной системе как одно из основных);

- в заглавиях статей можно использовать только общепринятые сокращения;

- в переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен, приборов и др. объектов;

- в названиях не используется непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам (это также касается аннотаций и ключевых слов).

При формулировке названия публикации, составлении аннотации, выборе ключевых слов необходимо помнить, что именно эта часть направляется в базы данных и должна представлять интерес и быть понятной как российским читателям, так и зарубежному научному сообществу.

8. Аффiliation в статьях должна быть представлена так, чтобы правильно идентифицировать автора и исключить вероятность потери публикаций авторов, имеющих распространенную фамилию. Поэтому важно придерживаться унифицированного названия организации, как правило, зафиксированного в уставе организации и представленного на сайте организации.

9. Обязательные требования к *аннотации*:

- аннотация должна быть информативной (не содержать общих слов),

- содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований);

- в аннотации автор должен кратко представить результаты своей работы. Поэтому одним из проверенных вариантов аннотации является краткое повторение в ней структуры статьи, включающей введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение;

- аннотация должна содержать значимые слова из текста статьи и использовать техническую (специальную) терминологию дисциплины. Должна быть написана в форме активного залога: «исследование показало».

В требованиях зарубежных издательств к статьям на английском языке указывается на объем аннотации в размере 100-200 слов (по ГОСТу – 850 знаков, не менее 10 строк). В тексте английской аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций (не применимых в научном английском языке).

11. Ключевые слова должны

- расширять возможности нахождения статьи средствами поисковой системы;

- отражать основное содержание статьи, предметную область исследования;

- выстраиваться от общего к частному;

- включать 5–10 понятий.

12. В «традиционном» списке источников на языке оригинала описание всех источников (и русскоязычных, и иностранных) дается в соответствии с правилами российских ГОСТов. Список *литературы* должен быть пронумерован и

упорядочен по алфавиту. Фамилии выделяются курсивом, пробел между именем и отчеством не ставится. В списке литературы приводятся все авторы, участвовавшие в написании той или иной работы.

Для списка литературы на латинице (*References*) не применимы правила российского ГОСТа, поскольку используемые в нем знаки не воспринимаются зарубежными системами и ведут к ошибкам и потере данных. Подробное описание оформления списка литературы на латинице представлено на сайте журнала (<http://journal.meteoinfo.ru>; <https://meteoinfo.ru/proceedings>).

12. Размерность всех физических величин следует указывать в системе единиц СИ. Обозначения единиц физических величин набирают прямым шрифтом (Па, Вт/м², Дж/(кг·К) и т. д.). Между цифрой и единицей измерения вставляется один пробел, например, 5 м/с, 3 %.

Пределы величин приводятся следующим образом: 17–20 мм, от 17 до 20 мм. Кавычки («...»). Не допускается использовать дефис (-) вместо знака тире (–); цифры 0 и буквы О в надстрочном написании в качестве символа градуса.

13. *Таблицы* с заголовками размещаются на отдельных страницах после основного текста статьи. Ссылка на таблицу в тексте: в табл. 1. Одновременное использование таблиц и графиков (рисунков) для изложения одних и тех же результатов не допускается. Таблицы следует создавать в режиме «Таблица» (Вставка – Таблица). Ширина таблицы не должна быть больше полосы набора текста (книжной или альбомной ориентации). Кегль 11.

Оформление заголовка таблицы:

Таблица 1. Название таблицы

14. *Рисунки* должны быть представлены на отдельных страницах после основного текста статьи. В текст рисунки не вставлять. Ссылка на рисунок в тексте: на рис. 1.

Рисунки также должны быть подготовлены в отдельных файлах в графических форматах .jpg, .tif (для возможного их редактирования), должны быть четкими, с учетом последующего уменьшения. Все надписи на картах, рисунках, схемах, диаграммах должны быть на русском языке.

Оформление подрисуночной подписи (11 кегль):

Рис. 1. Название рисунка.

15. *Формулы* набираются только с использованием редакторов формул Microsoft MathType или Equation Editor и имеют следующие размеры: обычный – 12, крупный индекс – 8, мелкий индекс – 6, крупный символ – 24, мелкий символ – 12. Латинские и греческие буквы – курсив; цифры – прямые. Возможно представление простых формул в тексте (не занимающих отдельную строку и не содержащих дробей) без редактора формул.

16. Плата с авторов за публикацию рукописей не взимается.

17. Авторы должны ознакомиться и следовать этике научных публикаций, размещенной на сайте издания <https://meteoinfo.ru/ethics-scientific-publications>

Гидрометеорологические исследования и прогнозы

№ 1 (399)

Под редакцией
д-ра геогр. наук Е.С. Нестерова

Издатель: ФГБУ «Гидрометцентр России»
Адрес: 123376, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 13, стр. 1
Телефон: (499) 252-34-48
e-mail: hmc@metcom.ru
www.meteoinfo.ru

Подписано в печать 02.04.2025. Формат 70×100/16
Печать офсетная. Печ. л. 12. Тираж 115 экз. Заказ № 0268
Отпечатано в типографии
ООО «Типография АМА-ПРЕСС»
107392, г. Москва, Зельев пер., дом 3

Подписной индекс журнала по каталогу АО «Почта России» – ПП976



ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации»