

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 84

Научно-теоретический журнал

Издается с октября 2005 года

Выходит 4 раза в год

ISSN 3034-4190

Санкт-Петербург
РГГМУ
2026

УДК 001(051.2)«540.1»
ББК 72я5

Гидрометеорология и экология. № 84. Научно-теоретический журнал. Санкт-Петербург : РГГМУ, 2026. 132 с.

Представлены статьи по наиболее актуальным современным проблемам изучения природной среды: изменение климата в региональном и глобальном масштабах; мониторинг, моделирование и прогнозирование физических процессов в атмосфере, водах суши и морской среде; влияние антропогенной деятельности на разнообразные процессы в биосфере, атмосфере и гидросфере Земли. Материал сгруппирован по специальностям. В разделе «Хроника» освещены события жизни университета.

Журнал предназначен для ученых, широкой категории исследователей природной среды, а также аспирантов и студентов, обучающихся по соответствующим специальностям.

Редакционный совет:

Михеев В. Л., канд. юрид. наук, доцент, ректор РГГМУ — *председатель совета*

Агафонов Г. И., д-р техн. наук, академик РАН, председатель совета директоров холдинговой компании «Пигмент»; **Анри де Люмле**, PhD, проф., член-корр. Французской академии наук (Франция); **Камбаров М. А.**, канд. юрид. наук, вице-президент Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»; **Квинт В. Л.**, д-р экон. наук, проф., главный научный сотр. Центрального экономико-математического института РАН; **Кулешов Ю. В.**, д-р техн. наук, проф., зам. начальника Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского по учебной и научной работе; **Орыщенко А. С.**, д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН, зав. кафедрой СПбПУ; **Поздняков Ш. Р.**, д-р геогр. наук; **Сальников В. Г.**, д-р геогр. наук, проф., декан ф-та географии и природопользования Казахского национального университета им. Аль-Фараби; **Сильников М. В.**, д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН, директор Института военно-технического обучения и безопасности СПбПУ; **Федоров М. П.**, д-р техн. наук, проф., академик РАН, СПбПУ; **Холматжанов Б. М.**, д-р геогр. наук, проф. (Узбекистан).

Редакционная коллегия:

Малинин В. Н., д-р геогр. наук, проф. — *главный редактор*

Кондратьев С. А., д-р физ.-мат. наук — *зам. главного редактора*

Гайдукова Е. В., канд. техн. наук, доцент — *отв. секретарь*

Алексеев Г. В., д-р геогр. наук, проф.; **Белоненко Т. В.**, д-р геогр. наук, проф.; **Биденко С. И.**, д-р техн. наук, проф.; **Блиновская Я. Ю.**, д-р техн. наук, проф.; **Вильфанд Р. М.**, д-р техн. наук, проф.; **Вуглинский В. С.**, д-р геогр. наук, проф.; **Гриценко В. А.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Дмитриев В. В.**, д-р геогр. наук, проф.; **Ермаков Д. М.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Зиновьев А. Т.**, д-р техн. наук; **Иванов В. В.**, д-р физ.-мат. наук; **Костяной А. Г.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Кудрявцев В. Н.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Курашов Е. А.**, д-р биол. наук, проф.; **Лобанов В. А.**, д-р техн. наук, проф.; **Мушкет И. И.**, д-р юрид. наук, проф.; **Прошутинский А. Ю.**, д-р физ.-мат. наук (США); **Репина И. А.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Румянцев В. А.**, д-р геогр. наук, проф., академик РАН; **Рябченко В. А.**, д-р физ.-мат. наук; **Смышляев С. П.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Тимофеев Ю. М.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Филатов Н. Н.**, д-р геогр. наук, проф., член-корр. РАН; **Чернышков П. П.**, д-р геогр. наук, проф.; **Шапрон Б.**, PhD, ведущий ученый Института морских исследований IFREMER (Франция); **Щукин Г. Г.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Якушев Д. И.**, д-р техн. наук, проф. СПбУ МВД РФ.

Журнал является продолжением журнала «Ученые записки РГГМУ», который был основан в 2005 г. В 2010 г. он вошел в Перечень ВАК, а в январе 2020 г. переименован в журнал «Гидрометеорология и экология».

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство ПИ № ФС77-79574 от 27.11.2020 г.

Специализация: метеорология, гидрология, океанология, геоэкология, лимнология, геоинформатика, геофизика, общественные и гуманитарные науки.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Журнал входит в Перечень ВАК по направлению науки о Земле и окружающей среде, имеет категорию K2, индексируется в системе CrossRef и включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Национальной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru>). Полнотекстовые версии опубликованных статей в виде pdf-файлов размещаются в Интернете для свободного доступа на сайте журнала <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/> сразу же после его выхода.

Журнал включен в Белый список, уровень 3, сентябрь 2025 г.

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Адрес редакции: Россия, 192007, Санкт-Петербург, Вороневская ул., д. 79. Тел.: (812) 633-01-88 (доб. 421), e-mail: rio@rshu.ru.

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2026

© Авторы публикаций, 2026

ISSN 3034-4190

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

THE FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL
INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION
“RUSSIAN STATE HYDROMETEOROLOGICAL UNIVERSITY”

HYDROMETEOROLOGY AND ECOLOGY

№ 84

A theoretical research journal

Published since October, 2005
4 issues a year

ISSN 3034-4190

St. Petersburg
RSHU
2026

UDC 001(051.2)«540.1»
LBC 72я5

Hydrometeorology and Ecology. No. 84. St. Petersburg : RSHU Publishers, 2026. 132 p.

The Journal contains articles on the most relevant contemporary problems of studying the environment: climate change in regional and global scales; monitoring, modeling and forecasting of physical processes in the atmosphere, inland and ocean waters; influence of anthropogenic activity on various processes in the biosphere, atmosphere and hydrosphere of the Earth. The material is grouped by specialty. The "Chronicle" section covers the events of the University life.

The Journal is intended for scientists, a broad category of environmental researchers, as well as post-graduate and graduate students of these specialties.

The Editorial Board:

Mikheev V. L., PhD in Juridical Sciences, Associate Professor, Rector of RSHU — *Chairman*
Agafonov G. I., Grand PhD in Engineering, Academician of the Russian Academy of Sciences, Board Chairman of "Pigment" holding company; **Fedorov M. P.**, Grand PhD in Engineering, Academician of the Russian Academy of Sciences, President of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; **Henry de Lumley**, PhD, Professor, Corresponding Member of the Academy of Sciences, France; **Kambolov M. A.**, PhD in Juridical Sciences, Vice-president of the National Research Center «Kurchatov Institute»; **Kuleshov Iu. V.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Vice-president of Mozhaisky Military Space Academy for academic affairs and research; **Kholmatzhanov B. M.**, Grand PhD in Geography, Professor, Uzbekistan; **Kvint V. L.**, Grand PhD in Economics, Professor, leading researcher of the RAS Central Economic and Mathematical Institute; **Otryshchenko A. S.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of Department at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; **Pozdnyakov Sh. R.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Salnikov V. G.**, Grand PhD in Geography, Professor, Dean of Geography and Natural Management Faculty of Al-Farabi Kazakh National University; **Silnikov M. V.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of Military-Technical Education and Security Institute of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Editors:

Malinin V. N., Grand PhD in Geography, Professor — *Editor in Chief*

Kondratyev S. A., Grand PhD in Physics and Mathematics — *Deputy Editor in Chief*

Gaidukova E. V., PhD in Engineering — *Executive editor*

Alekseev G. V., Grand PhD in Geography, Professor; **Belonenko T. V.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Bidenko S. I.**, Grand PhD in Engineering sciences, Professor; **Chernyshkov P. P.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Dmitriev V. V.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Ermakov D. M.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Filatov N. N.**, Grand PhD in Geography, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; **Gritsenko V. A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Ivanov V. V.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Kostyanov A. G.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Kudriavtsev V. N.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Kurashov E. A.**, Grand PhD in Biology, Professor; **Lobanov V. A.**, Grand PhD in Engineering, Professor; **Mushket I. I.**, Grand PhD in Juridical Sciences, Professor; **Proshutinskii A. Iu.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, USA; **Repina I. A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Rumyantsev V. A.**, Grand PhD in Geography, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences; **Ryabchenko V. A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Smyshlyaev S. P.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Timofeev Iu. M.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Shapron B.**, PhD, leading scientist of French Research Institute for Exploitation of the Sea IFREMER (France); **Shechukin G. G.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Vilfand R. M.**, Grand PhD in Engineering, Professor; **Vuglinsky V. S.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Zinoviev A. T.**, Grand PhD in Engineering Sciences; **Yakushev D. I.**, Grand PhD in Engineering, Professor; SPU MI.

The Journal is continuation of the Journal "Proceedings of RSHU", founded in 2005. In 2010 it was included in the List of the Higher Attestation Commission, and in January 2020 it was renamed into the Journal "Gidrometeorologiya i ekologiya".

The Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media.

Certificate ПИ № ФЧ77-79574 of November 11, 2020.

Area of expertise: meteorology, hydrology, oceanology, geocology, limnology, geoinformatics, geophysics, social sciences and humanities.

Editorial Board's point of view may not be concurrent with opinion of the authors.

The Journal included in the List of the Higher Attestation Commission in the direction of science of the Earth, has category K2 and the environment is indexed in the CrossRef and RSCI systems and is included in the "Russian Science Citation Index" (RSCI) database, placed on the National Electronic Library platform (<http://elibrary.ru>). Full-text versions of published articles as pdf-files are posted on the Internet for free access on the Journal's website <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/> immediately after its publication, afterwards being available on the National electronic library website (<http://elibrary.ru>).

The journal is included in Whitelist, level 3, September 2025.

Any use of this Journal in whole or in part, must include the customary bibliographic citation.

Editorial Office address: 192007, Voronezhskaya str., 79, St. Petersburg, Russia. Phone: (812) 633-01-88 (421), e-mail: rio@rshu.ru.

© Russian State Hydrometeorological University (RSHU), 2026
© Authors of publications, 2026

ISSN 3034-4190

Содержание

Климатология. В порядке дискуссии

- Б. Г. Шерстюков, Р. С. Салугашвили.* Лесные пожары в условиях потепления климата и метеорологические условия возгорания леса с учетом сезонных особенностей. 407

Океанология

- П. И. Бухарицин, И. В. Головачев.* Проявление солянокупольной тектоники в мелководной северной части Каспийского моря 425
- Д. В. Дешова, С. М. Гордеева.* Роль атмосферы в тепловом балансе поверхности юго-восточной части Баренцева моря 438
- А. А. Дидов, П. А. Файман, М. В. Будянский, Т. В. Белоненко.* Совместный анализ данных SWOT и модели ROMS для изучения субмезомасштабных процессов на примере залива Посыета в Японском море 455
- А. С. Кровнин, С. П. Мельников, А. В. Датский, Г. П. Мурый.* Влияние крупномасштабных изменений в атмосфере и океане на состояние запасов тресковых рыб Северного полушария. Часть II. Северная часть Тихого океана 473

Гидрология

- Г. Т. Фрумин, Е. С. Васильева, Н. Л. Болотова.* Оценка динамики разнообразия рыбных запасов озера Ильмень 488

Геоэкология

- Е. А. Петрова, А. В. Зязя, В. И. Петухов, А. В. Кирьянов, Я. Ю. Блиновская, П. П. Зацепина.* Оценка загрязнения вод и донных отложений бухты Новик (залив Петра Великого, Японское море) тяжелыми металлами 498

Геоинформатика

- И. Д. Болховский, С. И. Биденко.* Геоинформационная методика оценки качества нейросетевых прогнозов морского льда на примере акватории Карского моря 510

Хроника

- А. О. Волгушева.* Иван Папанин: эпоха становления от первых морских экспедиций до управления Главсевморпути 523

Contents

Climatology. Discussion

- B. G. Sherstyukov, R. S. Salugashvili.* Forest fires in conditions of climate warming and meteorological conditions of forest ignition, taking into account seasonal features 407

Oceanology

- P. I. Bukharitsin, I. V. Golovachev.* The manifestation of salt dome tectonics in the shallow northern part of the Caspian Sea 425
- D. V. Deshova, S. M. Gordeeva.* The role of the atmosphere in the heat balance of the surface of the south-eastern part of the Barents Sea. 438
- A. A. Didov, P. A. Fayman, M. V. Budyansky, T. V. Belonenko.* Joint analysis of SWOT data and ROMS model for studying submesoscale processes using the example of Posyet Bay in the Sea of Japan 455
- A. S. Krovnin, S. P. Melnikov, A. V. Datsky, G. P. Moury.* Impact of the large-scale variations in the atmosphere and ocean on state of gadid stocks in the Northern Hemisphere. Part 2. The North Pacific 473

Hydrology

- G. T. Frumin, E. S. Vasilyeva, N. L. Bolotova.* Assessment of the dynamics of diversity of fish population of lake Ilmen. 488

Geoecology

- E. A. Petrova, A. V. Zyazya, V. I. Petukhov, A. V. Kiryanov, Y. Yu. Blinovskaya, P. P. Zatsepina.* Assessment of water and bottom sediment pollution in Novik Bay (Peter the Great Bay, Sea of Japan) by heavy metals 498

Geoinformatics

- I. D. Bolkhovskiy, S. I. Bidenko.* Geoinformation Methodology for Quality Assessment of Neural Network Sea Ice Forecasts: A Case Study of the Kara Sea 510

- Chronicle** 523

Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 407—424.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(84):407—424.

КЛИМАТОЛОГИЯ. В ПОРЯДКЕ ДИСКУССИИ

Научная статья

УДК [630.43:551.583]«321/324»

doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-407-424

Лесные пожары в условиях потепления климата и метеорологические условия возгорания леса с учетом сезонных особенностей

Борис Георгиевич Шерстюков, Руслан Сергеевич Салугашвили

Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации — Мировой центр данных,
Обнинск, Россия, Boris_sher@mail.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается межгодовая изменчивость количества фактических лесных пожаров в условиях потепления климата под действием различных факторов. По данным многолетних наблюдений службы лесоохраны России и с использованием материалов Национальной базы данных по лесному хозяйству Канады, показано, что в течение последних двух десятилетий в условиях глобального потепления сокращается общее количество пожаров в лесах самых обширных лесных массивов Евразии и Северной Америки. Тенденция сокращения количества лесных пожаров согласуется с тенденцией ослабления комплекса пожароопасных метеорологических условий в этих регионах по индексу Нестерова.

Ключевые слова: изменения климата, лесные пожары, температура, осадки, влажность, сезоны.

Для цитирования: Шерстюков Б. Г., Салугашвили Р. С. Лесные пожары в условиях потепления климата и метеорологические условия возгорания леса с учетом сезонных особенностей // Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 407—424. doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-407-424.

CLIMATOLOGY. DISCUSSION

Original article

Forest fires in conditions of climate warming and meteorological conditions of forest ignition, taking into account seasonal features

Boris G. Sherstyukov, Ruslan S. Salugashvili

All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information — World Data Center, ,
Obninsk, Russia

Summary: Based on observations of actual forest fires in Russia since 1985 by the State Forest Service, current long-term trends in the number of forest fires, the area of forest fires, and trends in the complex

meteorological conditions conducive to forest fires are described. The climate of the past several decades has created favorable conditions for forest fires in many regions; the risk of forest fires remains high, but no increase in this risk due to global warming has been detected.

Observations of actual forest fires show that the number of fires in Russia peaked in 2002. Since 2002, the overall number of forest fires in Russia has been decreasing. On the North American continent, Canada, with its vast forested areas, experienced its greatest number of forest fires in 1998. Since then, the number of forest fires in Canada has been declining year by year. An analysis of annual changes in the number of fire-danger days with a Nesterov index of $G > 1000$ confirms that in the main forested regions of Siberia and the Far East, meteorological conditions for forest fire potential have weakened in the context of global warming since 2002. Multifactorial forest fire conditions create more complex consequences for long-term changes in fire hazard than anticipated by conventional understanding of global warming. Established trends in the reduction of forest fires have been reported in publications by other authors after processing fire observation data from 30 countries. However, in some countries, the number of forest fires is increasing.

Conclusions from earlier publications about the current increase in forest fires due to global warming are inconsistent with reality. The number of fires is steadily declining in most regions of the Northern Hemisphere. The long-term trend of decreasing forest fire incidence is further compounded by shorter-term interannual fluctuations in forest fire incidence, which, during certain periods of short-term intensification, create the erroneous impression that forest fire incidence is increasing due to global warming. Long-term fluctuations in forest fire incidence and extent are the result of long-term fluctuations in a complex set of meteorological parameters and additional natural conditions that change with climate change.

Keywords: climate change, forest fires, temperature, precipitation, humidity, seasons.

For citation: Sherstyukov B. G., Salugashvili R. S. Forest fires in conditions of climate warming and meteorological conditions of forest ignition, taking into account seasonal features *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(84):(407—424). doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-407-424. (In Russ.).

Введение

Лесные пожары являются мощным фактором, влияющим на состояние лесов. Пожары — основная причина их гибели. Пожары возникают в благоприятных метеорологических условиях при появлении источника огня. Ежегодно почти сразу после схода снежного покрова во многих регионах начинают формироваться метеорологические условия, способствующие возгоранию леса. Условием для начала лесных пожаров весной после схода снежного покрова является, в первую очередь, появление открытой лесной подстилки в виде прошлогодней сухой травы. В последующие несколько недель появление листвы на деревьях и зеленой травяной растительности на почве ослабляют способность леса к возгоранию и изменяют зависимость возгорания от соотношения температуры воздуха, атмосферных осадков и влажности воздуха.

В связи с глобальным потеплением климата в публикациях последних двух—трех десятилетий высказывались противоречивые оценки наблюдаемых и ожидаемых в будущем тенденций изменения опасности лесных пожаров.

Так, в четвертом национальном сообщении Российской Федерации, подготовленном в 2006 г. в соответствии с Киотским протоколом об изменении климата, указано: «Достаточно вероятным последствием изменения климата является возможность увеличения лесных пожаров. Рост их интенсивности будет происходить при повышении температуры воздуха и засушливости» [1]. Подобный упрощенный подход в трактовке метеорологических условий опасности лесных пожаров

при потеплении климата без учета всего комплекса метеорологических условий и региональных особенностей формирования условий возгорания леса получил широкое распространение во многих публикациях и привел к ошибочным прогнозам ожидаемых в будущем изменений пожарной обстановки в лесах Российской Федерации (РФ) [1—3].

В шестом национальном сообщении РФ, подготовленном в 2013 г. в рамках Киотского протокола, сказано: «В целом по России в 1985—2008 гг. количество лесных пожаров возрастало» [2]. А по данным наблюдений за фактическими лесными пожарами уже было заметно, что после 2002 г. количество лесных пожаров в РФ не возрастало. В 2017 г. без учета новых полученных данных наблюдений за пожарами в [3] был повторен вывод о дальнейшем увеличении количества происходящих лесных пожаров в связи с потеплением климата. Однако, по данным официальных наблюдений за пожарами, было очевидно, что их число на территории РФ после 2002 г. продолжало сокращаться и в 2013—2016 гг. оказалось в два раза меньше, чем в 2002 г. и даже меньше, чем наблюдалось когда-либо ранее, начиная с 1985 г.

Важной характеристикой является площадь лесов, пройденная огнем. В [4] в разделе о лесных пожарах авторы В. Н. Коротков и А. В. Константинов ошибочно сообщают: «отмечается статистически значимая положительная тенденция увеличения площадей лесных пожаров» со ссылкой на тезисы доклада С. А. Барталева [5]. Но в этих тезисах [5] написано о сокращении площади лесов страны в 2003—2017 гг. и предполагается связь этого сокращения с лесными пожарами без каких-либо статистических оценок значимости.

Неслучайно после таких публикаций в работе [6] без связи с реальностью сообщается, что на основе анализа официальных данных Росгидромета, МЧС России и научных организаций выявлены тенденции увеличения частоты и интенсивности природных пожаров. В [7] сообщается, что потепление климата в XXI столетии повлекло увеличение интенсивности и частоты пожаров. Однако в работе [8] получено, что значимых трендов горимости леса в текущем столетии в России не выявлено.

По другим регионам планеты также не подтвердились выводы Межправительственной группы экспертов по климату, опубликованные в главе 12, о том, что глобальное потепление климата приводит к усилению лесных пожаров [9]. Лесные пожары связываются с усилением засушливости при глобальном потеплении, но в той же главе 12 отмечается, что существует низкая степень уверенности в прогнозируемых изменениях засушливости и засухи, учитывая общее увеличение осадков и региональные несоответствия при увеличении осадков в Азии [9].

В статье [10] отмечено, что исследования, проведенные для 28 стран Европы, США и Канады, как правило, не подтверждают мнения некоторых ученых о том, что количество лесных пожаров или площади лесных пожаров увеличиваются в результате глобального потепления климата. Но для некоторых стран опасный рост этих характеристик был подтвержден. Наименьшие значения площади лесных пожаров были установлены на территории Чехии, Финляндии, Германии, Австрии, Швеции, Литвы, Латвии, Польши и Украины.

В связи с отмеченными противоречиями в оценках лесных пожаров первой целью настоящего исследования стало сравнение сведений о многолетних изменениях количества лесных пожаров в России по данным наблюдений и приведенных в официальных документах выводах об их изменениях в связи с глобальным потеплением климата.

В вопросах о влиянии потепления климата на лесные пожары не всегда учитывается, что температура воздуха является только одним из нескольких метеорологических элементов, влияющих на способность леса к возгоранию. При этом не учитывается, что в XXI в. в разных регионах планеты тенденции изменения климата различны [11]. Многолетние тенденции температуры воздуха и тенденции других важнейших метеорологических характеристик (атмосферные осадки и влажность воздуха) могут иметь разную направленность в зависимости от региона и сезона года, поэтому нельзя сведения о глобальном потеплении климата за последние 100 лет переносить на региональные изменения отдельных его характеристик в последние десятилетия.

Кроме метеорологических факторов, определяющих горимость леса, заметное влияние на пожары оказывают местные природные и антропогенные условия. В большинстве случаев возгорание леса случается по вине человека. В густонаселенных регионах страны всегда велика вероятность появления в лесу источника огня. На возгорание леса еще влияют породный состав леса, возраст и санитарное состояние лесных территорий, рельеф местности и некоторые другие физико-географические условия. Вклад каждого отдельного фактора в предрасположенность леса к возгоранию может сильно отличаться по сезонам и регионам страны, поэтому второй целью настоящего исследования стало выявление различий в соотношениях температуры, количества осадков и влажности воздуха, формирующих пожароопасные условия в лесах разных регионов России и в разные месяцы пожароопасного сезона.

В Северном полушарии, по оценкам [12], наибольшие по площади лесные массивы и наибольшее количество лесных пожаров наблюдается в Азиатской части России и в Канаде. В связи с этим основой выполнения работы послужили данные наблюдений за лесными пожарами за последние четыре десятилетия в России и в Канаде.

Исходные данные и методы анализа

В работе использованы данные восьмисрочных наблюдений на метеорологических станциях России за 1966—2024 гг. (температура, осадки, влажность) из архива Всероссийского НИИ гидрометеорологической информации — Мирового центра данных. Сведения о количестве лесных пожаров и о фактических значениях площади, пройденной огнем за пожароопасный сезон в каждом Субъекте Федерации РФ, получены из официальных источников [1—3, 12—14]. Сведения о количестве лесных пожаров в Канаде за 1990—2023 гг. взяты из [15].

В исследованиях применен метод регрессионного анализа с вычислением коэффициентов детерминации потенциальной опасности лесных пожаров каждым метеорологическим элементом в отдельности и для трех элементов в комплексе.

В России традиционно для оценки метеорологической опасности возгорания леса используют индекс Нестерова [16], вычисляемый по усовершенствованной формуле З. З. Халевицкого, которая приведена в публикации А. Д. Вакурова [17]. Индекс Нестерова G вычисляется по данным метеорологических наблюдений ежесуточно в течение всего теплого полугодия:

$$G = \sum_{i=1}^n T(T - T_r),$$

где T — температура воздуха в полдень, $T - T_r$ — дефицит точки росы.

Суммирование значений индекса проводится по последовательным суткам с количеством осадков менее 2,5 мм, а при осадках за сутки 2,5 мм и более накопленная сумма индекса обнуляется.

При значениях индекса $G > 1000$ чаще всего возникают лесные пожары. Сутки, когда индекс Нестерова достигал значения больше 1000, относят к суткам с классом высокой опасности возгорания леса. В качестве общей оценки лесопожарной обстановки за год или за месяц можно использовать общее количество пожароопасных суток с индексом $G > 1000$ за год или за месяц, соответственно.

Для получения количественных оценок влияния на лесные пожары каждого из трех метеорологических факторов (температура, влажность воздуха, осадки) по многолетним данным проводились подсчеты по месяцам коэффициентов детерминации связи многолетних изменений показателя пожарной опасности с многолетними изменениями температуры, влажности и осадков отдельно. Показателем пожарной опасности служил ряд месячных значений числа суток с высокой пожарной опасностью по индексу Нестерова. По ряду числа пожароопасных суток и рядам среднемесячных значений температуры воздуха, количества осадков и относительной влажности (отдельно по каждому элементу) построены уравнения линейной регрессии для каждой метеостанции РФ по данным наблюдений за период с 1966 г. по 2024 г., а затем вычислены коэффициенты детерминации изменения числа пожароопасных суток каждым из метеорологических элементов, отдельно.

Коэффициент детерминации определялся как $R^2 = \left(1 - \frac{D_1}{D_0}\right) 100[\%]$, где D_1 —

дисперсия ошибки уравнения регрессии; D_0 — общая дисперсия изменения числа пожароопасных суток. Коэффициенты детерминации служили оценками вклада изменений каждого метеорологического элемента в величину пожарной опасности в лесах вблизи метеорологической станции.

Результаты исследований

Многолетние изменения числа лесных пожаров и лесной площади, пройденной пожарами на территории РФ, рассматривались по данным наблюдений. На рис. 1 показан график изменения общего числа лесных пожаров на территории России за период с 1985 г. по 2025 г. и график изменения лесной площади, пройденной огнем в России, за период с 1992 г. по 2025 г. Нетрудно увидеть, что в последние 15 лет XX столетия число лесных пожаров увеличивалось вплоть до 2002 г.

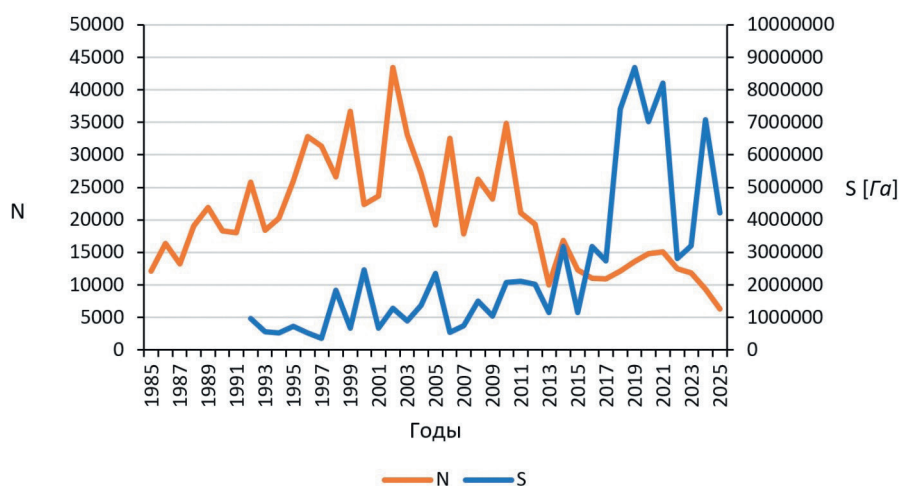


Рис. 1. Изменение общего числа лесных пожаров (N) и лесной площади (S), пройденной огнем на территории России.

Fig. 1. Change in the total number of forest fires (N) and forest area (S) affected by fire in Russia.

В 2002 г. в России наблюдалось максимальное число лесных пожаров (43418 пожаров), но в последующие двадцать три года сложилась тенденция уменьшения общего числа лесных пожаров. В 2025 г. был минимум числа пожаров.

Прежде всего, по данным наблюдений, проведена проверка, могло ли уменьшение числа лесных пожаров в последние два десятилетия быть связано с ослаблением метеорологических условий, необходимых для возгорания леса. Для этих целей по ежедневным данным на 750 метеорологических станциях России за период с 2002 г. по 2024 г. посуточно вычислены значения индекса Нестерова и на каждой станции для каждого года подсчитано число пожароопасных суток со значениями индекса выше критического $G = 1000$. Затем по полученным рядам числа пожароопасных суток на каждой станции был вычислен коэффициент линейного тренда изменений числа пожароопасных суток за период с 2002 г. по 2024 г.

На рис. 2 приводится пространственное распределение линейных трендов изменения числа пожароопасных суток на территории России за период с 2002 г. по 2024 г.

Поля на карте (рис. 2) с трендами разного знака показывают, что в 2002—2024 гг. на юге Европейской части России произошло увеличение числа пожароопасных суток. А в большинстве районов на юге Сибири и Дальнего Востока за последние 23 года произошло уменьшение числа пожароопасных суток. Обобщая, получаем, что на большей части России в 2002—2025 гг. все реже складывались метеорологические условия, при которых лесные пожары были способны возникнуть.

Тенденции уменьшения потенциальной метеорологической опасности лесных пожаров (отрицательные тренды на рис. 2) по индексу Нестерова в Азиатской

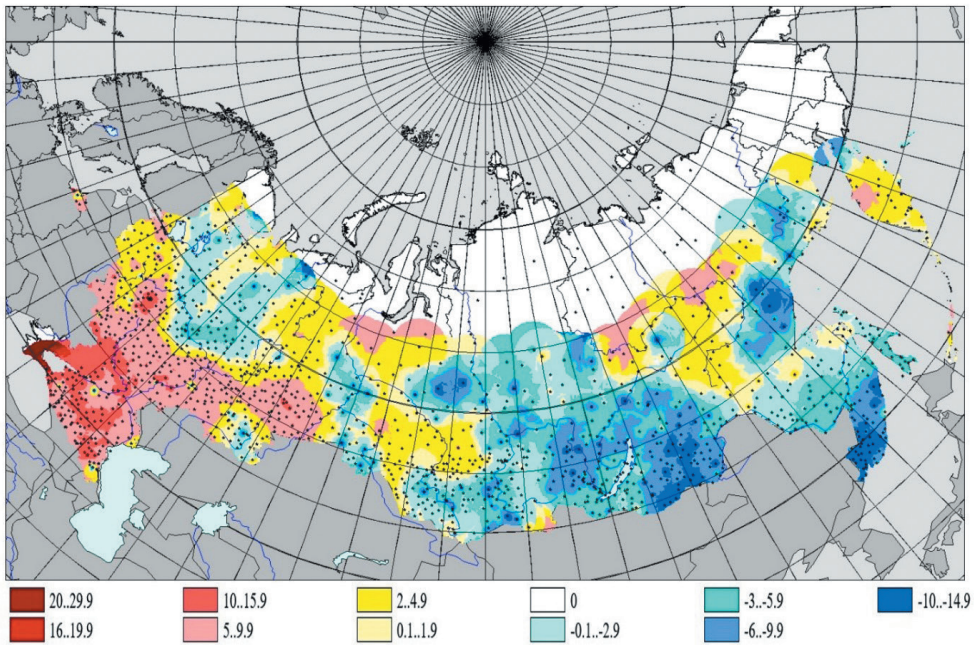


Рис. 2. Коэффициенты линейных трендов изменения числа пожароопасных суток [сут/10 лет] за теплое полугодие по данным за период с 2002 г. по 2024 г.

Fig. 2. Coefficients of linear trends in the change in the number of fire—hazardous days [days/10 years] for the warm half of the year based on data for 2002—2024.

части России согласуются с современной тенденцией наблюдаемого уменьшения общего количества лесных пожаров в стране. Общее количество лесных пожаров в России, начиная с 2002 г., уменьшалось в связи с ослаблением в эти годы метеорологических условий возгорания леса на большей части территории России.

Сведения об изменении суммарной площади лесных пожаров в России по имеющимся данным наблюдений с 1992 г. (рис. 1) показали совсем другие особенности многолетних изменений. До 2013 г. суммарная площадь пожаров в лесах России изменялась по годам в небольшом интервале в пределах примерно до 2 500 000 Га. Затем в 2014 г. и 2016 г. суммарная площадь пожаров превысила значение 3 000 000 Га, а в 2019—2021 гг. — резко возросла до значений более 8 000 000 Га. Наибольшей площади лесные пожары России достигли в 2019—2021 гг., при очень малом суммарном в стране числе лесных пожаров. Причины обнаруженного противоречия стали понятны после анализа данных наблюдений за пожарами отдельно по каждому Федеральному округу России. Эти данные взяты из [12], где они приводятся с 2009 г.

По данным наблюдений за период с 2009 г. по 2025 г., оказалось, что ни в одном из регионов России не наблюдалось тенденции последовательного увеличения площадей пожаров в последние десятилетия. Так, на Европейской территории

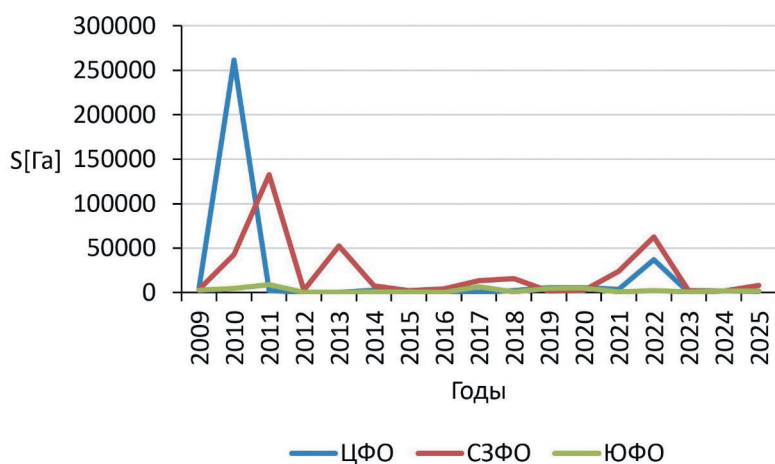


Рис. 3. Изменение лесной площади (S) пройденной огнем в Центральном (ЦФО), в Северо-Западном (СЗФО) и в Южном Федеральных (ЮФО) округах в га.

Fig. 3. Change in forest area (S) affected by fire in the Central, Northwestern and Southern Federal Districts.

России лесные пожары достигали максимальной площади в 2010—2011 гг. (рис. 3), а далее во все последующие годы площадь лесных пожаров была значительно меньше.

В Центральном Федеральном округе (ФО) в 2010 г. леса горели на площади 261 642 га, в Приволжском ФО — на площади 348 445 га, а в Северо-Кавказском ФО — на площади 3093 га. В 2011 г. максимальная площадь пожаров в Северо-Западном ФО составила 132 431 га, в Южном ФО — 9032 га. В последующие несколько лет во всех перечисленных регионах Европейской территории России площадь лесных пожаров оказалось во много раз меньше, чем в 2010—2011 гг. или сократилась почти до нуля. Увеличения площадей пожаров не наблюдалось (рис. 3).

В Сибирском ФО площадь пожаров медленно возрастала от начала наблюдений до 2019 г., а затем резко сократилась и оставалась малой во все последующие 6 лет. В этом округе основной вклад в общую площадь максимальных пожаров в 2019 г. внесли Иркутская область и Красноярский край. В Дальневосточном ФО все изменения происходили по-другому (рис. 4), где количество и площадь лесных пожаров в течение 1989—2018 гг. изменялись по годам в виде отклонений разного знака от некоторого стабильного уровня. Площадь пожаров в эти годы редко превышала 1 000 000 га. Изменения происходили без каких-либо однонаправленных тенденций, а после 2018 г. резко возросло количество пожаров и увеличилась их площадь. К 2021 г. площадь превысила 8 000 000 га. В последующие годы площадь пожаров в Дальневосточном ФО опять сократилась. Несмотря на продолжающееся глобальное потепление, в Дальневосточном ФО не наблюдалось планомерного увеличения количества и площади лесных пожаров за последние 37 лет.

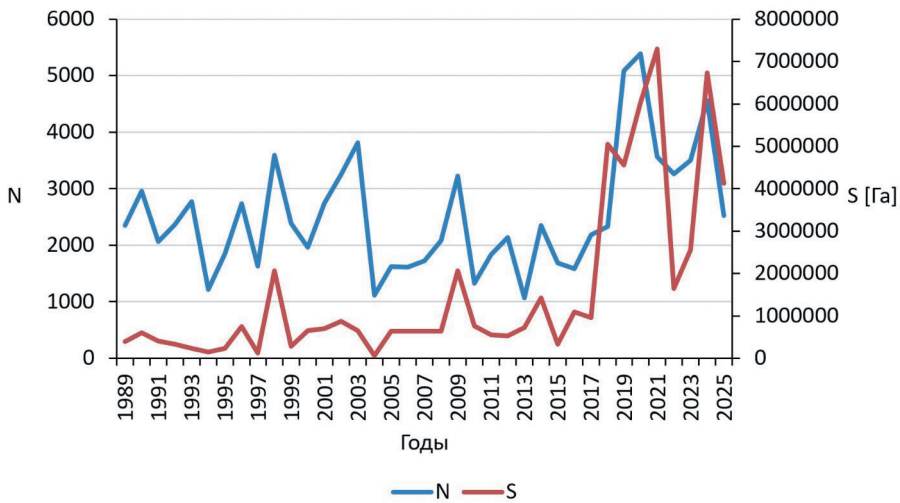


Рис. 4. Изменение числа лесных пожаров (N) и лесной площади (S) пройденной огнем в Дальневосточном ФО в га.

Fig. 4. Change in the number of forest fires (N) and forest area (S) affected by fire in the Far Eastern Federal District.

Зависимость лесных пожаров от метеорологических условий оказалась сложнее. На рис. 4 видна тесная связь ($r = 0,68$) между многолетними изменениями числа и площадей лесных пожаров в Дальневосточном ФО. По другим регионам связь не такая тесная.

Дальневосточный ФО и некоторые регионы Сибири обладают лесами огромных площадей. В большинстве других ФО леса занимают малые площади. В малом лесном массиве не каждый возникший пожар может распространиться на большие площади, поэтому зависимость площади пожаров от количества возгораний очень разная в разных регионах России. В результате суммарная площадь всех лесных пожаров России складывается преимущественно из пожаров Сибири и Дальнего Востока, а суммарное количество возникающих пожаров характеризует условия возгорания во всех регионах страны примерно на равных условиях. Увеличение суммарной площади лесных пожаров в России за период с 2019 г. по 2021 г., показанное на рис. 1, определяется не метеорологическими условиями по всей России, а преимущественно, условиями в районах России с обширными лесами. В то время как общее количество лесных пожаров определяется условиями возгораний по всей России. В связи с этим совершенно некорректно сравнивать общее количество лесных пожаров в России с общей площадью этих пожаров в России. Причина противоречия, обнаруженного ранее при описании рис. 1, стала понятной.

Итак, по данным метеорологических наблюдений на большей части территории России с начала XXI в. сформировалась тенденция уменьшения по годам количества пожароопасных суток. При этом данные наблюдений за фактическими

лесными пожарами подтверждают, что общее количество лесных пожаров России сокращалось за период с 2002 г. по 2025 г. с такой же скоростью, как в период с 1985 г. по 2002 г. происходил рост их количества. В 2025 г. общее количество лесных пожаров в России оказалось примерно в 2 раза меньше, чем их было в начале наблюдений в 1985 г.

Описанные особенности многолетних изменений числа и площадей лесных пожаров в разных регионах России не подтверждают ранее упомянутые выводы в некоторых публикациях [1—7, 9] об усилении пожарной опасности в лесах в связи с глобальным потеплением.

Для дополнительной проверки полученного вывода привлекались данные наблюдений за лесными пожарами в Канаде — стране с обширными лесами. Изменения количества лесных пожаров в Канаде в условиях глобального потепления показаны на рис. 5.

Рис. 5 показывает, что в лесах Канады на всем интервале имеющихся данных наблюдений за пожарами за период с 1990 г. по 2023 г. происходило уменьшение количества пожаров, несмотря на глобальное потепление климата. В Северной Америке, так же как в России, многофакторные метеорологические условия возгорания леса создают закономерности многолетних изменений пожароопасной обстановки более сложные, чем следует из сложившихся представлений о влиянии глобального потепления на лесные пожары.

Кроме метеорологических условий, определенное значение для лесных пожаров имеют условия появления источника огня, которые дополнительно усложняют связь лесных пожаров с изменением климата. Так, например, в работе [18] показано, что во временном ходе количества пожаров выявлены периоды 6—7 и 12—13 лет, связанные не только с метеорологическими условиями, но и с продолжительностью гроз. Грозы часто становятся источником огня в лесах, способным

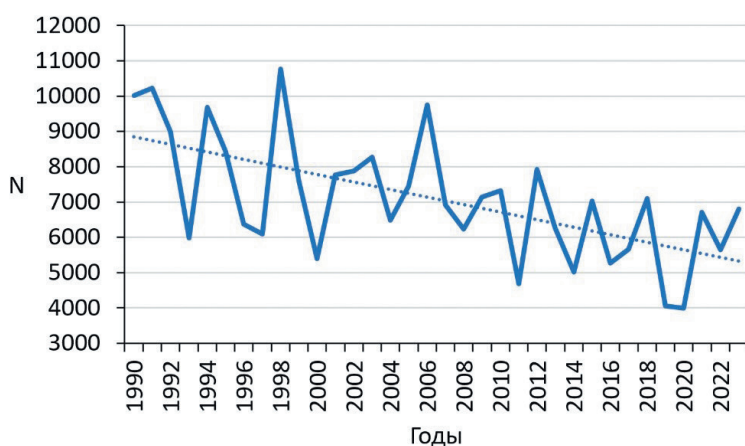


Рис. 5. Изменение числа лесных пожаров в Канаде.

Fig. 5. Change in the number of forest fires in Canada.

привести к лесному пожару при благоприятных метеорологических условиях. Отмечено, что общая повторяемость лесных пожаров в большой степени определяется изменениями естественных факторов, способствующих возникновению лесных пожаров, включая грозовую активность.

Выводы, известные из более ранних публикаций [2, 3, 9], о росте в настоящее время количества лесных пожаров в связи с глобальным потеплением не соответствуют действительности. Количество пожаров неуклонно сокращается в большинстве регионов Северного полушария Земли. На долговременную тенденцию ослабления горимости лесов дополнительно накладываются более короткие межгодовые колебания числа лесных пожаров, которые на некоторых интервалах лет кратковременных усиления создают ошибочные представления об усилении горимости лесов в связи с глобальным потеплением. Многолетние колебания числа лесных пожаров и их площадей являются следствием многолетних колебаний сложного комплекса метеорологических параметров и дополнительных условий, изменяющихся при колебаниях климата.

Изучение количественных соотношений влияния разных метеорологических характеристик (температура и влажность воздуха, атмосферные осадки) на формирование пожарной опасности в лесах позволяет понять причину ошибочных представлений о том влиянии на лесные пожары, которое должно оказывать глобальное потепление. Ключевым фактором, формирующим пожароопасные условия в лесных экосистемах, является сухость лесной подстилки, достижение которой тесно связано с температурой воздуха. При этом лимитирующими факторами лесных пожаров всегда являются атмосферные осадки и повышенная влажность воздуха.

В настоящей работе влияние температуры воздуха, относительной влажности и количества осадков на формирование пожароопасных условий оценивались по коэффициентам детерминации отдельно для каждого метеорологического элемента. По метеорологическим данным за период с 1966 г. по 2024 г. для всех станций России вычислялись ряды значений количества пожароопасных суток (сутки с индексом Нестерова $G > 1000$) по месяцам теплого полугодия и строились уравнения регрессии многолетних изменений количества пожароопасных суток в месяце от изменений месячных значений температуры воздуха, изменения количества осадков за месяц, среднемесячной относительной влажности воздуха и от трех метеорологических элементов вместе.

Коэффициенты детерминации для количества осадков, температуры и влажности воздуха были получены для каждой метеорологической станции и по каждому отдельному месяцу теплого полугодия. Построены карты коэффициентов детерминации для температуры и влажности воздуха, для количества осадков отдельно по месяцам теплого полугодия.

Анализ полученных карт вклада разных метеовеличин в потенциальную горимость леса показал существенные различия по месяцам и по территории России. Так, в апреле на юге Европейской части России вклад температуры составляет 20—25 %, вклад влажности меньше — около 20 %. Осадки влияют еще меньше. В остальной части России в апреле пожароопасные условия еще не успевают сформироваться. В мае число пожароопасных суток преимущественно зависит

от температуры воздуха. Коэффициенты детерминации числа пожароопасных суток за месяц температурой воздуха составили 20—30%. Самый большой вклад температуры проявляется на территории Европейской территории России, в Поволжье, в Западной Сибири, на юге Восточной Сибири и Дальнего Востока.

В летние месяцы вклад температуры в уравнения регрессии числа пожароопасных суток ослаблен и составляет около 20 % на юге Европейской территории России (ЕТР) и в Поволжье. В мае в южных регионах РФ, а в июне и во всех остальных регионах страны лесная подстилка уже полностью высыхает, дальнейший прогрев подстилки уже не повышает ее сухость. Вследствие этого температура в июне перестает быть главным фактором и ее вклад в количество пожароопасных суток уменьшается. В другие летние месяцы температура воздуха достигает таких высоких значений, при которых ее дальнейшее повышение уже не имеет значения для усиления пожароопасности. Летняя температура воздуха практически всегда создает пожароопасные условия в лесах, и только осадки и повышенная влажность воздуха становятся условиями, регулирующими горимость леса.

Выпадение осадков увлажняет горючий лесной материал и повышает влажность воздуха. Во все три летних месяца на всей территории России усиливается лимитирующий эффект осадков и относительной влажности воздуха в формировании пожароопасных условий. Вклад влажности воздуха в изменение пожароопасности в летние месяцы проявляется почти на всей территории России. Наибольшее влияние влажности воздуха на ослабление лесных пожаров проявляется в России в июле на географических широтах от 45° до 60° (рис. 6).

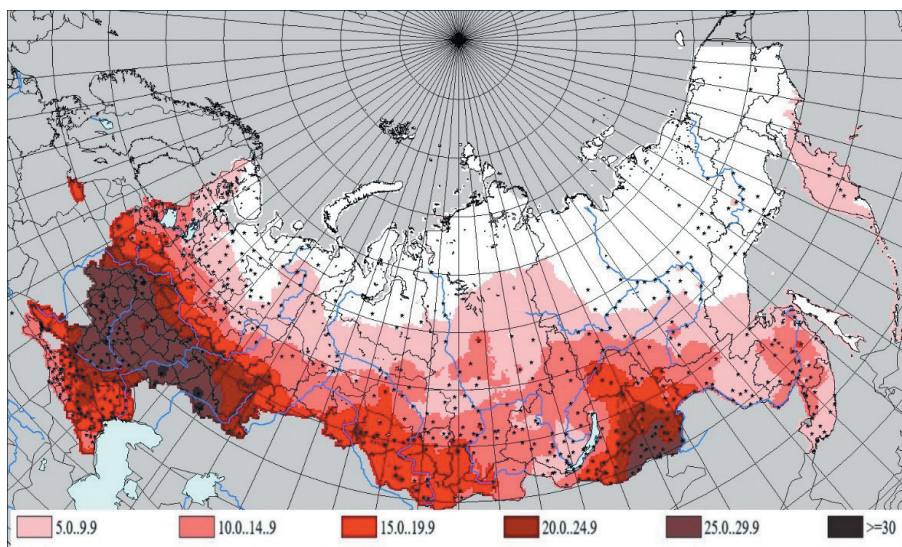


Рис. 6. Вклад (%) влажности воздуха в уравнение регрессии числа пожароопасных суток на территории России в июле.

Fig. 6. Contribution (%) of air humidity to the regression equation for the number of fire-hazardous days in July.

Белые поля на карте охватывают регионы, в которых леса отсутствуют или коэффициенты детерминации оказались меньше 5 %. При этом наибольшее влияние влажности проявляется в центре ЕТР, в Поволжье и во всей Южной Сибири, где коэффициенты детерминации достигают 15—30 %. На остальной части территории России, покрытой лесами, вклад относительной влажности летом составляет примерно 5—15 %. Наибольшие значения вклада осадков в изменение горимости лесов летом оказались на ЕТР, в Поволжье и в Западной Сибири. Осенью влияние влажности воздуха на большей части страны ослабевает, но оно остается заметным на ЕТР (25—30 %) и в Восточной Сибири (35 %).

Главным фактором осенью становится количество осадков. Самый большой вклад осадков в условия горимости лесов осенью наблюдался на ЕТР и на юге Сибири. На рис. 7 для примера показана карта вклада (%) количества осадков в уравнение регрессии числа пожароопасных суток в октябре. В этом месяце наибольший вклад осадков в условия горимости лесов достигал значений 20—25 % и проявлялся на северо-западе России и в Восточной Сибири.

Итак, почти весь пожароопасный сезон, кроме весны, осадки и связанная с ними повышенная влажность воздуха являются главными факторами, изменяющими опасность возгорания леса. Отметим, что по данным [4], после 2000 г. общее количество осадков в России заметно возросло. Очевидно, что увеличением количества осадков объясняется ослабление опасности возгорания леса в России, начиная с 2002 г., и сокращение количества фактических лесных пожаров в последние два десятилетия.

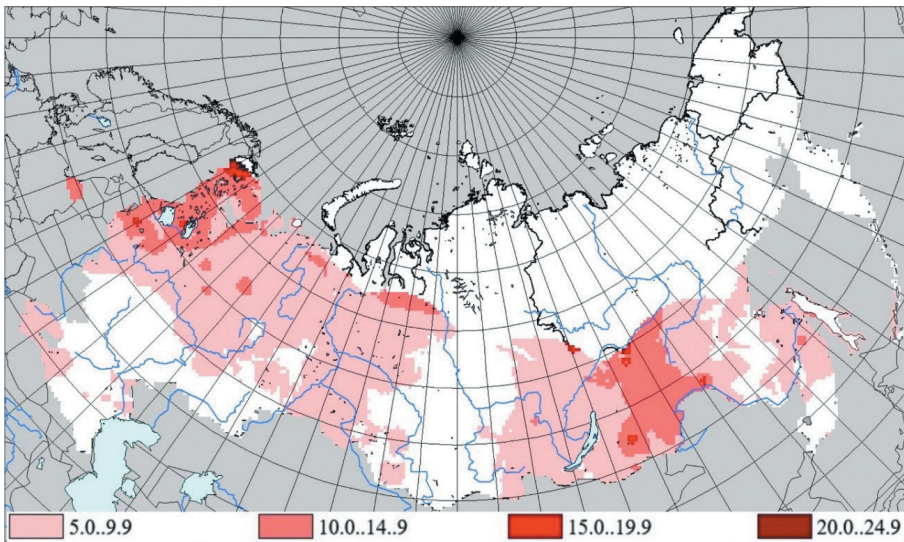


Рис. 7. Вклад (%) количества осадков в уравнение регрессии числа пожароопасных суток на территории России в октябре.

Fig. 7. Contribution (%) of precipitation to the regression equation for the number of fire-hazardous days in October.

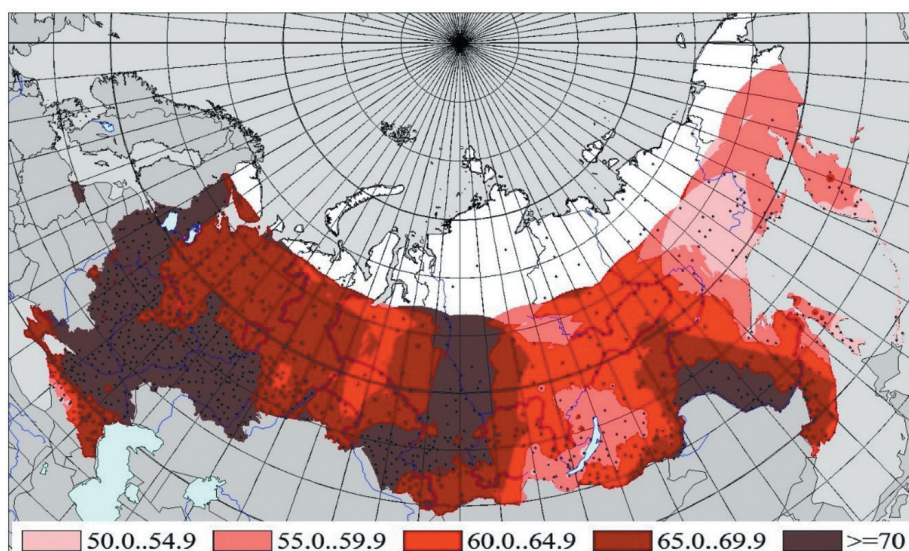


Рис. 8. Комплексный вклад (%) температуры воздуха, относительной влажности и количества осадков в число пожароопасных суток на территории России в июле.

Fig. 8. Contribution (%) of the complex contribution of air temperature, relative humidity and precipitation to the number of fire-dangerous days in July.

При построении уравнения регрессии числа пожароопасных суток от комплекса из трех метеорологических элементов общий вклад температуры, влажности воздуха и количества осадков в число пожароопасных суток в целом за весь пожароопасный сезон составил от 50 до 70 % по разным регионам страны. На рис. 8 показана карта вклада комплекса метеорологических условий в число пожароопасных суток в июле.

Полученные оценки показывают, что изменяющиеся метеорологические условия определяют потенциальную горимость лесов практически на всей территории России. Температура воздуха является главным фактором, влияющим на формирование пожароопасных условий весной. Летом и осенью главными факторами, влияющими на потенциальную горимость лесов, становятся относительная влажность воздуха и количество выпавших осадков.

Заключение

Полученные оценки показали, что потепление климата не означает неизбежное усиление пожарной опасности в лесах. Температура — это один из факторов, влияющих на формирование пожароопасной обстановки в лесах преимущественно весной, но не главный. Изменения в количестве осадков и изменения влажности воздуха вносят свои коррективы на протяжении всего лета и осенью. Самое большое влияние метеорологических условий на потенциальную опасность

лесных пожаров оказалось на юге ЕТР и на юге Дальневосточного ФО. Но на юге ЕТР нет больших лесных массивов и никогда не было больших лесных пожаров. Самые большие лесные массивы наблюдаются в Сибири и на Дальнем Востоке. Сочетание лесов и большого влияния изменяющихся метеорологических условий на юге Дальнего Востока приводят там к лесным пожарам на большой площади.

В современном климате высока опасность возгорания леса на территории России, но глобальное потепление климата последних десятилетий не создает условий для дальнейшего усиления пожарной опасности в лесах. Напротив, наблюдающееся при этом увеличение количества осадков ослабляет горимость леса. Тенденции повсеместного обострения метеорологических условий возгорания леса не наблюдается.

Данные, полученные из обобщения наблюдений за фактическими лесными пожарами в России, в Канаде и других странах Северного полушария, показывают многолетнюю тенденцию сокращения количества лесных пожаров за последние два десятилетия и подтверждают ошибочность выводов. Получившие официальный статус выводы из более ранних публикаций некоторых ученых об усилении лесных пожаров в России и в других странах в связи с глобальным потеплением климата не соответствуют действительности.

Список литературы

1. Четвертое национальное сообщение Российской Федерации, представляемое в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной Конвенции ООН об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола. Редакционная коллегия: Израэль Ю. А., Нахутин А. И., Семенов С. М. и др. Российская Федерация. Москва: 2006. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://unfccc.int/resource/docs/natc/rusnc4t_rev.pdf. Дата обращения: 06.05.2026.
2. Шестое национальное сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола. Редакционная коллегия: Фролов А. В., Макошко А. А., Блинов В. Г. и др. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Москва: 2013. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://unfccc.int/sites/default/files/6nc_rus_final.pdf. Дата обращения: 06.05.2026.
3. Седьмое национальное сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола. Редакционная коллегия: Яковенко М. Е., Романовская А. А., Блиновитова В. Г. др. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Москва: 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.gosnadzor.ru/activity/international/report_CNS/CNS_RF_NR-7_Rus.pdf. Дата обращения: 06.05.2026.
4. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Под ред. В. М. Катцова. Росгидромет. Санкт-Петербург: Научное издание, 2022. 676 с.
5. Барталев С. А. Крупномасштабные изменения лесов России в XXI веке по данным спутниковых наблюдений (ИКИ РАН, Москва, Россия) / Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Электронный сборник материалов конференции, Москва, 16-20 ноября 2020 года. М.: ИКИ РАН. 2020. С. 416.
6. Забара Е. А. Лесопожарные режимы Сибири в условиях изменения климата: оценка рисков возникновения чрезвычайных ситуаций и управление природопользованием. Актуальные проблемы природопользования и природообустройства: Сборник статей VIII Международной

- научно-практической конференции. Пенза, 18—19 ноября 2025 года. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. 2025. С. 108—110.
7. Харук В. И., Буряк Л. В., Двинская М. Л. и др. Природные пожары в лиственничниках криолитозоны: мониторинг и стратегия борьбы в условиях меняющегося климата // Сибирский экологический журнал. 2024. Т. 31. № 5. С. 752—768. doi: 10.15372/SEJ20240508.
 8. Петров И. А., Шушпанов А. С., Голоюков А. С. и др. Горимость сосняков Средней Сибири в условиях меняющегося климата // Сибирский экологический журнал. 2023. Т. 30. № 1. С. 46—59. doi: 10.15372/SEJ20230105.
 9. Ranasinghe, R., Ruane A.C., Vautard R. et al. Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai P., Pirani A. et al]. 2021, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1767—1926. doi:10.1017/9781009157896.014.
 10. Sylwester M. Grajewski. Long-Term Variability of Forest Fires in Selected 28 European Countries, Canada and the USA. Bezpieczenstwo i technika pozarnicza. 2017; (47)(3): 46—61. doi: 10.12845/bitp.47.3.2017.3.
 11. Переведенцев Ю. П., Васильев А. А., Шерстюков Б. Г., Шанталинский К. М. Климатические изменения на территории России в конце XX — начале XXI века // Метеорология и гидрология. 2021. №10. С.14—26.
 12. Единая межведомственная информационно-статистическая система государственной статистики. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.fedstat.ru>. Дата обращения: 06.05.2026.
 13. Природные пожары по данным Рослесхоза с 2000 года. Рослесхоз. 2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tochno.st/datasets/fires>. Дата обращения: 06.05.2026.
 14. Думнов А. Д., Максимов Ю. И., Рошупкина Ю. В., Аксенова О. А. Лесные пожары в Российской Федерации (статистический справочник). Под редакцией Думнова А. Д. и Рыбальского Н. Г. М.: НИИ-Природа, 2005. 29 с.
 15. Canadian Council of Forest Ministers — Conseil canadien des ministres des forêts National Forestry Database — Base de données nationales des forêts — Canada (Version 2.0.0) [Data set]. Natural Resources Canada — Ressources naturelles Canada. 2020.: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://doi.org/10.5281/zenodo.3690046>. Дата обращения: 06.05.2026.
 16. Нестеров В. Г. Горимость леса и методы ее определения. Л.: Гослесбумиздат, 1949. 76 с.
 17. Вакуров А. Д. Лесные пожары на севере. М.: Наука, 1971. 100 с.
 18. Горбатенко В. П., Громницкая А. А., Константинова Д. А. и др. Оценка роли климатических факторов в возникновении и распространении лесных пожаров на территории Томской области // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 395. С. 233—240. doi: 10.17223/15617793/395/38

References

1. *Chetvertoye natsional'noye soobshcheniye Rossiyskoy Federatsii predstavlyayemoye v sootvetstvii so stat'yami 4 i 12 Ramochnoy Konventsii OON ob izmenenii klimata i stat'yey 7 Kiotskogo protokola = The Fourth National Communication of the Russian Federation submitted in accordance with Articles 4 and 12 of the United Nations Framework Convention on Climate Change and Article 7 of the Kyoto Protocol*. Editorial board: Izrael Yu. A. Nakhutin A. I., Semenov S. M. et al. Russian Federation. Moscow, 2006. Available at: https://unfccc.int/resource/docs/natc/rusnc4r_rev.pdf. (In Russ.) Accessed on: 06.05.2026.
2. *Shestoye natsional'noye soobshcheniye Rossiyskoy Federatsii predstavlennoye v sootvetstvii so stat'yami 4 i 12 Ramochnoy Konventsii Organizatsii Ob'yedinennykh Natsiy ob izmenenii klimata i stat'yey 7 Kiotskogo protokola = The Sixth National Communication of the Russian Federation submitted in accordance with Articles 4 and 12 of the United Nations Framework Convention on Climate Change and Article 7 of the Kyoto Protocol*. Radical Collegium: Frolov A. V., Makosko A. A., Blinov V. G. et al. Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. Moscow 2013. Available at: https://unfccc.int/sites/default/files/6nc_rus_final.pdf. (In Russ.) Accessed on: 06.05.2026.

3. *Sed'moye natsional'noye soobshcheniye Rossiyskoy Federatsii predstavlennoye v sootvetstviy so stat'yami 4 i 12 Ramochnoy Konventsii Organizatsii Ob"yedinennykh Natsiy ob izmenenii klimata i stat'yey 7 Kiotskogo protokola = The Seventh National Communication of the Russian Federation submitted in accordance with Articles 4 and 12 of the United Nations Framework Convention on Climate Change and Article 7 of the Kyoto Protocol*. Editorial board of M. E. Yakovenko et al. Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. Moscow, 2017. Available at: https://www.gosnadzor.ru/activity/inter-national/report_CNS/CNS_RF_NR-7_Rus.pdf. (In Russ.) Accessed on: 06.05.2026.
4. *Tretiy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii = Third Assessment Report on Climate Change and its Impacts on the Territory of the Russian Federation*. Ed. by V. M. Kattsov. Roshydromet. St. Petersburg: Science-Intensive Technologies. 2022: 676 p. (In Russ.).
5. Zabara E. A. Forest fire regimes in Siberia under climate change conditions: assessment of the risks of emergency situations and environmental management. Actual problems of environmental management and environmental engineering: *Sbornik statey VIII Mezhdunarodnoy nauchno — prakticheskoy konferentsii, Penza, 18–19 noyabrya 2025 goda = Collection of articles from the VIII International scientific and practical conference*, Penza, November 18–19, 2025. Penza. Penza State Agrarian University, 2025;(1081110). (In Russ.).
6. Bartalev S. A. Large-scale changes in Russian forests in the 21st century based on satellite observations (IKI RAS, Moscow, Russia). *Materialy 18-y Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii «Sovremennyye problemy dantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa»: Elektronnyy sbornik materialov konferentsii, Moskva, 16–20 noyabrya 2020 goda = Proceedings of the 18th All-Russian open conference “Modern problems of remote sensing of the Earth from space”: Electronic collection of conference materials, Moscow, November 16–20, 2020*. Moscow: IKI RAS. 2020. (416). (In Russ.).
7. Kharuk V. I., Buryak L. V., Dvinskaya M. L., et al. Natural fires in larch forests of the cryolithozone: monitoring and control strategy in a changing climate. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal = Siberian Ecological Journal*. 2024;(31):(5):(752—768). doi: 10.15372/SEJ20240508. (In Russ.).
8. Petrov I. A., Shushpanov A. S., Golyukov A. S., et al. Combustibility of pine forests in Central Siberia under changing climate conditions. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal = Siberian Ecological Journal*. 2023;(30):(1):(46—59). doi 10.15372/SEJ20230105. (In Russ.).
9. Ranasinghe R., Ruane A. C., Vautard R. et al. Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., Zhai P., Pirani A. et al]. 2021, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1767—1926. doi:10.1017/9781009157896.014.
10. Sylwester M. Grajewski. Long-Term Variability of Forest Fires in Selected 28 European Countries, Canada and the USA. *BITP*: 2017; (47):(3): (46—61), doi: 10.12845/bitp.47.3.2017.3.
11. Perevedentsev Yu. P., Vasiliev A. A., Sherstyukov B. G., Shantalinsky K. M. Climatic changes on the territory of Russia at the end of the 20th and beginning of the 21st centuries. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2021;(10):(14—26). (In Russ.).
12. Unified Interdepartmental Information and Statistical System of State Statistics. Available at: <https://www.fedstat.ru> (In Russ.) (Accessed on: 06.05.2026).
13. Wildfires according to Rosleskhoz data since 2000. Rosleskhoz. 2024. Available at: <https://tochno.st/datasets/fires>. (In Russ.) (Accessed on: 06.05.2026).
14. Dumnov A. D., Maksimov Yu. I., Roshchupkina Yu. V., Aksenova O. A. *Lesnyye pozhary v Rossiyskoy Federatsii (statisticheskiy spravochnik) = Forest fires in the Russian Federation (statistical reference book)*. Edited by A.D. Dumnov and N.G. Rybalsky. M. NIA-Priroda. 2005: 29 p. (In Russ.).
15. Canadian Council of Forest Ministers — Conseil canadien des ministres des forêts. (2020). National Forestry Database — Base de données nationales des forêts — Canada (Version 2.0.0) [Data set]. Natural Resources Canada / Ressources naturelles Canada. <http://doi.org/10.5281/zenodo.3690046>.
16. Nesterov V.G. *Gorimost' lesa i metody yeye opredeleniya = Forest flammability and methods for its determination*. Goslesbumizdat. L.: 1949: 76 p. (In Russ.).
17. Vakurov A.D. *Lesnyye pozhary na severe = Forest fires in the north*. Moscow: Nauka. 1971:100 p. (In Russ.).

18. Gorbatenko V. P., Gromnitskaya A. A., Konstantinova D. A. et al. Assessment of the role of climatic factors in the occurrence and spread of forest fires in the Tomsk region. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Tomsk State University*. 2015;(395):(233I240). doi: 10.17223/15617793/395/38. (In Russ.).

Информация об авторах

Шерстюков Борис Георгиевич, доктор географических наук, старший научный сотрудник лаборатории исследования последствий изменения климата, Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации — Мировой центр данных, заведующий лабораторией, Boris_sher@mail.ru.

Салугашвили Руслан Сергеевич, кандидат географических наук, лаборатория исследования последствий изменения климата, Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации — Мировой центр данных, научный сотрудник, rusalansalugameteo@mail.ru.

Information about authors

Boris Georgievich Sherstyukov, doctor of Geographical Sciences, Senior Researcher, Laboratory for the Study of the Effects of Climate Change, All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information — World Data Center, Laboratory Head.

Ruslan Sergeevich Salugashvili, candidate of Geographical Sciences, Laboratory for the Study of the Effects of Climate Change, All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information — World Data Center, Researcher.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 14.05.2026

Принята к печати после доработки 11.07.2026

The article was received on 14.05.2026

The article was accepted after revision on 11.07.2026

Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 425—437.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(84):425—437.

ОКЕАНОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.247.1:551.462.32(262.81)

doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-425-437

Проявление солянокупольной тектоники в мелководной северной части Каспийского моря

Пётр Иванович Бухарицин¹, Илья Владимирович Головачев²

¹ Институт водных проблем РАН, Астрахань, Россия, astrgo@mail.ru

² Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, bask_speleo@mail.ru

Аннотация. В данной работе дается описание раздробленной каменной породы, мергеля гипсового, представляющего смесь глин с известняком с добавлением гипса, впервые обнаруженного осенью 2025 г. в Северном Каспии в районе острова Чистая Банка. Мергель формировался в течение миллионов лет, он легко трансформируется в результате геологических, климатических и эрозионных процессов. Высказано предположение о размыве гипсово-мергельных отложений (кепроков) на сводах соляных куполов Северо-Каспийского мелководья, которое нуждается в проверке бурением со льда либо геофизическими методами.

Ключевые слова: Северный Каспий, горная порода, мергель, соляные купола, эрозионные процессы.

Для цитирования: Бухарицин П. И., Головачев И. В. Проявление солянокупольной тектоники в мелководной северной части Каспийского моря // Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 425—437. doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-425-437.

OCEANOLOGY

Original article

The manifestation of salt dome tectonics in the shallow northern part of the Caspian Sea

Pyotr I. Bukharitsin¹, Ilya V. Golovachev²

¹ Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Astrakhan, Russia, astrgo@mail.ru

² Astrakhan State University named after V. N. Tatishchev, Astrakhan, Russia; bask_speleo@mail.ru

Summary. In the autumn of 2025, near the island of Chistaya Banka (the Russian sector of the Northern Caspian Sea, coordinates: N: 45.20396; E: 048.13528), Astrakhan fishermen came across a strange sandbar, which consisted not of the usual mixture of sand, silt, and broken mollusk shells, but of crushed stone, as

it turned out later, marl. They marked the coordinates of the location, took photos and videos of their discovery, and submitted a sample of the stone to the Astrakhan Regional Branch of the Russian Geographical Society. The first inspection of the sample confirmed the initial assumption that it was marl (a sedimentary rock that is intermediate between clay and limestone). Marl has been formed over millions of years from the particles of clay, limestone, sand, and mineral carbonate residues. However, this rock is not durable and can be easily transformed by geological, climatic, and erosive processes. The unexpected discovery aroused interest, as none of the previously published printed sources (scientific articles, maps, and diagrams of the bottom sediments in the shallow northern part of the Caspian Sea) mentioned the occurrence of sedimentary rocks at the surface. The bottom of the central parts of the area is subject to wave action, which is the main relief-forming factor here, and which is mainly responsible for the distribution of sedimentary material over the bottom. Sea ice can also have a direct mechanical, thermal, and physical-chemical effect on the bottom and coast. Among these effects, the most dangerous is exaration, which is the destructive mechanical effect of ice on the ground, caused by the dynamics of the ice cover, ice crevasses, and ice floes, which are influenced by hydrometeorological factors and the topography of the coastal zone. The presence of salt domes in the Northern Caspian Sea has an impact not only on ice formation processes. It also manifests itself in the hydrological and hydrobiological characteristics of the waters in these areas of the sea, which is of both scientific and practical interest. Unfortunately, these areas of the sea are difficult to access for expeditionary research, both from the sea and from the shore, so it is too early to draw definitive conclusions.

Keywords: Northern Caspian Sea, upper (above-salt) complex, rock, marl, salt domes, and erosion processes.

For citation: Bukharitsin P. I., Golovachev I. V. The manifestation of salt dome tectonics in the shallow northern part of the Caspian Sea. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(84):(425—437). doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-425-437. (In Russ.).

Введение

Осенью 2025 г. в районе острова Чистая Банка (Российский сектор Северного Каспия, координаты: N: 45.20396; E: 048.13528) астраханские рыбаки наткнулись

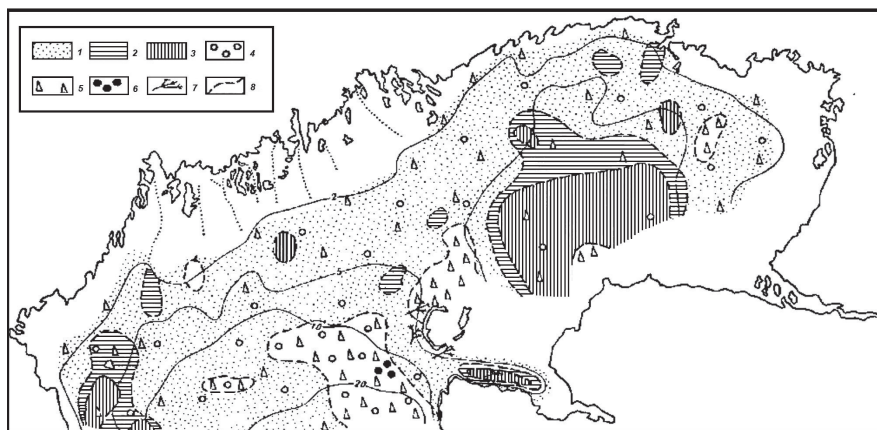


Рис. 1. Донные отложения Северного Каспия в 1973 г. [2]:

1 — пылеватый песок; 2 — илистый песок; 3 — песчаный ил; 4 — целая ракуша; 5 — битая ракуша; 6 — оолитовый песок; 7 — водоросли; 8 — границы ареалов распространения донных осадков.

Fig. 1. Bottom sediments of the Northern Caspian Sea in 1973 [2]:

1 — powdery sand; 2 — silty sand; 3 — sandy silt; 4 — whole shell; 5 — broken shell; 6 — oolitic sand; 7 — algae; 8 — boundaries of the distribution areas of bottom sediments.

на странную отмель, состоящую не из привычной для этих мест смеси песка, ила, и битых раковин моллюсков, а из раздробленной каменной породы, как впоследствии выяснилось — мергеля. Неожиданная находка вызвала интерес, поскольку ни в одном из ранее опубликованных печатных источников (научных статьях, картах и схемах донных отложений мелководной северной части Каспийского моря) нет упоминаний о выходе скальных осадочных горных пород к поверхности (рис. 1—3), [1—3].

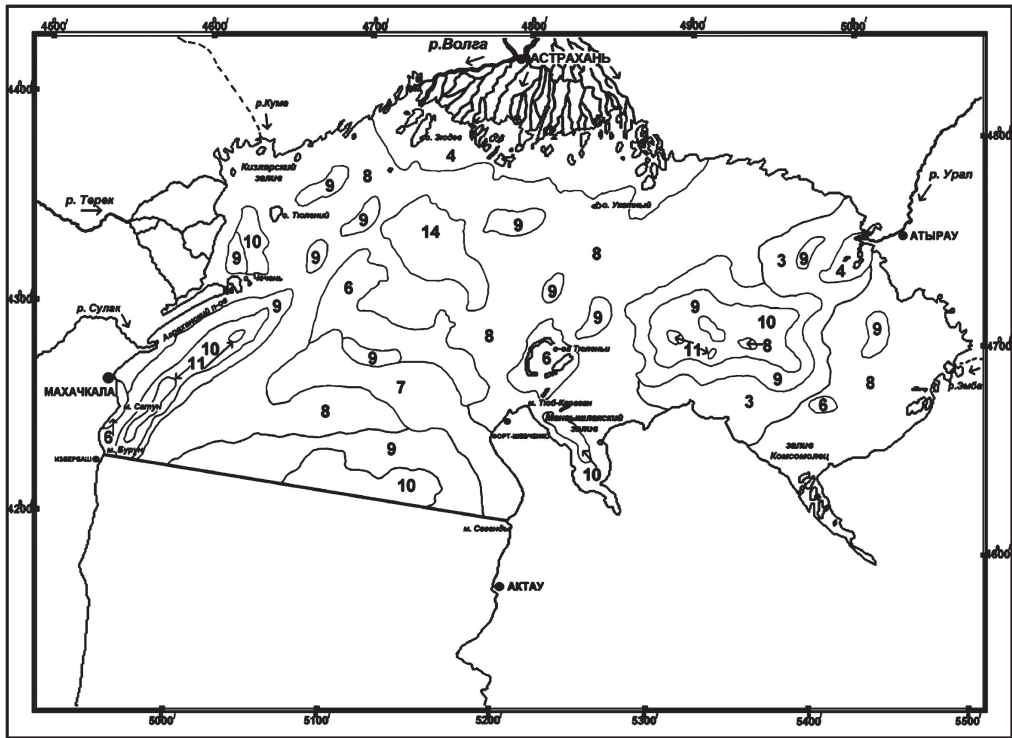


Рис. 2. Схема донных отложений Каспийского моря по материалам геологических и групповых съемок;

данные И. А. Алексинной, Н. М. Арутюновой, М. В., Кленовой, Л. С. Кулаковой, и др.; данные производственных отчётов 1971 — 1991 гг., сводки Б. Ю. Рожецкого, 1998 — 2001 гг. и др. [2].

Типы донных отложений: 3 — крупные алевриты;

4 — песчано-глинистые и галечно-песчано-глинистые отложения наземных и подводных дельт;

6 — гравийно-галечные; 7 — песчано-гравийные; 8 — песчаные; 9 — алеврито-песчаные;

10 — песчано-алевритовые; 11 — глинисто-алевритовые и алеврито-глинистые илы.

Fig. 2. Diagram of bottom sediments of the Caspian Sea based on geological and group surveys;

data from I. A. Alexina, N. M. Arutyunova, M. V. Klenova, L. S. Kulakova, and others; data from production reports of 1971—1991, summaries by B. Y. Rozhetsky, 1998—2001, and others [2].

Types of bottom sediments: 3 — large siltstones; 4 — sandy-clay and pebble-sandy-clay deposits of terrestrial and underwater deltas; 6 — gravel-pebbles; 7 — sandy-gravel; 8 — sandy;

9 — siltstone; 10 — sandy-siltstone; 11 — clay-siltstone and siltstone-clay silts.

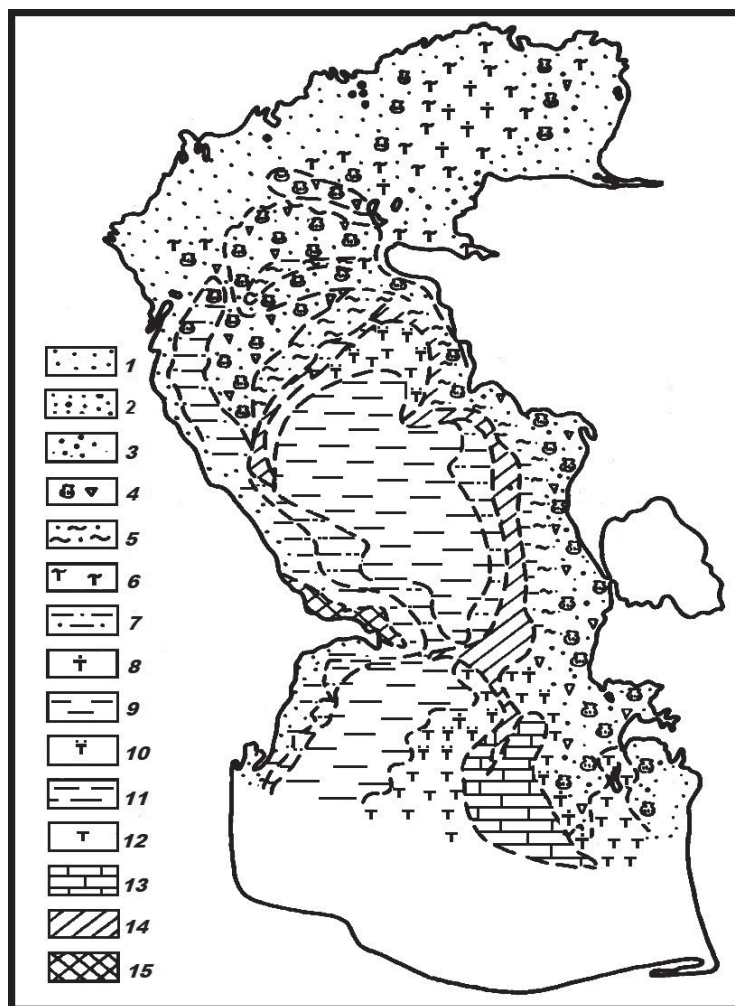


Рис. 3. Литологические типы новокаспийских отложений [3].

Песок: 1 — терригенный, 2 — терригенно-оолитовый, 3 — оолитовый; 4 — ракуша целая и битая; крупный алеврит: 5 — слабоизвестковый, 6 — известковый; ил: 7 — мелкоалевритовый слабоизвестковый, 8 — мелкоалевритовый известковый, 9 — алевритово-глинистый слабоизвестковый, 10 — алевритово-глинистый известковый, 11 — глинистый слабоизвестковый, 12 — глинистый известковый, 13 — известковый; зона нулевого осадконакопления; 14 — зона нулевого осадконакопления; 15 — выходы дочетвертичных пород.

Fig. 3. Lithological types of the New Caspian deposits [3].

Sand: 1 — terrigenous, 2 — terrigenous-oolitic, 3 — oolitic; 4 — shell whole and broken; coarse siltstone: 5 — slightly calcareous, 6 — calcareous; silt: 7 — finely aleuvitic slightly calcareous, 8 — finely aleuvitic calcareous, 9 — siltstone-clay slightly calcareous, 10 — siltstone-clay calcareous, 11 — slightly calcareous clay, 12 — calcareous clay, 13 — calcareous; zero sedimentation zone; 14 — zero sedimentation zone; 15 — outcrops of pre-quaternary rocks.

Цель данной публикации — привлечь внимание учёных к современным процессам солянокупольного тектогенеза на акватории Северного Каспия, поскольку до настоящего времени о выходе коренных пород в мелководной северной части Каспийского моря ничего не известно.

Методика исследования

Обнаруженная горная порода, несвойственная для Северного Каспия, представляет собой светлоокрашенную, плотную, плитообразную, уплощённую, скальную породу. В целях дальнейшего исследования был взят образец данной породы. На поверхности отобранного образца имеется тонкая неравномерная рыхлая плёнка карбонатов светло-жёлтого цвета (рис. 4, 5). Глубина моря в районе обнаруженной отмели на момент её обследования, при практически штилевой погоде, составляла не более 0,5—1,0 м.

На свежем сколе порода имеет серый цвет. Она неоднородна по цвету и на поверхности скола хорошо просматриваются тёмно-серые промазки и редкие белые включения. Структура породы микрозернистая (размер кристалликов менее 0,01 мм). Текстура массивная, однородная. Твёрдость по шкале Мооса 3,0—3,5. Удельный вес данной породы 1,76 г/см³. Органических остатков в породе не обнаружено. Генезис хемогенный. Образец очень хорошо впитывает воду. При намокании его вес увеличивается почти на треть (28,8 %). Хрупкий. При нанесении капли 10 % HCl на поверхность образца он бурно реагирует со вскипанием и шипением. Это указывает на то, что порода имеет осадочное происхождение и относится к карбонатным породам. После воздействия 10 % HCl на поверхности породы образуется светлое пятно.

От породы был отколот фрагмент, который подвергся растворению в концентрированной соляной кислоте, в целях получения нерастворимого осадка.

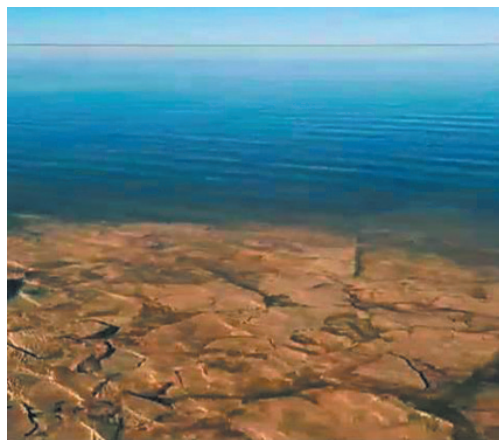


Рис. 4. Обнаруженная на Северном Каспии отмель, состоящая из осадочной скальной горной породы (фото М. И. Токарева).

Fig. 4. A shoal discovered in the Northern Caspian Sea, consisting of sedimentary rock (photo by M. I. Tokarev).



Рис. 5. Образец обнаруженной скальной породы мергеля (фото И. В. Головачева).

Fig. 5. A sample of the discovered marl rock (photo by I. V. Golovachev).

По окончании реакции нерастворимый осадок был отделён, промыт и просушен. Он в сухом виде представляет собой белый порошок, количество которого составило более 50 % от первоначальной породы. В порошке также встречаются редкие мелкие кварцевые песчинки и комочки глины. Порошок тонкодисперсный, без вкуса. Вероятнее всего, это гипс $\text{Ca}[\text{SO}_4] \times 2\text{H}_2\text{O}$. Данное предположение можно сделать также на основании наличия мелких (до 1—2 мм³) белых кристаллических гипсовых включений с весьма совершенной спайностью, видимых на сколотой поверхности образца. Они легко царапаются ногтем и не имеют вкуса, поэтому можно сделать вывод, что данная осадочная порода является гипсовым мергелем, в состав которого входят кальцит, гипс, и менее 1 % глина и кварцевый песок. Все части породы составляют равномерную однородную смесь. Мергель гипсовый содержит в себе гипс как в рассеянном виде, так и в виде включений. В отличие от обычного мергеля, где преобладает известняк и глина, здесь гипс выступает как важный породообразующий компонент.

Обычно мергель не крепкий, а мелоподобный, рыхлый. Однако с глубиной, на стадии раннего катагенеза, или протогенеза, он уплотняется, карбонаты в нём перекристаллизовываются, и мергель становится крепким. Исследуемый образец камнеподобный и плотный. Он вынесен на дневную поверхность в результате процессов солянокупольного тектогенеза, причем возраст его определить довольно сложно.

Результаты исследований

Прикаспийская впадина расположена на юго-восточной окраине Восточно-Европейской платформы. На востоке она ограничена складчатыми сооружениями Урала и Мугоджар. Южно-Эмбинским разломом впадина отделена на юго-востоке от Туранской молодой платформы. На юго-западе граница простирается под Донбасско-Астраханской покровно-надвиговой зоной. В пределах последней верхнепалеозойские складчатые толщи кряжа Карпинского на 35—80 км надвинуты на палеозойские отложения Прикаспийской впадины. Общая мощность осадочного чехла в центральной части впадины до 20—25 км, в прибортовых зонах 7—9 км, и содержит три комплекса: подсолевой, солевой и надсолевой.

Нижний (подсолевой) комплекс — рифейские образования и палеозойские отложения, которые с резким угловым несогласием перекрывают породы фундамента. Плотность пород от 2,45 до 2,75 г/см³. Нижняя часть — терригенные и терригенно-карбонатные породы, карбонаты, средняя часть — карбонатные и терригенные осадки нижнего и среднего карбона. Верхняя — сероцветная моласса докунгурской перми. Мощность от 17 до 5 (север и восток) 10 км.

Солевой кунгурский комплекс — каменные соли с невыдержанными прослоями и линзами терригенных и карбонатных пород. Максимальная мощность 2—4 км. Процессами галогенеза в пределах Прикаспийской впадины сформировано около 1200 соляных структур: диапиров, соляных гряд, соляных подушек (рис. 6) [4]. Надсолевой литологический комплекс сложен в основном терригенными песчано-глинистыми отложениями с подчиненным присутствием карбонатных пород в верхней юре и верхнем мелу и достаточно хорошо изучен.

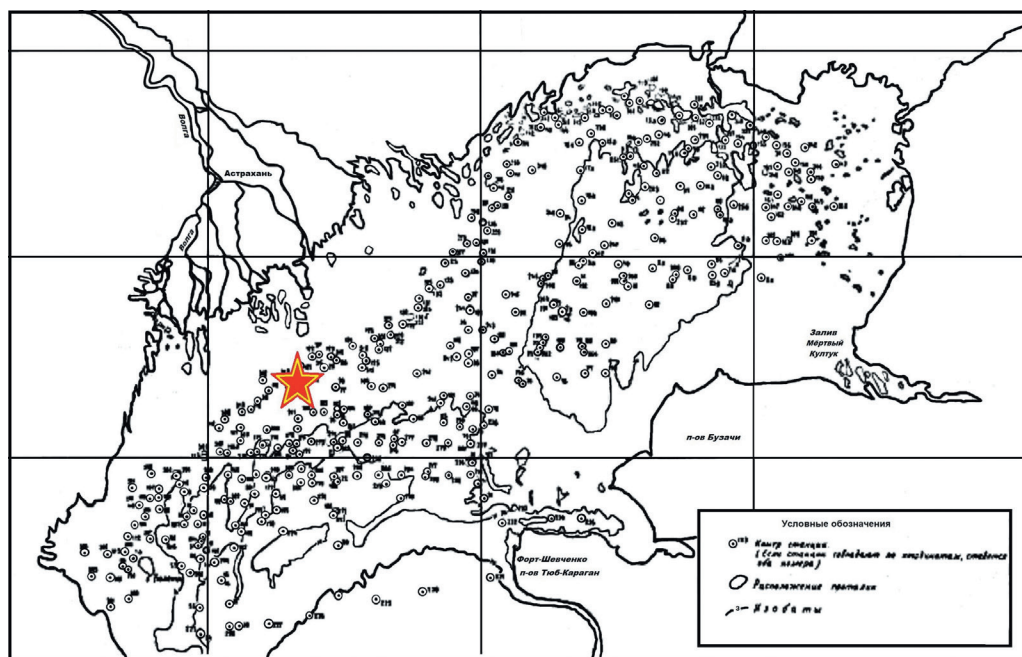


Рис. 6. Схема соляных куполов Северного Каспия (по С. А. Брусиловскому, 1978 г.) [4, 10].

Звездой обозначено место обнаружения отмели.

Fig. 6. Scheme of salt domes of the Northern Caspian Sea (according to S. A. Brusilovsky, 1978) [4, 10].

The star indicates the location of the shoal.

Верхний (надсолевой) комплекс — осадочные образования от верхней перми до четвертичных отложений сложен континентальными грубообломочными терригенными, мергелями, песчаниками, алевролитами. Распространены локальные структуры (региональные прогибы и приподнятые зоны), которые контролируются соляной тектоникой. Плотность пород от 2,04 г/см³ на поверхности до 2,54 г/см³ на глубинах 4,5—5,0 км. Мощность от 2—4 км (обрамление впадины) до 5—6 км (центральная часть).

За последние 150 лет северный регион Каспийского моря подвергается разнообразным антропогенным воздействиям, глобальным и региональным климатическим изменениям, которые не могли не оказывать влияния на состояние его экосистемы. Однако изменчивость подводных комплексов при антропогенных нагрузках и внешних воздействиях в количественном отношении исследованы недостаточно. Для выявления степени влияния антропогенных факторов на экосистему Каспия, в работе [5] представлены результаты взаимосвязи изменений уровня Каспийского моря с рядом климатических, гидрологических, гидрохимических и биологических показателей природной среды.

Заметную роль играют четвертичные и современные движения эпейрогенического характера (плавные поднятия и опускания крупных участков земной коры), стимулируют абразию или размыв течениями поднимающихся участков, аккумуляцию в прогибах или на поднятиях [6]. Вследствие действия указанных факторов на фоне выровненного в целом рельефа возникли многочисленные аккумулятивные формы рельефа — острова и банки.

Донные отложения северной части моря (рис. 1—3) представлены в основном отложениями новокаспийского яруса голоцена [7]. По периферии они образованы песками, ракушей и ракушечным детритом. В ложбинах и бороздинах накапливаются алевроиты, глинистые и известняковые алевроиты. На относительно пологих склонах и в котловинах преобладают глинистые, известковые и карбонатные илы [2].

Материал, участвующий в строении островов и банок, поставляется, главным образом, реками, впадающими в Северный Каспий, Волга и Урал. Некоторое количество осадков — это результат биогенного осадконакопления. Изучение северокаспийских островов (Тюлений, Чистая Банка, Малый Жемчужный и Чечень) показало, что они представляют собой несколько слившихся между собой песчано-ракушечных баров, часто серповидной формы. Другие банки, характерные для северокаспийского мелководья — те же бары, но на разной стадии их развития.

Донные отложения в пределах банок Безымянной, Кулалинской, Большой Жемчужной представлены песками мелкой, средней и крупной зернистости. Области, обрамляющие банки, покрыты сравнительно крупнозернистыми отложениями (оолитовыми и ракушечно-детритовыми), встречаются поля чистой ракушки [7, 8]. Дно центральных частей района подвержено волнению, которое является здесь главным рельефообразующим фактором, благодаря которому в основном осуществляется распределение по дну осадочного материала [9].

Морские льды также способны оказывать прямое механическое, термическое и физико-химическое воздействие на дно и берега. Среди них наиболее опасна экзарация — деструктивное механическое воздействие льдов на грунт, связанное с динамикой ледяного покрова, торошением и стамухообразованием под влиянием гидрометеорологических факторов и рельефа береговой зоны (рис. 7).

Существенно влияют на процессы торошения также мелководность, извилистость береговой линии и сложный рельеф дна с большим количеством подводных банок и кос. При прочих равных термических условиях ледообразования важный фактор, определяющий интенсивность ледово-экзарационного процесса, это текущее положение уровня моря. Современное весьма неравномерное распределение глубин на Северном Каспии — результат развития рельефа в голоцене. В нем запечатлелись периоды многочисленных трансгрессий, регрессий и стабилизаций положения уровня Каспийского моря. Очевидно, что в случае продолжительной трансгрессии (на 2 м и более) зона наиболее интенсивного ледово-экзарационного воздействия, соответствующая, по нашему мнению, интервалу глубины от 4 до 6 м, сместится на современные более мелководные участки и, напротив, в условиях регрессии эта область сместится вниз по современному подводному склону. Таким образом, в условиях трансгрессии область дна, подверженная



Рис. 7. Грунт, вывороченный на поверхность дрейфующим льдом (фото Ф. И. Валлера).

Fig. 7. The soil turned to the surface by drifting ice (photo by F. I. Waller).

ледово-экскавационному воздействию, заметно расширится, а в условиях регрессии резко сократится.

Ледовому выпахиванию (взаимодействию дрейфующих льдов с морским дном) подвержено более 50 % площади Северного Каспия. Эти процессы носят массовый (хотя сезонный) характер, и потому играют важную роль в экологии Каспийского моря. Вследствие механического воздействия дрейфующих льдов происходит не только перемещение огромного количества донного грунта, при этом и происходит разрушение находящихся на дне раковин отмерших моллюсков [10].

В результате интенсивных ледовых подвижек известны случаи разрушения и разгерметизации заглушенных разведочных скважин на шельфе восточного (казахского) сектора Северного Каспия. Большое количество этих скважин находилось на морском побережье, но оказались затопленными в период подъёма уровня Каспийского моря (1976—1996 гг.). Для защиты от механических повреждений в результате подвижек льда созданы барьеры ледовой защиты, окружающие искусственный остров со всех сторон и обеспечивающие защиту объектов ото льда в зимний период, с ноября по апрель.

Аналогичные ледовые процессы происходят в зимний период и в российском секторе Северного Каспия. Производственный и экологический мониторинг, который российская нефтяная компания «Лукойл» осуществляет в зоне поисково-оценочного бурения, выявил следы разрушения защитных плит над местами оголовков скважин на глубине 8—8,5 м. Это однозначно указывает на интенсивное механическое воздействие на них дрейфующих льдов (рис. 8 а, 8 б) [11]. Кроме того, вокруг этих скважин водолазы зафиксировали на дне наличие раздробленных раковин, что характерно для участков дна Северного Каспия, находящихся под воздействием ледово-экскавационных процессов.

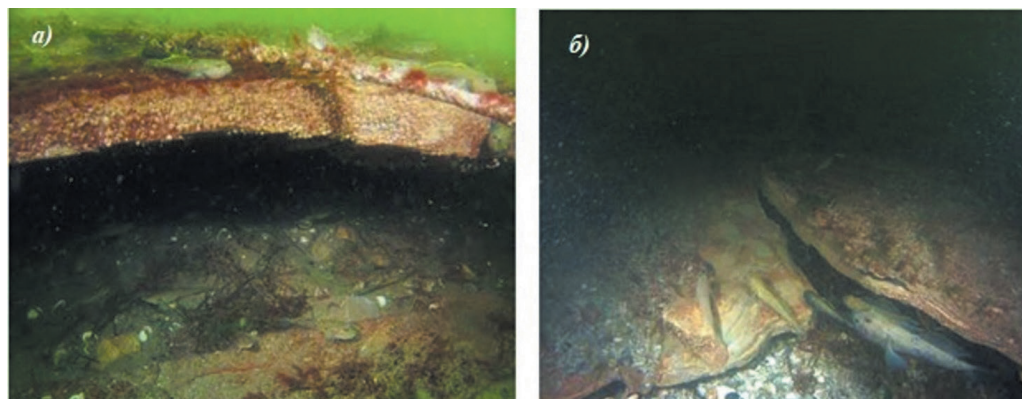


Рис. 8. Разломы защитной плиты, глубина моря 8,5 метра (фото В. Б. Ушивцева) [11].

Fig. 8. Faults of the protective plate, sea depth of 8.5 meters (photo by Ushivtsev V. B.) [11].

Сложность решаемой проблемы определяется слабой изученностью процессов взаимодействия ледяного покрова с донным грунтом Северного Каспия, а также чрезвычайно высокой изменчивостью положения уровня и ледовитости Каспийского моря.

На рис. 9 сплошной линией изображена изобата 5 м. Справа сверху она очерчивает район Гурьевской (Уральской) бороздины, с максимальными глубинами до 7—8 м. В нижней части рисунка пятиметровая изобата обозначает границу дрейфующих льдов (на рисунке ледяной покров обозначен параллельными диагональными линиями). Чёрными точками обозначены торосистые образования, сидящие на грунте (стамухи).

Заключение

А. С. Брусиловский впервые (рис. 6) составил карту расположения соляных куполов на акватории Северного Каспия и высказал предположение о взаимосвязи состояния ледяного покрова и положения полыней с наличием на акватории Северного Каспия соляных куполов. Он считает, что на мелководье, в междуречье Волги и Урала (именно здесь наиболее часто, в припайном льду, отмечаются полыни), распресненные каспийские воды, соленость которых составляет здесь не более 3—5 промилле, растворяют вершины соляных куполов. В результате происходит значительное локальное увеличение солености воды, что в холодный период года приводит к замедлению процессов ледообразования и появлению незамерзающих полыней [4, 10].

Обнаруженный нами на Северном Каспии выход коренных пород и проведенный анализ косвенно подтверждают вероятность такой зависимости. Безусловно, наше предположение о размыве гипсово-мергельных отложений (кепроков) на сводах соляных куполов Северо-Каспийского мелководья нуждается в проверке бурением со льда либо геофизическими методами (возможно, четверть-милигалльная

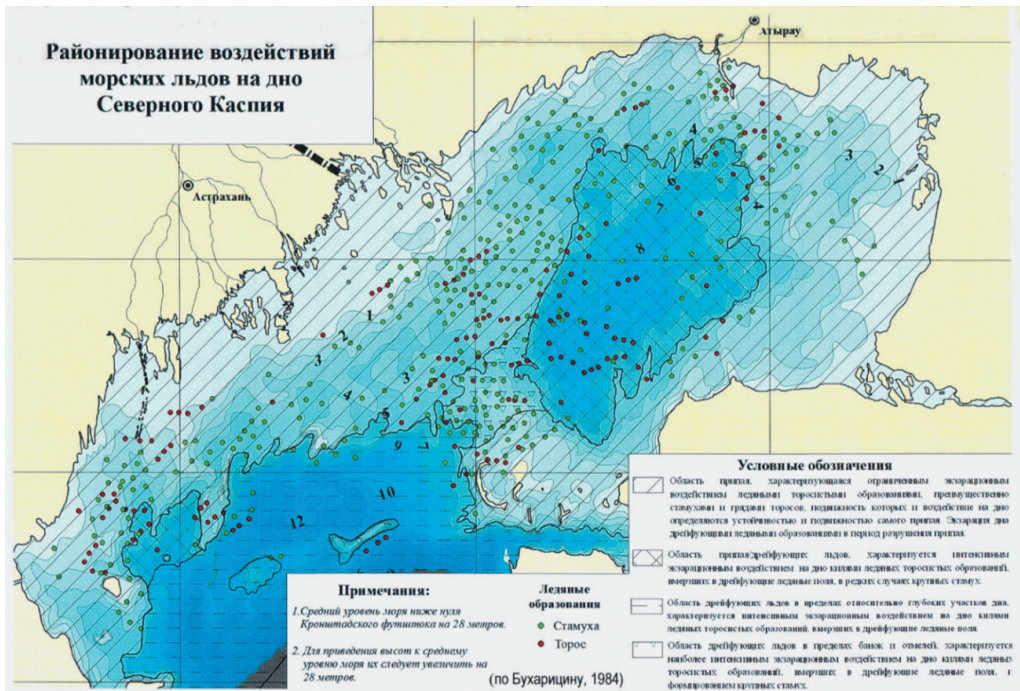


Рис. 9. Схема районирования воздействия дрейфующих морских льдов на дно Северного Каспия [12].

Fig. 9. The zoning scheme of the impact of drifting sea ice on the bottom of the Northern Caspian Sea [12].

гравиразведка, т.е. высокоточная гравиметрическая съёмка с шагом изолиний в 0,25 мГал).

Наличие соляных куполов на акватории Северного Каспия оказывает влияние не только на процессы ледообразования. Проявляются они и в гидрологических, гидробиологических особенностях вод этих районов моря, что представляет не только научный, но и практический интерес. Изменение подводного ландшафта, структуры грунтов привело к полному исчезновению водорослей, и, как следствие, к смене состава гидробионтов. Изменился и характер взаимодействия дрейфующих льдов со скальным грунтом. Если в мягком и рыхлом грунте подводные кили дрейфующих торосистых льдов образуют характерные борозды выпаживания, то при взаимодействии с твердым скальным грунтом происходит его дробление, что хорошо видно на рис. 4 и рис. 8.

К сожалению, эти районы моря труднодоступны для экспедиционных исследований, как со стороны моря, так и со стороны берега, поэтому об окончательных выводах говорить рано. В связи с развитием космической техники в нашей стране разработаны принципиально новые, перспективные методы изучения гидрологического режима морей и океанов, которые, безусловно, помогут в дальнейших

исследованиях процессов соляно-купольной тектоники мелководной северной части Каспийского моря.

Следует отметить, что подобные факты имеют место и в других частях земного шара. Не исключено, что нечто подобное происходит на мелководьях побережий Мексиканского залива, на шельфе Нормандии с его ежесуточными значительными перепадами уровней Северного моря и мощным воздействием на отмели дна приливно-отливных течений: <http://oceanfromspace.scanex.ru/index.php/ocean/bottom>.

На дне северной Ладоги найдены три субвертикальных уступа высотой до 70—100 м, сложенных коренными породами: <https://dzen.ru/a/amrYwNhFcWJJCLe>. Но главное даже не в этом. На блоках коренных пород нет видимых следов гляциальной обработки. Очевидно, эти уступы образовались уже после того, как ледник отступил, т. е. в голоцене, последние двенадцать тысяч лет. Озеро, которое считалось геологически спокойным, оказалось ареной современных тектонических движений. Ширина разломов — несколько метров, глубина от семидесяти до ста метров. Это не трещинки. Это настоящие пропасти, которые, возможно, продолжают расти прямо сейчас.

Список литературы

1. Катунин Д. Н., Хрипунов И. А. Динамика грунтов северной части Каспийского моря // Известия Всесоюзного географического общества. Том 103. Вып. 5. 1971. С. 469—475.
2. Глумов И. Ф., Маловицкий Я. П., Новиков А. А., Сенин Б. В. Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. М.: Недра, 2004. 342 с.
3. Лебедев Л. И., Алексина И. А., Кулакова Л. С. и др. Каспийское море: Геология и нефтегазоносность. М.: Наука, 1987. 295 с.
4. Питьева К. Е. Гидрогеохимия (формирование химического состава подземных вод). Учеб. пособие. / Под ред. С. А. Брусиловского. Издательство Московского университета, 1978. 328 с.
5. Митина Н. Н., Малашенков Б. М., Телитченко Л. А. Подводные ландшафты Северного Каспия: структура, гидроэкология, охрана. ИВП РАН. Изд-во ФГУП «Типография Россельхозакадемии». 2016. 215 с.
6. Леонтьев О. К., Маев Е. Г., Рычагов Г. И. Геоморфология берегов и дна Каспийского моря. М.: Изд-во МГУ, 1977. 208 с.
7. Лебедев С. А., Маев И. Г., Бордовский О. К., Кулакова Л. С. Осадки Каспийского моря. М.: Наука, 1973. 119 с.
8. Хрусталёв Ю. П. Закономерности осадконакопления в Северном Каспии. Ростов на Дону: Изд-во Ростовского ун-та. 1978. 207 с.
9. Каспийское море: Структура и динамика вод. М.: Наука, 1990. 164 с.
10. Bukharitsin P. Studies ice Caspian, azov and aral sea. Москва.: 2022. 188 p. doi: 10.17513/np.534.
11. Бухарицин П. И., Орлов Р. С. Оценка воздействия дрейфующих льдов Северного Каспия на дно и искусственные сооружения // Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 66—79. doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-66-79.
12. Огородов С. А., Мазнев С. В., Бухарицин П. И. Ледово-экзарационный рельеф на дне Каспийского и Аральского морей // Известия Русского географического общества. 2019. Т. 151. № 2. С. 35—50. doi: 10.31857/S0869-6071151235-50.

References

1. Katunin D. N., Khripunov I. A. Dynamics of the Northern Caspian Sea Soils. *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva = Izvestiya of the All-Union Geographical Society*. 1971; 103(5): (469—475). (In Russ.).

2. Glumov I. F., Malovitsky Ya. P., Novikov A. A., Senin B. V. *Regional'naya geologiya i neftegazonosnost' Kaspijskogo morya* = *Regional Geology and Oil and Gas Potential of the Caspian Sea*. Moscow: Nedra; Nedra-Businesscenter. 2004: 342 p. (In Russ.).
3. Lebedev L. I., Aleksina I. A., Kulakova L. S. et al. *Kaspijskoe more: Geologiya i neftegazonosnost'* = *The Caspian Sea: Geology and oil and gas potential*. Moscow: Nauka Publ. 1987: 295 p. (In Russ.).
4. Pisheva K. E. *Gidrogeohimiya (formirovanie himicheskogo sostava podzemnyh vod)* = *Hydrogeochemistry (formation of the chemical composition of groundwater)*. Textbook. Editor: Brusilovsky S.A. Moscow University Publishing House. 1978: 328 p. (In Russ.).
5. Mitina N. N., Malashenkov B. M., and Telitchenko L. A. *Podvodnye landshafty Severnogo Kaspiya: struktura, gidroekologiya, ohrana* = *Underwater Landscapes of the Northern Caspian Sea: Structure, Hydroecology, and Protection*. Moscow: IPR RAS, 2016: 215 p. (In Russ.).
6. Leontiev O. K., Maev E. G., Rychagov G. I. *Geomorfologiya beregov i dna Kaspijskogo morya* = *Geomorphology of the Coasts and the Bottom of the Caspian Sea*. M.: Publishing House of Moscow State University. 1977: 208 p. (In Russ.).
7. Lebedev S. A., Maev I. G., Bordovsky O. K., Kulakova L. S. *Osadki Kaspijskogo morya* = *Sediments of the Caspian Sea*. Moscow: Nauka. 1973. 119 p. (In Russ.).
8. Khrustalyov Yu. P. *Zakonomernosti osadkonakopleniya v Severnom Kaspii* = *Patterns of sedimentation in the Northern Caspian Sea*. Rostov on Don: Rostov University Press. 1978: 207 p. (In Russ.).
9. *Kaspijskoe more: Struktura i dinamika vod* = *The Caspian Sea: Structure and Dynamics of Waters*. Moscow: Nauka. 1990: 164 p. (In Russ.).
10. Bukharitsin P. Studies ice Caspian, azov and aral sea Москва, 2022. 188 p. doi: 10.17513/np.534
11. Bukharitsin P. I., Orlov R. S. Assessment of the impact of the drifting ice of the Northern Caspian Sea on the bottom and artificial structures. *Gidrometeorologiya i ekologiya* = *Hydrometeorology and Ecology*. 2025; (78): (66—79). doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-66-79. (In Russ.).
12. Ogorodov S. A., Maznev S. V., Bukharitsin P. I. Ice-extraction relief at the bottom of the Caspian and Aral seas. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshhestva* = *Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2019; 151(2): (35—50). doi: 10.31857/S0869-6071151235-50. (In Russ.).

Информация об авторах

Бухарицин Петр Иванович, доктор географических наук, профессор, экспертная группа ФГБУН Института водных проблем РАН, эксперт, astrgo@mail.ru.

Головачев Илья Владимирович, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры технологии материалов и промышленной инженерии, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, bask_speleo@mail.ru.

Information about authors

Bukharitsin Petr Ivanovich, Doctor of Geography, Professor, Expert group of the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, expert.

Golovachev Ilya Vladimirovich, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials Technology and Industrial Engineering, Astrakhan State University named after V. N. Tatishchev.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 21.04.2026

Принята в печать 31.07.2026

The article was received on 21.04.2026

The article was accepted on 31.07.2026

Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 438—454.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(84):438—454.

Научная статья

УДК 551.526.6:551.465.4(268.45)

doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-39-438-454

Роль атмосферы в тепловом балансе поверхности юго-восточной части Баренцева моря

Диана Витальевна Дешова¹, Светлана Михайловна Гордеева^{1, 2}

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, d.deshova@rshu.ru

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

Аннотация. В статье рассматривается межгодовая изменчивость характеристик атмосферы, их вклад в тепловой баланс поверхности юго-восточной части Баренцева моря (Печорское море) и их связи с адвективными процессами в море. По данным реанализа ECMWF ERA5, за период с 1993 г. по 2025 г. зафиксировано значительное усиление всех потоков тепла между морем и атмосферой, особенно в холодное полугодие. Однако, начиная с середины 2010-х гг., межгодовая изменчивость потоков тепла демонстрирует признаки стабилизации на новом уровне, когда температура поверхности моря перестает расти, а ветер ослабевает, что указывает на замедление потепления в регионе. Сопоставление атмосферных процессов с переносом тепла течениями показало, что избыток адвективного тепла почти полностью компенсируется его отдачей в атмосферу, но внутригодовая структура этого обмена различна.

Ключевые слова: Баренцево море, взаимодействие океана с атмосферой, Печорское море, тепловой баланс, ECMWF ERA5.

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ FSZU-2023-0002.

Для цитирования: Дешова Д. В., Гордеева С. М. Роль атмосферы в тепловом балансе поверхности юго-восточной части Баренцева моря // Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 438—454. doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-39-438-454.

Original article

The role of the atmosphere in the heat balance of the surface of the south-eastern part of the Barents Sea

Diana V. Deshova¹, Svetlana M. Gordeeva^{1, 2}

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russian Federation

² Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Summary. The article considers the interannual variability of atmospheric characteristics, their contribution to the heat balance of the south-eastern part of the Barents Sea (Pechora Sea) surface and their relationship to advective processes in the sea. Based on the monthly average data of the ECMWF ERA5 reanalysis for the period from 1993 to 2025 for the cold and warm half-years for the surface of the Pechora

Sea (boundaries: longitude 50 E in the west, latitude 71 N in the north and in the Kara Gate Strait), the atmospheric pressure, sea surface temperature, wind speed and components of heat exchange with the atmosphere (radiation balance and longwave radiation, latent and sensible heat fluxes) are estimated.

It was established that atmospheric conditions over the water area are characterized by low pressure and pronounced seasonal changes in wind direction: in winter, flows from the mainland prevail, while in summer flows from neighboring seas dominate. An analysis of surface heat flux revealed that the sea actively releases heat to the atmosphere during the cold season (10.3 TW) and receives it during the warm season (6.4 TW). During the study period, a steady increase in sea surface temperature was recorded (0.13 TW/year), accompanied by increased radiation balance in summer. This is reflected in a significant increase in all heat fluxes between the sea and the atmosphere, especially during the cold half of the year. At the same time, since the mid-2010s, interannual variability has shown signs of stabilization at a new level, with surface temperatures ceasing to rise and winds weakening, indicating a possible transition of the regional climate system to a state of dynamic equilibrium.

Principal component analysis demonstrated that the majority of variability is determined by heat exchange processes directly related to surface temperature (52—54 % of variance) with exception is radiation balance, which reflects this relationship with SST only during the warm period. Variability in wind and atmospheric pressure are identified as two weaker, independent physical processes. The strong statistical correlation between surface heat fluxes allows for forecasting the thermal state of regional waters up to six months in advance.

A comparison of atmospheric processes with heat transfer by currents (for period 1993—2018) revealed that excess advective heat is almost completely offset by its release to the atmosphere. However, the intra-annual structure of this exchange is heterogeneous: advective fluxes are small compared to heat fluxes at the water surface, not exceeding 28%. An assessment of the overall heat balance revealed a change in climatic phases: while the heat content of the sea increased at the beginning of the period (1993—2006), a general cooling of the water area (2007—2018) subsequently began due to a decrease in heat influx via currents during the warm half-year and increased heat loss through the surface in winter.

Keywords: Barents Sea, sea-atmosphere interaction, Pechora Sea, heat balance, ECMWF ERA5.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation № FSZU-2023-0002.

For citation: Deshova D. V., Gordeeva S. M. The role of the atmosphere in the heat balance of the surface of the south-eastern part of the Barents Sea. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(84):(438—454). doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-39-438-454. (In Russ.).

Введение

Баренцево море является одним из самых больших по площади морей в бассейне Северного Ледовитого океана. Здесь отмечаются различные динамические процессы [1, 2]: квацистационарные циркуляции, течения синоптического масштаба и приливные течения, активный теплообмен с атмосферой. Ветвь Нордкапского течения приносит в западную часть акватории теплые и соленые атлантические воды, в южной части из Белого моря с Беломорским течением и со стоком р. Печоры приходят потоки опресненных вод, на севере и востоке вследствие водообмена с Карским морем, в Баренцево море поступают холодные арктические воды. В результате происходит активное тепловое и динамическое взаимодействие деятельного слоя моря и атмосферы. Таким образом, наблюдается приток на акваторию различных типов водных масс, а также формирование «местной» баренцевоморской водной массы в результате перемешивания и трансформации вод.

Одним из подходов к исследованию любого бассейна является балансовый метод [3], который позволяет сопоставлять и оценивать степень воздействия

отдельных источников на общий режим водного объекта за различные периоды времени, выявлять закономерности изменения гидрологических процессов, происходящих под влиянием теплообмена между соседними водными объектами и атмосферой.

Водный, тепловой и солевой балансы представляют собой количественное соотношение притока, расхода и аккумуляции (запаса) воды, тепла или соли для исследуемого объекта за определенный промежуток времени.

Все характеристики балансов для Баренцева моря рассматривались неоднократно разными исследователями. В работе [4] рассмотрено взаимодействие в системе океан—атмосфера в Баренцевом море по данным реанализов за период с 1993 г. по 2014 г. Скорость течения и температура воды, по которым рассчитывался океанический поток тепла, взяты из базы данных ARMOR-3D, где совместно используются натурные и спутниковые данные. Температура воздуха и скорость ветра взяты из базы ERA-Interim, с их помощью произведен расчет адвективных атмосферных потоков тепла. Из базы OAFflux, где использован синтез спутниковых данных и трех атмосферных реанализов (NCEP1, NCEP2 и ERA40), взяты турбулентные потоки тепла на границе океан-атмосфера.

Авторы выявили, что среднее значение океанического потока тепла на западной границе Баренцева моря за период с 1993 г. по 2014 г. равно 102 ± 16 ТВт, усиление притока тепла приводит к отступанию кромки льда в Баренцевом море и ослаблению суммарных вертикальных потоков тепла на границе океан-атмосфера в юго-западной области. В юго-восточной части Баренцева моря за период с 1993 г. по 2014 г. по результатам исследования средний рост потоков тепла в атмосферу в среднегодовом осреднении составил 48 Вт/м^2 , а при зимнем осреднении — 98 Вт/м^2 .

В работе [5] исследованы среднесуточные аномалии температуры воздуха на высоте 2 м в западной части Российской Арктики за период с 1980 г. по 2022 г. по данным реанализов MERRA-2 и ERA5, рассчитаны среднеквадратические отклонения аномалий и их распределение за год. Выявлено увеличение амплитуды, продолжительности и числа экстремальных событий с положительными аномалиями над частью акваторий Баренцева, Карского и Белого морей. При этом для отрицательных аномалий данные параметры сокращаются. Также исследователи показали, что результаты, полученные по разным реанализам (ERA5 и MERRA-2) во многом совпадают. Это свидетельствует о достоверности полученных результатов и возможности использования данных из реанализов.

М. Ортун и др. рассмотрели межгодовую и десятилетнюю изменчивость климатических процессов в Баренцевом море на основе моделирования ретроспективного прогноза на 40 лет — с 1958 г. по 1997 г. [6] и на 60 лет — с 1948 г. по 2007 г. [7] с использованием региональной сопряженной модели лед—океан HAMSUM. Показано, что изменчивость интегрального теплосодержания на акватории Баренцева моря значимо коррелирует с притоком тепла на западной границе акватории. Процессы протекают с некоторым сдвигом по времени относительно друг друга. Сначала происходит усиление океанического потока тепла на границе, затем через 1—10 месяцев увеличивается теплосодержание Баренцева

моря, а после этого рост вертикальных потоков тепла на границе океан—атмосфера через 1—5 месяцев.

Зачастую исследование больших неоднородных акваторий целесообразно проводить с разделением на отдельные участки и с учетом их локальных особенностей. Юго-восточная часть Баренцева моря по совокупности своих природных условий отличается от остальной акватории. Наиболее значительные различия обусловлены слабым влиянием Норвежского течения, заходящего в Баренцево море, вследствие чего здесь наблюдаются более суровый климат и ледовые условия [8]. Данный район Баренцева моря можно рассматривать как Печорское море. Линии условных границ данной акватории идут от мыса Чёрный на о. Южный архипелага Новая Земля до северной оконечности о. Колгуев и от южной оконечности о. Колгуев до материка по меридиану 48 в.д. Проливы Карские Ворота и Югорский Шар к Печорскому морю не относятся [2].

Печорское море как отдельную от Баренцева моря акваторию чаще всего рассматривают с точки зрения использования ресурсов. В экологическом атласе, разработанном ООО «Газпром нефть шельф» [2], Печорское море рассматривается как объект экосистемы Арктики. Здесь описана программа сохранения биоразнообразия в районе платформы «Приразломная», приведены природные и гидрологические условия. В летний период температура поверхностного слоя воды изменяется от 5 °С до 8 °С, а в зимний период — от –1,8 °С до 0 °С. В весенний и осенний периоды температура поверхности моря в среднем составляет 0—4 °С. Распределение солёности в Печорском море зависит от поступления атлантических вод, системы течений, рельефа дна, процессов образования и таяния льда, речного стока и перемешивания вод. Вследствие воздействия всех этих факторов воды Печорского моря распреснены больше, чем воды Баренцева моря. Зимой во время интенсивного ледообразования солёность моря велика и составляет около 32,5—33,0 ‰. Летом в северной части акватории Печорского моря солёность снижается до 32 ‰ из-за общего летнего понижения солёности и значительного поступления с течением Литке сильно опресненных вод Карского моря, а в южной части до 20—25 ‰ из-за паводковых стоков р. Печоры.

В проведенном ранее нами исследовании [9] за период с 1993 г. по 2018 г. определялся водный, тепловой и солевой баланс вод Печорского моря на основе адвекции вод на границах акватории, который замыкался величинами речного стока, изменения уровня моря, осадков и испарения, теплообмена с атмосферой. Использовались среднемесячные данные по температуре, солёности воды и скорости течения из реанализа MERCATOR GLORYS12V1 морской службы Copernicus [https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030]. Сумма всех основных компонентов баланса вод в среднем многолетнем усреднении составила:

- для водного баланса: приток — 0,52 Св, отток — 0,53 Св;
- для теплового баланса: приток — 7,08 ТВт, отток — 7,12 ТВт (1 ТВт = 10^{12} Вт);
- для солевого баланса: приток — 18,05 т/с, отток — 17,82 т/с.

Результаты по отдельным составляющим баланса из исследования [9] за период с 1993 г. по 2018 г. приведены на рис. 1.

В работе [9] выявлено, что адвекция через границы акватории играет главную роль в формировании всех балансов. Основной поток вод направлен с северо-запада акватории транзитом через пролив Карские Ворота в Карское море, анализ линейных трендов указал на рост данного потока. Установлено, что избыток тепла (1,82 ТВт), поступающего в акваторию Печорского моря вследствие водообмена с соседними регионами, в многолетнем усреднении почти полностью компенсируется взаимодействием с атмосферой.

Целью данной работы являлась оценка вклада отдельных характеристик атмосферы в тепловой баланс поверхности Печорского моря.

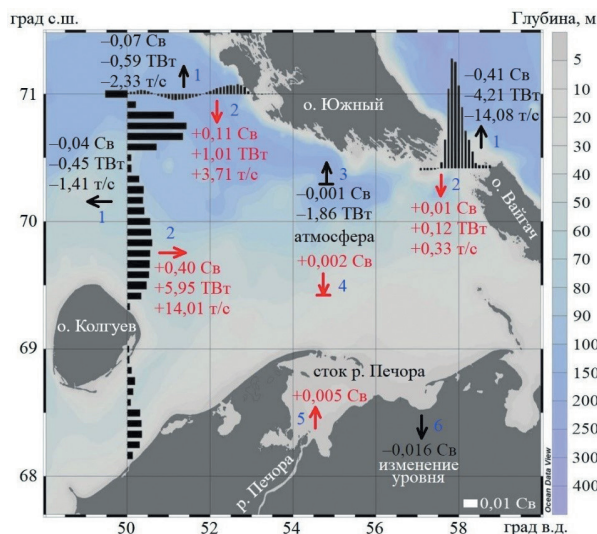


Рис. 1. Оценки компонентов водного (Св), теплового (ТВт) и солевого (т/с) баланса юго-восточной части Баренцева моря [9].

Стрелками показаны направления потоков (красные — поступление в акваторию, черные — уход из акватории. 1 — отток воды, тепла и соли за счет адвекции на границах акватории, 2 — приток воды, тепла и соли за счет адвекции, 3 — испарение воды и теплоотдача в атмосферу, 4 — атмосферные осадки; 5 — сток р. Печоры, 6 — изменение уровня моря). Черные столбцы на границах региона показывают величину интегрального по глубине потока на вертикалях сетки. Длина столбцов отражает поток в сравнении с длиной прямоугольника для масштаба 0,01 Св в правом нижнем углу.

Fig. 1. Estimates of the components of water (Sv), heat (TW) and salt (t/s) balances of the south-eastern part of the Barents Sea [9].

The arrows show the flux directions (red — into the water area, black — out one; 1 — outflow of water, heat and salt due to advection at the boundaries of the water area, 2 — inflow of water, heat and salt due to advection, 3 — evaporation of water and heat transfer to the atmosphere, 4 — atmospheric precipitation; 5 — runoff of the Pechora River, 6 — change in sea level). The black bars on the region borders show the depth-integral flow on the verticals in grid. The bar lengths reflect the flux compared to the length of the box for a scale of 0.01 Sv in the lower right corner.

Исходные данные и методы исследования

Исходными данными в работе послужили: атмосферное давление (Pa), температура поверхности моря (ТПМ), зональная (U) и меридиональная (V) компоненты ветра, а также четыре составляющих теплообмена с атмосферой — радиационный баланс (R), баланс длинноволнового излучения ($I_{\text{эф}}$), скрытый (LE) и явный (F) потоки тепла, которые были заимствованы из архива реанализа ERA5 службы климатической изменчивости Copernicus [<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means>]. ERA5 — это реанализ глобального климата и погоды пятого поколения ECMWF за последние восемь десятилетий. В реанализе доступны ежечасные и ежемесячные данные с 1940 г. по настоящее время. Разрешение сетки широта—долгота $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.

Выбирались среднемесячные данные в 349 точках за период с 1993 г. по 2025 г. для поверхности Печорского моря, в качестве его границ рассматривались разрезы по долготе 50 в.д. на западе, по широте 71 с.ш. на севере и в проливе Карские Ворота (рис. 1). В ходе выполнения работы для всего периода рассматривались отдельно условно холодное (октябрь—март) и теплое полугодия (апрель—сентябрь) (разделение проводилось по календарным месяцам и сезонам). Первое холодное полугодие относится к зиме 1993/94 гг., последнее — к зиме 2025/26 гг.

Каждая из составляющих теплообмена с атмосферой представляет собой суммарный поток со всей акватории моря, полученный суммированием по всем 349 точкам с учетом площади квадрата расчетной сетки в зависимости от широты. При этом оценка потоков тепла переводилась из Дж/сут в ТВт.

Влияние ледяного покрова на теплообмен Печорского моря с атмосферой напрямую нами не рассматривалось. Опосредованно оно учитывается в расчете тепловых потоков на поверхности моря в реанализе ERA5.

Внешний тепловой баланс поверхности моря (B) рассчитывался по формуле:

$$B = R + I_{\text{эф}} + LE + F, \quad (1)$$

где R — баланс коротковолновой радиации, состоящий из суммы прямой и рассеянной солнечной радиации за вычетом отраженного поверхностью Земли потока радиации с учетом альбедо; $I_{\text{эф}}$ — баланс длинноволновой радиации (эффективное излучение); представляющий собой разность между собственным длинноволновым излучением с поверхности моря и противоизлучением атмосферы, зависящим от вертикального распределения температуры, влажности воздуха, парниковых газов и облачности; LE — скрытый поток тепла с поверхности; F — явный поток тепла с поверхности. Естественно, при оценке B не учитываются адвективные потоки тепла, теплообмен с нижележащими слоями воды и изменения тепла при фазовых переходах воды в лед и обратно.

Согласно соглашению Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), вертикальные потоки считаются положительными, если они направлены вниз [10].

Результаты расчетов и их обсуждение

Прежде всего, рассмотрим оценку вкладов отдельных параметров атмосферы в тепловой баланс поверхности моря за период с 1993 г. по 2025 г., которые

представлены в табл. 1 и на рис. 2. В холодное полугодие атмосферное давление составляет 1009 гПа, а в теплое полугодие атмосферное давление выше и равно 1012 гПа. Средняя скорость ветра при этом в холодный период немного выше (2,96 м/с), чем в теплый (2,22 м/с). Наиболее часто повторяющимся в холодный период является ветер южных направлений (69 %), а в теплый период, наоборот, преобладает ветер северных и западных направлений (повторяемость в сумме 84 %). Таким образом, в холодный период года преобладают потоки воздуха с материка, а в теплый период — с соседних акваторий. Средняя температура поверхности моря в холодное полугодие около нуля (–0,03 °С), а в теплое — 3,14 °С.

Потоки тепла из моря в атмосферу в холодное полугодие выше, чем в теплое: скрытый и явный потоки тепла (–3,32 и –3,40 ТВт против –1,65 и –0,15 ТВт, соответственно), длинноволновое излучение (–4,29 ТВт против –3,52 ТВт). При этом радиационный баланс поверхности моря в теплый период (11,67 ТВт) на порядок выше по сравнению с холодным (0,76 ТВт), вследствие чего происходит суммарная значительная теплоотдача поверхности моря в холодный период (–10,3 ТВт) и некоторый нагрев в летний период (6,4 ТВт).

Таблица 1

Средние многолетние значения гидрометеорологических характеристик для холодного и теплого полугодий на акватории Печорского моря за период с 1993 г. по 2025 г.

Average long-term values of hydrometeorological characteristics for the cold and warm half-years in the Pechora Sea for 1993—2025

Параметр	Среднее значение	
	Холодное полугодие	Теплое полугодие
Давление (P_a), гПа	1009	1012
Скорость ветра (W), м/с	2,96	2,22
Повторяемость ветра	ЮЗ 27 %	СВ 35 %
	Ю 24 %	З 22 %
	ЮВ 18 %	СЗ, С 13 %
ТПМ, °С	–0,03	3,14
Скрытый поток тепла (LE), ТВт	–3,32	–1,65
Явный поток тепла (F), ТВт	–3,40	–0,15
Длинноволновое излучение (Изф), ТВт	–4,29	–3,52
Радиационный баланс (R), ТВт	0,76	11,67
Суммарный теплообмен с атмосферой (Q), ТВт	–10,26	6,35

Тренды в атмосферном давлении и скорости ветра за период с 1993 г. по 2025 г. статистически незначимы (табл. 2, рис. 2). Тренды для температуры поверхности моря в холодное и теплое полугодия положительны (0,06 и 0,13 °С/год), но в летний период температура растет быстрее. Все составляющие теплообмена с атмосферой в оба периода года значимо усиливаются (табл. 2, рис. 3). В результате общая теплоотдача с поверхности моря (напоминаем, что отрицательный тренд характеризует увеличение восходящих потоков) в холодный период со временем увеличивается сильнее (0,10 ТВт/год) в сравнении с теплым периодом (0,01 ТВт/год).

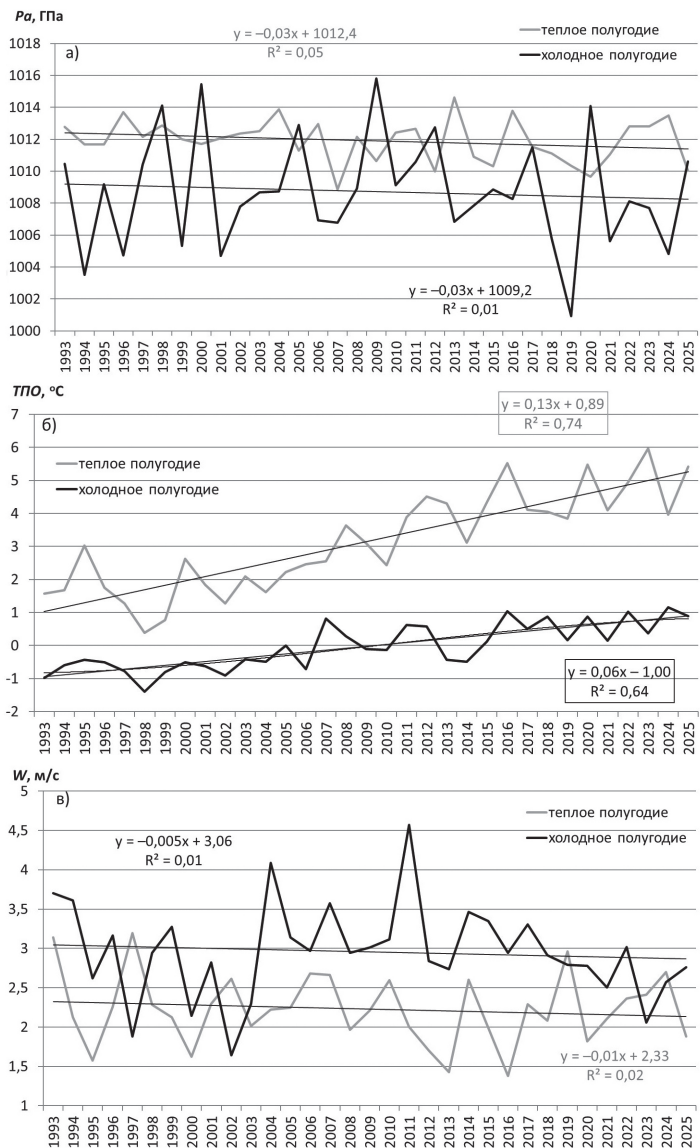


Рис. 2. Межгодовая изменчивость параметров и их линейные тренды за период с 1993 г. по 2025 г. для холодного (черный) и теплого (серый) полугодий.

Рамкой выделены уравнения со значимыми коэффициентами линейного тренда ($\alpha = 0,05$).
а) атмосферное давление P_a , б) температура поверхности моря, в) средняя скорость ветра W .

Fig. 2. Interannual variability of parameters and their linear trends for the period 1993—2025 for the cold (black) and warm (gray) halves of the year.

Equations with significant linear trend coefficients are highlighted by frame ($\alpha = 0,05$).
а) atmospheric pressure P_a , б) sea surface temperature, в) wind speed W .

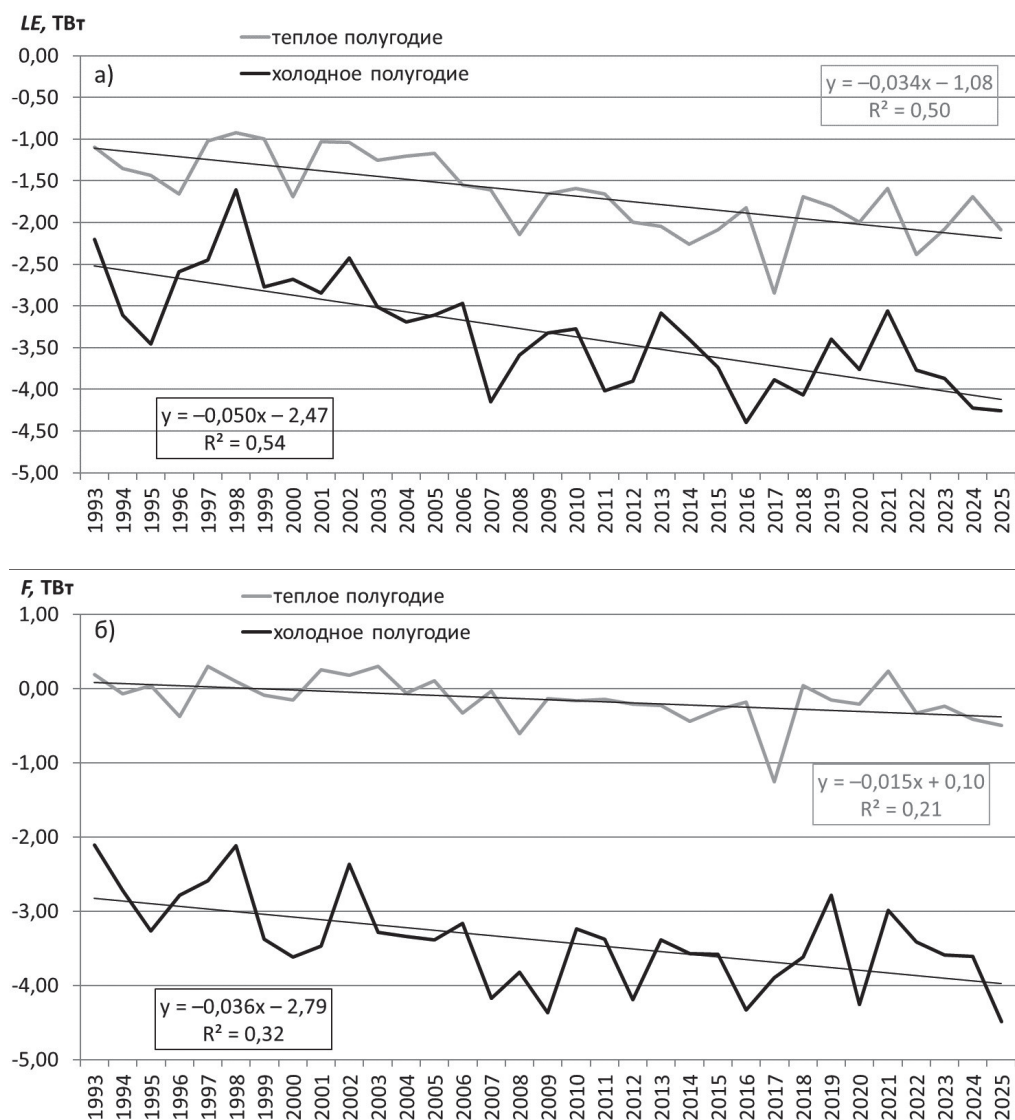


Рис. 3 (начало). Межгодовая изменчивость составляющих теплового баланса поверхности моря и их линейные тренды за период с 1993 г. по 2025 г. для холодного (черный) и теплого (серый) полугодий.

Рамкой выделены уравнения со значимыми коэффициентами линейного тренда ($\alpha = 0,05$).

а) скрытый поток тепла LE, б) явный поток тепла F.

Fig. 3 (beginning). Interannual variability of sea surface heat balance components and their linear trends for the period 1993—2025 for the cold (black) and warm (gray) halves of the year.

Equations with significant linear trend coefficients are highlighted by frame ($\alpha = 0,05$).

а) latent heat flux LE, б) sensible heat flux F.

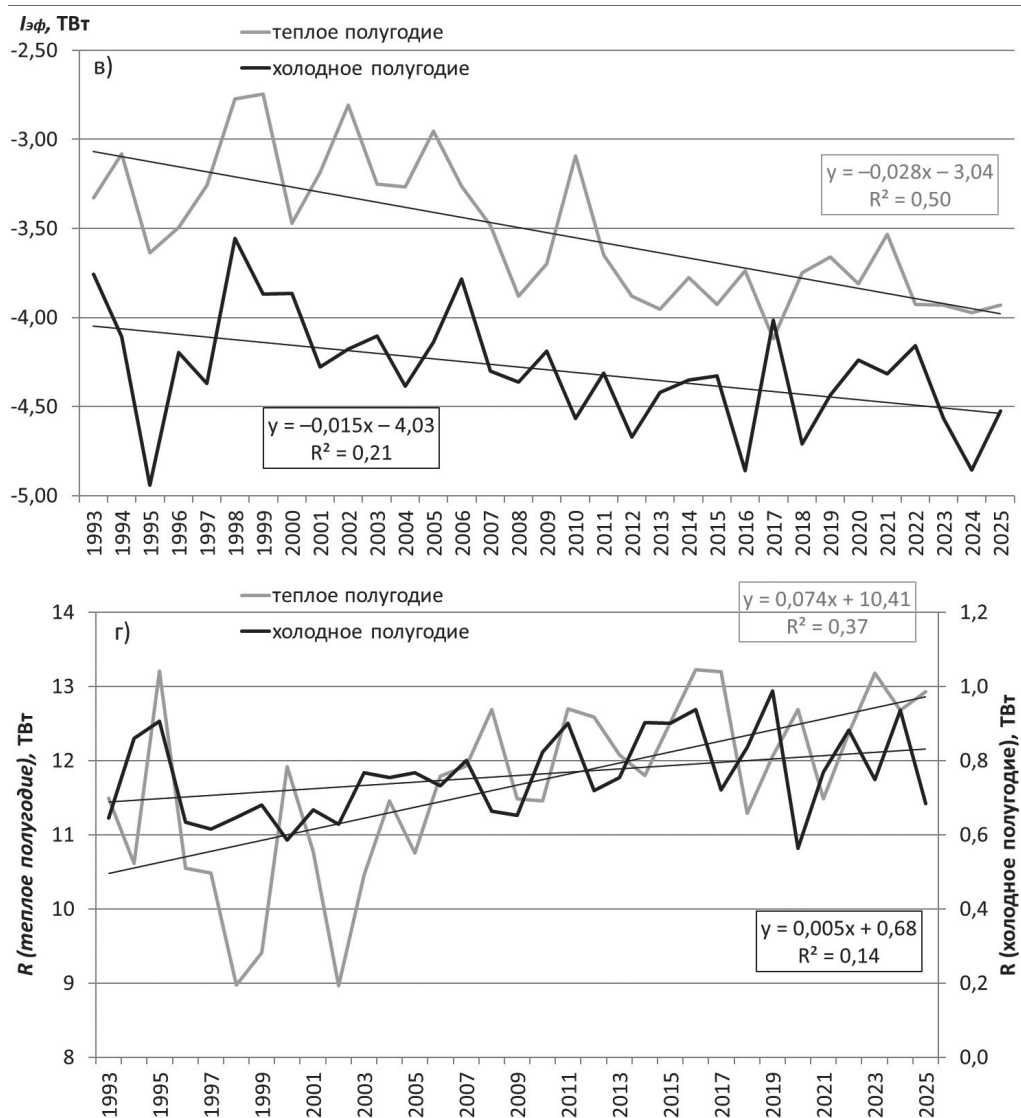


Рис. 3 (окончание). Межгодовая изменчивость составляющих теплового баланса поверхности моря и их линейные тренды за период с 1993 г. по 2025 г. для холодного (черный) и теплого (серый) полугодий.

Рамкой выделены уравнения со значимыми коэффициентами линейного тренда ($\alpha = 0,05$).

б) длинноволновое излучение $I_{эф}$, з) радиационный баланс R .

Fig. 3 (ending). Interannual variability of sea surface heat balance components and their linear trends for the period 1993—2025 for the cold (black) and warm (gray) halves of the year.

Equations with significant linear trend coefficients are highlighted by frame ($\alpha = 0,05$).

б) longwave (thermal) radiation $I_{эф}$, з) radiation balance R .

Таблица 2

Коэффициенты линейного тренда атмосферных параметров над акваторией Печорского моря для периода с 1993 г. по 2025 г. Выделены значимые коэффициенты ($\alpha = 0,05$)

Linear trend coefficients of atmospheric parameters over the Pechora Sea for the period 1993—2025. Significant coefficients are highlighted ($\alpha = 0,05$)

Параметр	Коэффициент линейного тренда, год ⁻¹					
	Холодное полугодие			Теплое полугодие		
	1993—2025	1993—2014	2015—2025	1993—2025	1993—2014	2015—2025
Давление (Pa), гПа	−0,03	0,09	−0,07	−0,03	−0,04	0,05
Скорость ветра (W), м/с	−0,01	0,02	−0,08	−0,01	−0,02	0,04
ТПМ, °С	0,06	0,05	0,04	0,13	0,12	0,06
Скрытый поток тепла (LE), ТВт	−0,05	−0,06	−0,01	−0,03	−0,04	0,01
Явный поток тепла (F), ТВт	−0,04	−0,06	−0,01	−0,02	−0,02	0,01
Длинноволновое излучение ($I_{\text{эф}}$), ТВт	−0,02	−0,02	−0,01	−0,03	−0,03	−0,01
Радиационный баланс (R), ТВт	0,01	0,01	−0,01	0,07	0,08	0,01
Суммарный теплообмен с атмосферой (B), ТВт	−0,10	−0,13	−0,04	−0,01	−0,01	0,03

На основании линейных трендов за исследуемый период в регионе выявлен значительный рост теплоотдачи в атмосферу с поверхности акватории. Это объясняется потеплением поверхности моря, так как количество солнечной радиации, приходящей на поверхность акватории летом, значимо увеличивается (0,07 ТВт за год). Усиление нагрева поверхности моря летом и усиление теплоотдачи зимой показывает тенденцию на рост вертикальной атмосферной динамики в регионе.

Однако на фоне общих линейных трендов в межгодовой изменчивости с середины 2010-х гг. видна стабилизация температуры поверхности воды на уровне 4,7 °С в теплый период и 0,7 °С — в холодный период. Кроме того, в это же время прекращается рост летом радиационного баланса, длинноволнового излучения и скрытого тепла, т.е. тепловых потоков, связанных с ТПМ. Также начинает ослабевать ветер в холодный период (см. рис. 2 и табл. 2). Это указывает на замедление потепления в регионе.

Так как все характеристики между собой физически взаимосвязаны, для выявления общих процессов выполнен анализ главных компонент (ГК). В табл. 3 приведены основные параметры ортогонального разложения, по которым видно, что по матрице характеристик выявляется по 3 основных физических процесса, в совокупности определяющих 88 % в холодный и 84 % в теплый периоды. Преобладающим (1я ГК, 52 и 54 % дисперсии) является процесс теплообмена, определяющий усиление теплоотдачи при росте ТПМ. Исключением является

радиационный баланс, который показывает рост ТПМ при его увеличении в теплый период, что естественно, а зимой (в полярную ночь), не связан с основными тепловыми потоками (2я ГК). Но поскольку в полярную ночь его значения близки к нулю, то отсутствие корреляции понятно.

Общий теплообмен с атмосферой в теплый период также не связан с потоками тепла и ТПМ (2я ГК), так как является суммой разнонаправленных потоков, что компенсирует их связи. Также выделяется в отдельный слабый процесс изменчивость скорости ветра в исследуемом регионе.

Таблица 3

Параметры разложения методом главных компонент матриц атмосферных характеристик над акваторией Печорского моря для периода с 1993 г. по 2025 г.

Выделены нагрузки переменных, большие 0,7

Principal component parameters of atmospheric characteristics matrices over the Pechora Sea for the period 1993—2025. Loadings of variables greater than 0.7 are highlighted

Параметр	Холодное полугодие			Теплое полугодие		
	Главные компоненты			Главные компоненты		
	1 ГК	2 ГК	3 ГК	1 ГК	2 ГК	3 ГК
Доля описываемой дисперсии собственными числами, %	54	21	14	52	19	13
<i>Нагрузки переменных в главных компонентах</i>						
Давление (<i>Pa</i>), гПа	−0,10	−0,86	0,22	−0,22	0,05	−0,90
Скорость ветра (<i>W</i>), м/с	0,14	0,25	0,94	−0,41	0,29	0,46
ТПМ, °С	0,91	−0,09	0,02	0,91	−0,21	0,02
Скрытый поток тепла (<i>LE</i>), ТВт	−0,98	0,00	−0,07	−0,94	−0,30	−0,03
Явный поток тепла (<i>F</i>), ТВт	−0,81	0,48	−0,09	−0,74	−0,54	0,11
Длинноволновое излучение (<i>I_{эф}</i>), ТВт	−0,77	−0,23	0,40	−0,94	−0,00	0,01
Радиационный баланс (<i>R</i>), ТВт	0,54	0,72	0,12	0,91	−0,32	−0,01
Суммарный теплообмен с атмосферой (<i>B</i>), ТВт	−0,97	0,22	0,03	0,08	−0,95	0,03

Если рассмотреть корреляции 1й ГК теплого и холодного периода, можно отметить, что процессы теплообмена в холодный период связаны с предыдущим теплым периодом с коэффициентом корреляции 0,77, а с последующим теплым периодом — с коэффициентом корреляции 0,75. С другими сдвигами коэффициент корреляции значительно меньше. Таким образом, тепловое состояние вод региона в конкретное полугодие в определенной степени зависит от его предыдущего состояния, что создает предпосылки для прогноза.

Выше были рассмотрены процессы теплового взаимодействия поверхности Печорского моря с атмосферой. Теперь можно оценить связь этих процессов с адвективной составляющей теплового состояния моря, а также оценить общий тепловой баланс вод Печорского моря. Для этого привлекался ряд так называемого «остаточного тепла», т.е. того, которое остается в море после его адвективного ухода через внешние границы рассматриваемой акватории (см. рис. 1) и вычисленный в работе [9] за период с 1993 г. по 2018 г.

Как отмечалось в работе [9], избыток тепла, поступающего в акваторию Печорского моря вследствие водообмена с соседними регионами в многолетнем усреднении почти полностью компенсируется взаимодействием с атмосферой. Как видно из табл. 4, в среднемноголетнем усреднении это утверждение подтверждается: среднее значение остаточного тепла 1,82 ТВт практически равно среднему общему теплообмену 1,85 ТВт. Однако, если посмотреть внутригодовую и межгодовую структуру потоков (рис. 4), видны значительные различия. Остаточный (адвективный) поток тепла положителен в оба полугодия и имеет небольшую величину (2,76 ТВт в холодный период и 0,85 ТВт — в теплый). Нагрев поверхности летом и её охлаждение зимой значительно превышают адвективную составляющую: в теплый период она составляет 13 % от теплового баланса поверхности и добавляет тепла в теплосодержание бассейна Печорского моря. В холодный период — лишь 28 % суммарной теплоотдачи компенсируется теплом, приходящим с адвекцией.

Таблица 4

Статистические оценки «остаточного» (адвективного) тепла [9] и общего теплообмена в акватории Печорского моря для периода с 1993 г. по 2018 г.
Выделены значимые коэффициенты ($\alpha = 0,05$)

Statistical estimates of the “residual” (advective) heat [9] and the total heat exchange in the Pechora Sea for the period 1993—2018. Significant coefficients are highlighted ($\alpha = 0.05$)

Параметр	Холодное полугодие		Теплое полугодие	
	Среднее	К-т тренда, год ⁻¹	Среднее	К-т тренда, год ⁻¹
«Остаточное» (адвективное) тепло, ТВт [9]	2,76	0,008	0,85	-0,085
Общий теплообмен через поверхность, ТВт	-10,0	-0,132	6,30	-0,015
Тепловой баланс границ бассейна, ТВт	-7,24	-0,126	7,15	-0,100

Если рассматривать в тепловом балансе Печорского моря все границы бассейна (боковые и поверхность), то накопленное в теплый период тепло 7,15 ТВт компенсируется отдачей в следующий холодный период 7,24 ТВт; лишь 0,09 ТВт в среднем уменьшает теплосодержание бассейна моря. Хотя эти средние оценки также не совсем репрезентативны. Как видно из рис. 5, в предполагаемой изменчивости теплосодержания бассейна отмечается значительный тренд. В период с 1993 г. по 2006 г. тепловой баланс был положительный (в среднем 1,5 ТВт), что предполагает теплонакопление. С 2007 г. расход тепла в среднем -1,9 ТВт, т.е. общее охлаждение (различие средних статистически значимо, $\alpha < 0,001$). Это стало возможным из-за значимых трендов уменьшения адвекции тепла течениями в теплый период и усиления теплоотдачи через поверхность в холодный период (см. рис. 4 и табл. 4).

Заключение

Проведенное исследование посвящено оценке вклада атмосферных параметров в тепловой баланс поверхности Печорского моря и их связи с адвективными процессами в море.

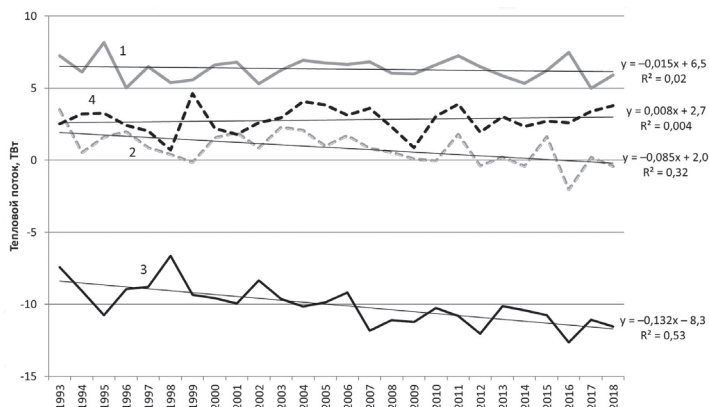


Рис. 4. Межгодовая изменчивость составляющих теплового баланса моря: остаточное (адвективное) тепло (2, 4) [9] и суммарный теплообмен с атмосферой через поверхность акватории (1, 3) для теплого (1, 2) и холодного (3, 4) полугодий и их линейные тренды за период с 1993 г. по 2018 г.

Fig. 4. Interannual variability of sea heat balance components: residual (advective) heat (2, 4) [9] and total atmosphere exchange heat through the surface of the water area (1, 3) for the cold (3, 4) and warm (1, 2) half-years and their linear trends for the period 1993—2018.

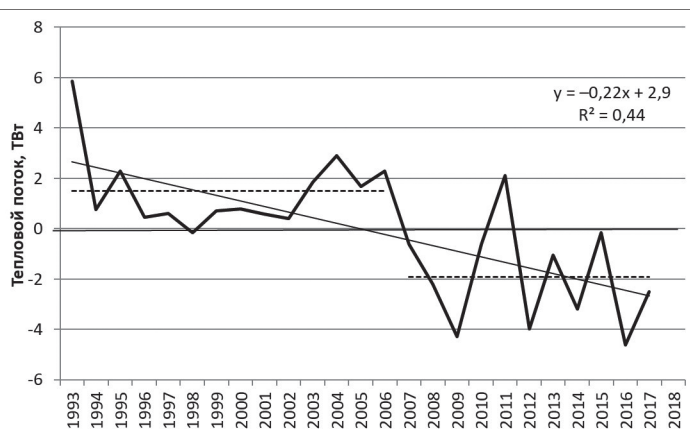


Рис. 5. Межгодовая изменчивость теплового баланса моря на всех границах в сумме: остаточное (адвективное) тепло [9] на боковых границах + суммарный теплообмен с атмосферой через поверхность акватории за год (теплое полугодие и последующее холодное полугодие) и его линейный тренд за период с 1993 г. по 2018 г. Пунктиром показаны средние значения для периодов с 1993 г. по 2006 г. и с 2007 г. по 2018 г.

Fig. 5. Interannual variability of the sea heat balance at all boundaries in total: residual (advective) heat [9] at the lateral boundaries and the total atmosphere heat exchange through the water surface for the year (warm half-year + subsequent cold half-year) and its linear trend for the period 1993—2018. The dotted line shows the average values for the periods 1993—2006 and 2007—2018.

Установлено, что атмосферные условия над акваторией характеризуются пониженным давлением и выраженной сезонной сменой направлений ветра: зимой преобладают потоки с материка, а летом — с соседних морей.

За исследуемый период зафиксированы рост радиационного баланса летом и температуры поверхности воды, сопровождающийся усилением теплоотдачи из моря в атмосферу, особенно в холодное полугодие. В то же время, начиная с середины 2010-х гг., межгодовая изменчивость тепловых потоков демонстрирует признаки стабилизации на новом уровне, когда температура поверхности перестает расти, а ветер ослабевает, что указывает на приостановку потепления в регионе Печорского моря.

Для выявления скрытых физических взаимосвязей был применен анализ главных компонент. Он показал, что основную долю изменчивости определяет процесс теплообмена, напрямую связанный с температурой поверхности. Исключением является радиационный баланс, который отражает эту связь с ТПО только в теплый период. Изменчивость ветра и атмосферного давления выделены как два более слабых физических процесса. Сравнительно высокая статистическая взаимосвязь тепловых потоков поверхности моря во времени позволяет приближенно оценивать тепловое состояние вод региона с заблаговременностью до полугода.

Сопоставление атмосферных процессов с переносом тепла течениями показало, что избыток адвективного тепла почти полностью компенсируется его отдачей в атмосферу. Однако внутригодовая структура этого обмена различна: положительные адвективные потоки в холодный период компенсируют теплоотдачу на 28 %, а в теплый период добавляют тепла на 13 %. Оценка полного теплового баланса выявила смену климатических фаз: если в начале периода теплосодержание моря росло, то в дальнейшем начался этап общего охлаждения акватории из-за уменьшения притока тепла с течениями в теплое полугодие и усиления потерь через поверхность зимой.

Список литературы

1. Писарев С.В. Обзор гидрологических условий Баренцева моря // Система Баренцева моря / Под ред. акад. А. П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. С. 153—166. doi: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(13).
2. Печорское море. Экологический атлас: Научно-популярное издание «Газпром-нефть». СПб: «Галерея Печати», 2018. 144 с.
3. Методы расчёта водных балансов. Международное руководство по исследованиям и практике / Под ред. А. А. Соколова и Т. Г. Чапмена. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 117 с.
4. Калавиччи К. А., Башмачников И. Л. Особенности взаимодействия в системе океан–атмосфера в Баренцевом море по данным реанализов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 2. С. 175—187. doi: 10.31857/S0002351521020061.
5. Серых И. В., Костяной А. Г. Изменения параметров экстремальных температурных событий западной части Российской Арктики по данным реанализов ERA5 и MERRA-2 в 1980–2022 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69, № 4. С. 464—485. doi: 10.30758/0555-2648-2023-69-4-464-485.
6. Årthun M., Schrum C. Ocean surface heat flux variability in the Barents Sea // J. Marine Syst. 2010. Vol. 83. No. 1–2. P. 88—98. doi: 10.1016/j.jmarsys.2010.07.003.
7. Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L. H. et al. Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat // J. Clim. 2012. Vol. 25. No. 13. P. 4736—4743. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00466.1.

8. Ожигин В. К., Ившин В. А., Трофимов А. Г. и др. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: ПИНРО. 2016. 260 с. ISBN: 978-5-86349-215-5.
9. Гордеева С. М., Дешова Д. В. Водный, тепловой и солевой баланс юго-восточной части Баренцева моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 4. С. 407—420. doi: 10.30758/0555-2648-2023-69-4-407-420.
10. IFS Documentation CY48R1 — Part IV: Physical Processes. // ECMWF. 2023. 43 p. doi: 10.21957/02054f0fbf.

References

1. Pisarev S. V. Overview of hydrological conditions in the Barents Sea. *Sistema Barentseva moria = Barents Sea system*. Edited by Acad. A.P. Lisitsyna. Moscow: GEOS, 2021: (153—166). doi: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(13). (In Russ.).
2. *Pechora Sea. Ekologicheskij atlas: Nauchno-populyarnoe izdanie «Gazprom-neft'» = Ecological atlas: Popular science publication "Gazprom Neft"*. St. Petersburg: Gallery of Printing, 2018: 144 p. (In Russ.).
3. *Metody raschyota vodnyh balansov. Mezhdunarodnoe rukovodstvo po issledovaniyam i praktike = Methods for water balance computations: an international guide for research and practice*. Edited by Sokolov A. A., Chapman T. G. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976: 117 p. (In Russ.).
4. Kalavichchi K. A., Bashmachnikov I. L. Peculiarities of interaction in the ocean-atmosphere system in the Barents Sea according to reanalysis data. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics of the Atmosphere and Ocean*. 2021; 57(2): (175—187). doi: 10.31857/S0002351521020061. (In Russ.).
5. Serykh I. V., Kostianoy A. G. Changes in the parameters of extreme temperature events in the western part of the Russian Arctic according to ERA5 and MERRA-2 reanalyses in 1980—2022. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2023; 69(4): (464—485). doi: 10.30758/0555-2648-2023-69-4-464-485. (In Russ.).
6. Årthun M., Schrum C. Ocean surface heat flux variability in the Barents Sea. *J. Marine Syst.* 2010; 83(1–2): 88—98. doi: 10.1016/j.jmarsys.2010.07.003.
7. Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L. H. et al. Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat. *J. Clim.* 2012; 25(13): 4736—4743. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00466.1.
8. Ozhigin V. K., Ivshin V. A., Trofimov A. G. et al. *Vody Barentseva moria: struktura, tsirkulatsiya, izmenchivost' = Waters of the Barents Sea: structure, circulation, variability*. Murmansk: PINRO. 2016: 260 p. ISBN: 978-5-86349-215-5. (In Russ.).
9. Gordeeva S. M., Deshova D. V. Water, heat and salt balance of the south-eastern part of the Barents Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2023; 69(4): 407—420. doi: 10.30758/0555-2648-2023-69-4-407-420. (In Russ.).
10. IFS Documentation CY48R1 — Part IV: Physical Processes. ECMWF. 2023: 43 p. doi: 10.21957/02054f0fbf.

Информация об авторах

Дешова Диана Витальевна, ассистент кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами Института гидрологии и океанологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, d.deshova@rshu.ru.

Гордеева Светлана Михайловна, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами Института гидрологии и океанологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, gordeeva@rshu.ru.

Information about authors

Diana Vitalievna Deshova, Russian State Hydrometeorological University, Institute of Hydrology and Oceanology, Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Assistant.

Svetlana Mikhailovna Gordeeva, PhD (Geogr. Sci.), Associate Professor, Russian State Hydrometeorological University, Institute of Hydrology and Oceanology, Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Associate Professor.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 03.11.2025

Принята к печати после доработки 09.08.2026

The article was received on 03.11.2025

The article was accepted after revision on 09.08.2026

Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 455—472.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(84):455—472.

Научная статья

УДК [551.465.5:528.8:004.94](265.54)

doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-455-472

Совместный анализ данных SWOT и модели ROMS для изучения субмезомасштабных процессов на примере залива Посьета в Японском море

Александр Алексеевич Дидов^{1,2},

Павел Аркадьевич Файман^{1,2}, Максим Васильевич Будянский^{1,2},

Татьяна Васильевна Белоненко²

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,
btvlisab@yandex.ru

Аннотация. Недостаток разрешения спутниковой альтиметрии и верификации моделей ограничивает изучение прибрежных вихрей. Данные SWOT (километровое разрешение) фиксируют только геострофическую скорость, игнорируя ветровой дрейф на мелководье. Предложен комплексный подход с использованием SWOT и модели ROMS (пространственное разрешение — 500 метров), воспроизводящей полное поле скорости. На примере залива Посьета (Японское море) в 2024 г. показано соответствие структур вихрей в SWOT и ROMS. Сравнение позволило разделить барический и дрейфовый вклады в течения. Различия скоростей связаны с ветровой составляющей, затухающей с глубиной. Генерация вихрей обусловлена инерционной неустойчивостью при восточных ветрах. Совместное применение SWOT и ROMS эффективно для верификации моделей и изучения субмезомасштабной динамики, особенно для экологического мониторинга прибрежных акваторий.

Ключевые слова: субмезомасштабные вихри, SWOT, ROMS, залив Посьета, геострофическое приближение, дрейфовая компонента, верификация модели, прибрежная циркуляция.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке грантов РНФ № 25-77-00044 (моделирование в ROMS) и № 25-17-00021 (сбор и анализ спутниковых данных).

Для цитирования: Дидов А. А., Файман П. А., Будянский М. В., Белоненко Т. В. Совместный анализ данных SWOT и модели ROMS для изучения субмезомасштабных процессов на примере залива Посьета в Японском море // Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 455—472. doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-455-472.

Joint analysis of SWOT data and ROMS model for studying submesoscale processes using the example of Posyet Bay in the Sea of Japan

Alexander A. Didov^{1,2}, Pavel A. Fayman^{1,2}, Maxim V. Budyansky^{1,2}, Tatyana V. Belonenko²

¹ V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia.

² St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, btvlisab@yandex.ru

Summary. The study of submesoscale eddies in coastal oceanographic systems is challenged by fundamental methodological limitations due to their small spatial (units to tens of kilometers) and temporal (hours to days) scales. Traditional satellite altimetry data, such as AVISO, have insufficient resolution for reliable identification of such structures in shelf zones, and numerical models, even at high resolution, require independent verification. The new SWOT (Surface Water and Ocean Topography) mission, providing two-dimensional sea surface height measurements with kilometer-scale resolution, offers unique opportunities for observing submesoscale eddies. However, geostrophic velocities derived from SWOT data reflect only the baric component of currents and do not satisfy the full momentum equation in shallow coastal areas where the wind-induced drift (Ekman) component is significant. This fundamental limitation prevents SWOT from being used as a standalone tool for three-dimensional dynamic analysis.

To overcome these limitations, we propose a combined approach that integrates SWOT altimetry with regional modeling using the Regional Ocean Modeling System (ROMS). The model, configured with 500 m horizontal resolution and 48 vertical layers, reproduces the full velocity field, including baric, drift, and turbulent components, while SWOT data serve as an independent reference for verifying the baric part. Using Posyet Bay (Sea of Japan) as a test site, we demonstrate for the episodes of May and August 2024 that visual comparison of absolute dynamic topography and geostrophic velocity fields from SWOT with model outputs allows (1) confirming the adequacy of ROMS in reproducing the spatial structure and position of anticyclonic eddies, and (2) quantitatively separating the baric and drift contributions to surface currents, showing that differences in velocity amplitudes at the 5 m depth horizon are indeed due to the wind-driven component, which decays with depth. The eddies were detected using the HEPTA algorithm, which reliably identifies elliptic and hyperbolic points in the velocity field. The comparison was performed for two distinct periods (30–31 May and 21–23 August 2024) and consistently showed that the model captures the eddy positions, while velocity magnitudes differ at the surface but converge at 10 m depth, confirming the Ekman nature of the difference. The identified anticyclonic eddies have horizontal scales of about 20 km and lifetimes of several days, consistent with submesoscale features. The mechanism of their formation is attributed to inertial instability arising from enhanced horizontal velocity shear during easterly wind events. The combined use of SWOT and ROMS thus provides an effective methodology for studying submesoscale dynamics in coastal areas, where each method individually has inherent limitations. This approach opens prospects for validating regional circulation models and assessing the role of eddy transport in the spread of polluted river waters, which is critically important for the ecological monitoring of the Far Eastern Marine Reserve.

Keywords: submesoscale eddies, SWOT, ROMS, Posyet Bay, geostrophic approximation, drift component, model verification, coastal circulation.

Acknowledgments: The study was supported by Russian Science Foundation grants No. 25-77-00044 (ROMS modeling) and No. 25-17-00021 (collection and analysis of satellite data).

For citation: Didov A. A., Fayman P. A., Budyansky M. V., Belonenko T. V. Joint analysis of SWOT data and ROMS model for studying submesoscale processes using the example of Posyet Bay in the Sea of Japan. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(84):(455–472). doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-455-472. (In Russ.).

Введение

Изучение субмезомасштабных динамических процессов в океане, в частности вихрей с горизонтальными масштабами от единиц до десятков километров и временем жизни от нескольких часов до нескольких суток, представляет собой сложную методологическую задачу. Их идентификация и анализ в прибрежных зонах особенно затруднены из-за мелководности, влияния суши, переменчивости ветра и быстрой эволюции структур. Традиционные спутниковые альтиметрические данные (например, AVISO) имеют пространственное разрешение порядка 25—50 км, что недостаточно для надёжного выделения субмезомасштабных вихрей, а численные модели даже при высоком разрешении требуют независимой верификации наблюдениями. Новые данные миссии SWOT (Surface Water and Ocean Topography) с километровым разрешением открывают беспрецедентные возможности для визуализации таких структур, однако они имеют собственное ограничение: геострофические скорости, рассчитанные по измерениям уровня моря, отражают только барическую составляющую течений и не учитывают дрейфовую компоненту, связанную с ветром, которая в мелководных районах может быть сопоставима по величине. Для полноценного анализа динамики необходим комплексный подход, сочетающий спутниковую альтиметрию и региональное гидродинамическое моделирование, способное воспроизводить полное поле скорости.

Объектом исследования является западная часть залива Петра Великого (Японское море), включающая акваторию залива Посыета, мелководные бухты, устье реки Туманной и прилегающую область, а также часть акватории Дальневосточного морского заповедника (рис. 1). Река Туманная — пограничная между Китаем и КНДР, а в нижнем течении — между КНДР и Россией. Около 70 % стока формируется на территории Китая, почти 30 % — в Северной Корее, доля России составляет менее 1 %. Длина реки 549 км (из них 17,3 км по границе России), площадь бассейна 41 200 км².

При впадении в море река образует обширную заболоченную дельту с разветвлёнными рукавами, островами, озёрами и болотами. Среднегодовой расход воды 215 м³/с с ярко выраженной сезонной изменчивостью [1]. В бассейне существуют экологические проблемы из-за роста концентрации загрязняющих веществ, связанного с индустриализацией и урбанизацией на территории Китая [1—4]. Транспорт речного плюма реки Туманной в северо-восточном направлении может негативно влиять на экосистемы Дальневосточного морского заповедника [5], а также создавать экономический ущерб для туристического и рыбопромышленного бизнеса на побережье. Однако в данной работе экологический аспект служит лишь иллюстративным примером, а главная задача состоит в отработке методологии совместного анализа спутниковых и модельных данных для преодоления ограничений каждого из методов в отдельности.

В западной части залива Петра Великого регулярно наблюдаются субмезомасштабные вихри различной полярности. В летне-осенний период их формирование связывают с симметричной и центробежной неустойчивостью после апвеллинга [6, 7]. Эти вихри играют важную роль в переносе речных вод, однако их исследование традиционно опиралось на судовые съёмки и спутниковые данные

по температуре и цвету воды, которые сильно зависят от облачности и не дают прямых оценок циркуляции [8—10]. Применение альтиметрии нового поколения SWOT и её совместный анализ с высокоразрешающей моделью ROMS позволяют не только верифицировать модель, но и разделить вклад барической и дрейфовой

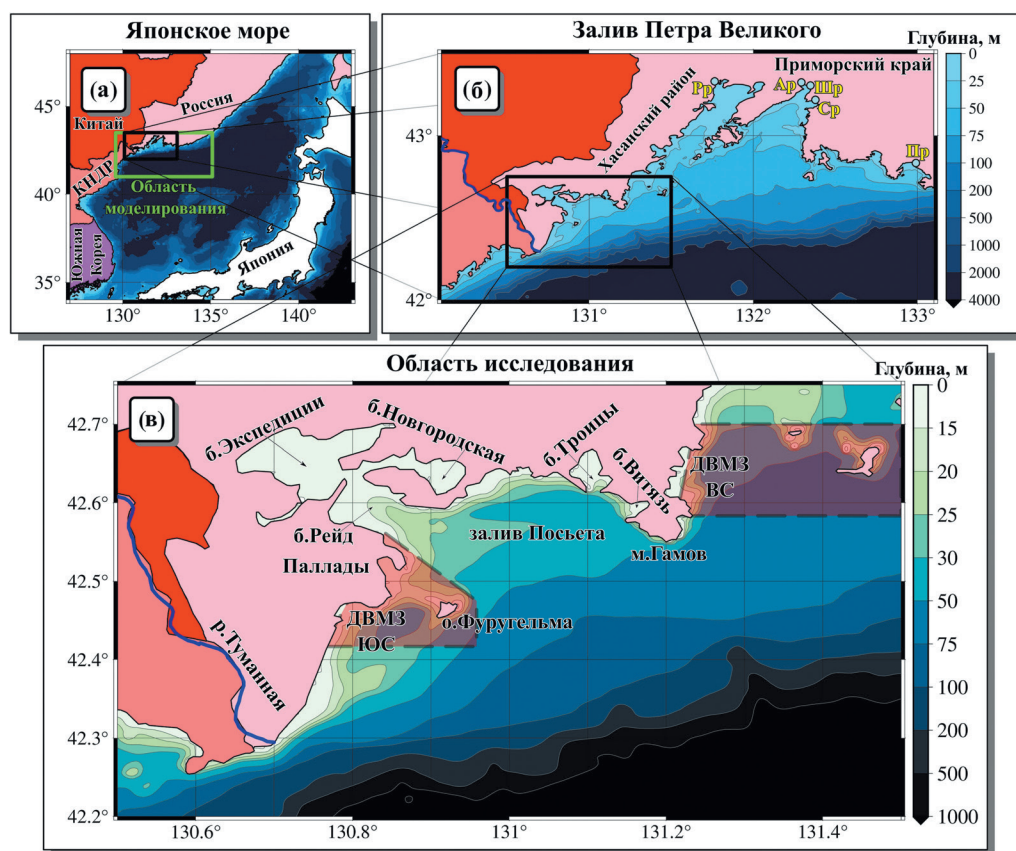


Рис. 1. Батиметрическая карта района исследования: а) Японское море; б) прибрежная часть Японского моря с прилегающей территорией; в) область моделирования ROMS (показана прямоугольником).

Используемые обозначения: Рр — устье р. Раздольной; Шр — устье р. Шкотовки; Ар — устье р. Артёмовки; Ср — устье р. Суходола; Пр — устье р. Партизанской; ДВМЗ ВС — восточный сектор Дальневосточного морского заповедника; ДВМЗ ЮС — южный сектор Дальневосточного морского заповедника.

Fig. 1. Bathymetric map of the study area: a) Sea of Japan; b) coastal part of the Sea of Japan with adjacent territory; c) ROMS model domain (shown by rectangle).

Designations: Рр — mouth of the river Razdolnaya; Шр — mouth of the river Shkotovka; Ар — mouth of the river Artemovka; Ср — mouth of the river Sukhodol; Пр — mouth of the river Partizanskaya; ДВМЗ ВС — eastern sector of the Far Eastern Marine Reserve; ДВМЗ ЮС — southern sector of the Far Eastern Marine Reserve.

компонент в поверхностные течения, что принципиально важно для понимания физических механизмов вихреобразования в условиях мелководья.

Изучение субмезомасштабных вихрей затруднено из-за их малых пространственных (единицы—десятки км) и временных (часы—несколько суток) масштабов. Спутниковые данные (CHL, SST) позволяют идентифицировать вихри, однако высокая облачность и ограниченное разрешение стандартных альтиметрических данных (например, AVISO) не всегда дают возможность надёжно фиксировать такие структуры в прибрежных зонах. Новые данные спутниковой альтиметрии SWOT (Surface Water and Ocean Topography) с 16 декабря 2022 г. предоставляют беспрецедентные возможности. Это открывает возможность исследования субмезомасштабных вихрей в прибрежных акваториях с высокой точностью. Однако необходимо подчеркнуть, что геострофическое приближение, лежащее в основе расчёта скоростей по данным альтиметрии, строго справедливо лишь для глубоководных районов при малых числах Россби. В прибрежных мелководных акваториях ветер создаёт значительный экмановский перенос, не связанный с градиентом давления, и потому геострофические скорости из SWOT не отражают полное поле течений, особенно в верхнем 5—10-метровом слое. Это ограничение требует привлечения численных моделей, которые учитывают все действующие силы.

Наряду с дистанционными данными для изучения вихревой динамики активно применяются численные модели. Региональная модель на основе ROMS (Regional Ocean Modeling System) хорошо зарекомендовала себя для воспроизведения циркуляции в северо-западной части Японского моря и заливе Петра Великого [11, 12]. Предыдущие работы показали, что ROMS с высоким разрешением (около 600 м) адекватно воспроизводит субмезомасштабные вихри, наблюдаемые в спутниковых и судовых данных [6]. Показано, что циклонические вихри в прибрежной зоне возникают вследствие симметричной и центробежной неустойчивости и отвечают за перенос холодных солёных вод из мелководных бухт в открытую часть залива [7]. Тем не менее, ни модель, ни спутниковые данные по отдельности не дают полной картины: модель нуждается в верификации, а SWOT даёт только барическую компоненту. Только их совместное использование позволяет преодолеть эти ограничения.

Однако ключевой нерешённой проблемой остаётся отсутствие надёжного метода верификации модельных субмезомасштабных вихрей в прибрежных зонах. Стандартная альтиметрия не имеет достаточного разрешения, а судовые данные эпизодичны. SWOT предоставляет высокое разрешение, но его геострофические скорости не учитывают дрейфовую компоненту, поэтому необходим комплексный подход, позволяющий разделить барическую и небарическую части течений и на этой основе валидировать модель. Предыдущие работы [6, 7] использовали моделирование и спутниковые данные низкого разрешения, но без привлечения SWOT, что не давало возможности отделить барический сигнал от ветрового.

Цель данной работы — разработать и апробировать методологию комплексного анализа субмезомасштабных вихрей в прибрежной зоне, основанную на совместном использовании данных спутниковой альтиметрии SWOT (дающих барическую компоненту) и региональной модели ROMS (дающей полное поле

скорости). На примере залива Посьета в Японском море показано, как такое сочетание позволяет верифицировать модель, разделить барический и дрейфовый вклады в поверхностные течения и на этой основе идентифицировать механизмы вихреобразования. Для достижения цели решаются следующие задачи:

- воспроизведение циркуляции вод в западной части залива Петра Великого за период март—ноябрь 2024 г. с помощью ROMS с разрешением 500 м и 48 вертикальными слоями;

- проведение визуального сопоставления полей абсолютной динамической топографии и геострофических скоростей по данным SWOT с модельными полями для эпизодов наличия вихрей (30—31 мая и 21—23 августа 2024 г.) с целью верификации барической составляющей модели.

Данные и методы

Данные спутниковой альтиметрии SWOT

Для валидации результатов моделирования и идентификации вихревых структур использовались данные миссии SWOT, разработанной NASA и CNES при участии CSA и UK Space Agency; запуск состоялся 16 декабря 2022 г. [13, 14]. Главная цель миссии — измерение уровня поверхностных вод как в океане, так и на континенте, что делает её первой космической миссией по комплексному мониторингу поверхностных вод Земли [13]. Ключевой инструмент — Ка-диапазонный радарный интерферометр KaRIn (центральная частота 35,75 ГГц) с двумя антеннами на десятиметровой штанге, обеспечивающий интерферометрическую базу [14]. KaRIn впервые обеспечивает двумерные измерения высоты водной поверхности с километровым разрешением по полосе захвата 120 км [15], в то время как все предыдущие миссии давали только надирные измерения вдоль трека [16]. Инструмент даёт данные по двум субполосам по 50 км с каждой стороны от надирного трека; двадцатикилометровый промежуток вдоль надира перекрывается классическим надирным альтиметром. Общая ширина полосы — 120 км. Высота орбиты 970 км, глобальное покрытие до широты $\sim 78^\circ$ с.ш. и ю.ш., период повторения — 21 день [13].

Пространственное разрешение SWOT значительно превосходит традиционные надирные альтиметры. Стандартные продукты уровня 2 (L2) дают разрешение около 1—2 км вдоль трека, в некоторых режимах — до 250 м (AVISO, 2024). Для сравнения, разрешение Jason-3 составляет 25—50 км. SWOT позволяет наблюдать процессы в масштабах 15—30 км в зависимости от состояния моря [13], а в отдельных случаях волны длиной до 5 км [16]. Это особенно важно для субмезомасштабных процессов (10—50 км), ранее недоступных для спутникового мониторинга.

В работе использовались данные уровня 2 (L2), содержащие поля абсолютной динамической топографии (ADT) и геострофические скорости для 30—31 мая и 21—23 августа 2024 г., когда по данным SWOT прослеживались ярко выраженные антициклонические вихри. Выбор периодов обусловлен наличием качественных измерений и возможностью сопоставления с моделью ROMS.

Данные SWOT позволяют идентифицировать вихревые структуры и оценивать их пространственные характеристики (размеры, форму), а также интенсивность, что особенно важно для прибрежных акваторий, где традиционная альтиметрия теряет точность из-за влияния суши. Важно подчеркнуть, что геострофические скорости, рассчитываемые по ADT, предполагают баланс между градиентом давления и силой Кориолиса. Этот баланс нарушается в прибрежных мелководных районах, где существенную роль играет ветровое трение, создающее экмановский дрейф, поэтому поля скоростей из SWOT отражают лишь барическую компоненту и не могут использоваться как прямое измерение полного течения. Это фундаментальное ограничение учитывается в настоящей работе при интерпретации результатов сравнения с моделью ROMS. Отметим, что данные SWOT использовались для качественной верификации ROMS. Строгий количественный анализ потребует большего объёма спутниковых данных и более широкой выборки событий, охватывающих разные сезоны и гидрологические условия. Данная работа является первым шагом в этом направлении.

Модель океана ROMS

Для расчёта циркуляции использовалась региональная модель ROMS — трёхмерная нелинейная модель на примитивных уравнениях со свободной поверхностью и s -координатами по вертикали [17]. Модель широко применяется для прибрежных и шельфовых задач [18—25] и доступна через официальный сайт (www.myroms.org). В основе модели примитивные уравнения гидростатики в приближении Буссинеска [17]. Вертикальная s -координата адаптируется к рельефу дна [26]. Используется структурированная горизонтальная сетка, вертикальное разрешение может варьироваться за счёт растяжения слоёв. Численный алгоритм основан на разделении баротропной и бароклинной мод (split-explicit) [17], что повышает вычислительную эффективность. Для согласования мод применяется специальная схема фильтрации, обеспечивающая консервацию трассеров.

В ROMS реализованы параметризации вертикального турбулентного перемешивания [23], а также опции для биогеохимии, био-оптики, переноса осадков и морского льда [22]. Поддерживаются вложенные и композитные сетки. Доступны также линейная и сопряжённая модели для анализа чувствительности и вариационного усвоения данных [27, 28]. Конфигурация модели основана на предыдущих работах [6, 7, 11, 12]. Сеточная область: 41—43,5° с.ш. и 129,6—135,1° в.д. Горизонтальный шаг равен 500 м, по вертикали 48 s -слоёв с улучшенным разрешением у поверхности и дна. Период моделирования взят за 1993—2024 гг., для анализа выбраны результаты с марта по ноябрь 2024 г. с часовой дискретностью.

Потоки тепла и соли на поверхности рассчитаны по bulk-формулам [29] с использованием среднесуточных данных реанализа NCEP-DOE AMIP-II [30]. Скорость ветра заимствована из скаттерометра Advanced SCATterometer [31]. Граничные условия на открытых границах — на основе реанализа JCOPE2 [32] с комбинацией отражения и релаксации; для нормальной баротропной скорости использовалось условие Флэттера [33], для высоты поверхности — условие

Чепмена [34]. Среднесуточные климатические расходы рек (Партизанская, Суходол, Шкотовка, Артёмовка, Раздольная) осреднены за период с 2013 г. По 2022 г. по данным Федерального агентства водных ресурсов (gmvo.skniivh.ru).

Все расчёты верификации барической части, которую и обеспечивает SWOT, выполнялись на оборудовании Центра коллективного пользования Дальневосточного вычислительного ресурса Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (<https://www.cc.dvo.ru>).

Определение центров вихревых образований

Для точной локализации центров вихревых образований в каждый момент времени используется алгоритм НЕРТА (Hyperbolic and Elliptic Point Tracking Algorithm) [35, 36]. Этот алгоритм позволяет надёжно выделять особые точки поля скорости:

- эллиптические точки — центры циклонов и антициклонов;
- гиперболические точки — седла, разделяющие потоки.

Применение НЕРТА обеспечивает высокую точность и воспроизводимость определения центра вихрей, что критически важно для корректного анализа структуры водных масс внутри анализируемого вихревого образования. На картах эллиптические точки показаны треугольниками, а гиперболические — крестиками.

Комплексный анализ спутниковых (SWOT) и модельных (ROMS) данных

Изучение субмезомасштабных вихрей в прибрежных акваториях сопряжено с методологическими трудностями, обусловленными малыми масштабами и коротким временем жизни (обычно 3—5 суток) [37]. В мелководных районах (средняя глубина залива Посыета ~20 м) поверхностная циркуляция сильно зависит от ветра, и поэтому данные альтиметрии в геострофическом приближении заведомо неполны [38, 39]. Только сочетание данных SWOT и высокоразрешающего моделирования ROMS позволяет разделить барическую и дрейфовую компоненты и верифицировать модель. Однако совместный анализ требует учёта физических различий методов, что даёт уникальную возможность для оценки вклада различных механизмов.

Основное ограничение SWOT в исследуемом районе — мелководность. Альтиметрия измеряет аномалии уровня моря (SSH), по которым рассчитываются геострофические скорости. Геострофический баланс справедлив для глубокого моря, в то время как в прибрежных мелководных зонах ветер создаёт дрейфовую составляющую (экмановский перенос), не связанную с градиентом давления и не учитываемую в геострофике, поэтому геострофические скорости из SWOT отражают только барическую компоненту и не дают полной картины реальных течений, особенно в ветроактивные периоды. ROMS, напротив, учитывает полный комплекс факторов: ветровое напряжение, потоки тепла и пресной воды, батиметрию, вертикальное перемешивание. Если SWOT даёт только геострофическую часть скорости, то ROMS — полное поле скорости, поэтому поля скоростей могут различаться, особенно в верхнем слое 5—10 м, где дрейфовая компонента максимальна.

На рис. 2 представлено сопоставление полей скоростей для 30 и 31 мая 2024 г. Из их анализа следует:

— В обоих наборах данных чётко идентифицируется один и тот же антициклонический вихрь в центральной части залива Посьета (между о. Фуругельм и материком). Положение центра по алгоритму НЕРТА практически совпадает. Это свидетельствует о преимущественно барической природе вихря.

— Направления скоростей в вихре совпадают, но величины различаются. На горизонте 5 м скорости в ROMS заметно выше, чем геострофические из SWOT, что обусловлено дрейфовой компонентой. На 10 м различие уменьшается, так как влияние ветра затухает. Это прямое доказательство того, что ROMS корректно воспроизводит ветровую составляющую, ослабевающую с глубиной, тогда как SWOT показывает только ее барическую часть.

— Гиперболические точки (области деформации и обмена вод) также совпадают, что подтверждает гидродинамическую согласованность полей.

Таким образом, комплексный анализ позволяет преодолеть ограничения каждого метода: SWOT даёт независимую картину барической составляющей и служит реперной точкой для верификации, а ROMS предоставляет полное поле скорости и трёхмерную структуру, что помогает отслеживать эволюцию вихрей с часовой дискретностью. Это позволяет оценить вклад барической и дрейфовой компонент, а значит, понять физические механизмы формирования вихрей. Сложность оконтуривания субмезомасштабных вихрей обусловлена их малым временем жизни и изменчивостью формы в прибрежной зоне. SWOT с 21-дневным периодом не отслеживает быструю эволюцию, но даёт мгновенный снимок. ROMS с часовой дискретностью дает возможность детально проследить рождение, эволюцию и распад вихрей.

В работе для двух дней (30 и 31 мая 2024 г.) проведено визуальное сопоставление полей ADT и геострофических скоростей из SWOT с полями уровня и полных скоростей из ROMS на горизонтах 5 и 10 м. Идентифицированы вихревые структуры, прослеживаемые в обоих наборах. Результаты подтверждают, что ROMS адекватно воспроизводит пространственное положение и размеры крупных вихревых образований, наблюдаемых по SWOT. Совпадение положения вихрей, несмотря на различия в амплитудах скоростей, свидетельствует о высокой точности воспроизведения барической составляющей, а различия обусловлены дрейфовой компонентой, которую модель учитывает, а SWOT — нет. Таким образом, верификация подтверждает, что ROMS корректно описывает обе составляющие циркуляции, что делает её надёжным инструментом для анализа завихренности, выделения зон неустойчивости и изучения механизмов вихреобразования.

Аналогичное сопоставление было выполнено для эпизода 21—23 августа 2024 г. (рис. 3). Как и в майском случае, в полях геострофических скоростей из SWOT и полных скоростей ROMS на горизонтах 5 и 10 м уверенно идентифицируется антициклонический вихрь в северной части залива Посьета, положение которого по алгоритму НЕРТА совпадает в обоих источниках. При этом на глубине 5 м модельные скорости систематически превышают геострофические, тогда как на горизонте 10 м различия сглаживаются. Это повторяющееся поведение

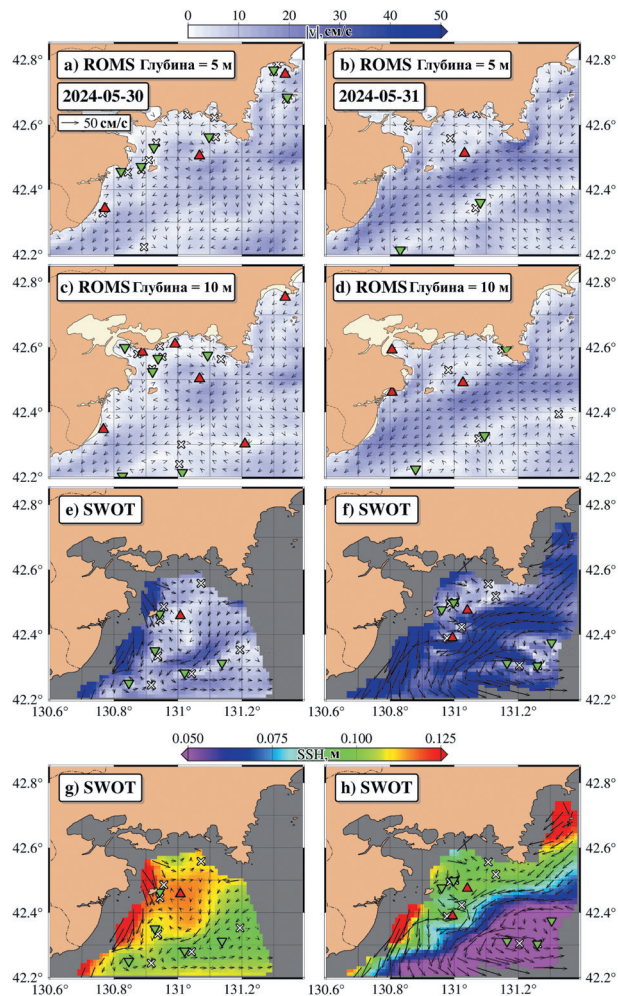


Рис. 2. Сравнение полей поверхностных течений в заливе Посыета по данным спутниковой альтиметрии SWOT и модели ROMS для эпизодов 30 мая 2024 г. (слева) и 31 мая 2024 г. (справа). *a-d*) поле полных скоростей из ROMS на горизонтах 5 м (*a*) и 10 м (*b*); *e, f*) поле геострофических скоростей, рассчитанных по данным SWOT.

Цветовая шкала показывает величины скоростей (*a-f*) и уровень океана (SSH, Sea Surface Height) (*g, h*). Красными треугольниками ▲ показаны центры антициклонов, зелеными ▼ — циклонов определённые методом НЕРТА. Крестики × соответствуют гиперболическим точкам.

Fig. 2. Comparison of surface current fields in Posyet Bay from SWOT satellite altimetry and ROMS model for episodes of May 30, 2024 (left) and May 31, 2024 (right).

a-d) full velocity field from ROMS at depths of 5 m (*a*) and 10 m (*b*);
e, f) geostrophic velocity field calculated from SWOT data.

Color scale shows velocity magnitudes (*a-f*) and sea surface height (SSH) (*g, h*). Red triangles ▲ mark anticyclone centers, green ▼ — cyclone centers identified by the HEPTA method. Crosses × correspond to hyperbolic points.

однозначно указывает на то, что дополнительная составляющая в ROMS имеет дрейфовую (экмановскую) природу и затухает с глубиной, что согласуется с теорией ветрового трения.

Рис. 3 подтверждает выводы, сделанные по майским данным, и демонстрирует, что наблюдаемое расхождение скоростей не является случайным артефактом, а представляет собой устойчивую физическую закономерность. Это служит надёжным мостиком между спутниковыми наблюдениями и моделированием: SWOT обеспечивает независимую верификацию барической части, а ROMS восполняет недостающую дрейфовую компоненту, позволяя в дальнейшем корректно диагностировать механизмы вихреобразования по полным скоростям.

Таким образом, представленный комплексный подход позволяет не только верифицировать ROMS, но и получить количественную оценку вклада ветрового дрейфа в поверхностные течения, что невозможно сделать, используя только один из методов. Это служит основой для корректного анализа механизмов вихреобразования в следующем разделе.

Вихреобразование в заливе Посъета по результатам моделирования

На рис. 2 и рис. 3 представлены два эпизода формирования антициклонических вихрей в заливе Посъета у мыса Гамова. Первый эпизод происходил в период с 26 по 30 мая 2024 г. Ветровая обстановка над исследуемой областью была следующая: в первой половине 26 мая над западной частью залива Петра Великого наблюдался южный сильный ветер, во второй половине 26 мая сильный южный ветер сменился на крепкий восточный (здесь и далее используются словесные определения силы ветра из шкалы Бофорта). При этом усиливалось Приморское течение в западной части залива Петра Великого и дрейфовое течение в северном направлении. Ослабление ветра в первой половине 27 мая привело к компенсационному сгоновому течению, которое на поверхности восточной части залива Петра Великого направлено на юг и проявляется как усиление потока вдоль западного побережья Амурского залива. Таким образом, сильный ветер, который в течение 26 мая сменил направление с южного на восточный, привел к усилению поверхностных течений в районе мыса Гамова, направленных на юго-запад. Это течение наблюдалось в период с 27 до 30 мая и прослеживалось от района о. Римского-Корсакова до выхода из залива Петра Великого, минуя устье реки Туманной. Скорость течений 27 мая достигала 40 см/с, к 30 мая уменьшилась до 10 см/с с кратковременными пульсационными усилениями каждые сутки до 30 см/с.

Антициклоническая циркуляция начала формироваться в первой половине 27 мая в северной части залива Посъет на северной периферии вышеупомянутого течения. Во второй половине 27 мая эта циркуляция формируется в отдельный вихрь, который визуальнo прослеживается в полях течений до 31 мая. В течение четырех суток своей жизни его диаметр достигал 20 км. Вихрь распался во время следующего усиления восточного ветра в период 30—31 мая, и на его месте начал формироваться уже следующий антициклонический вихрь.

Похожая метеорологическая ситуация наблюдалась во время второго эпизода, который происходил в период с 19 по 23 августа. Усиление восточного ветра

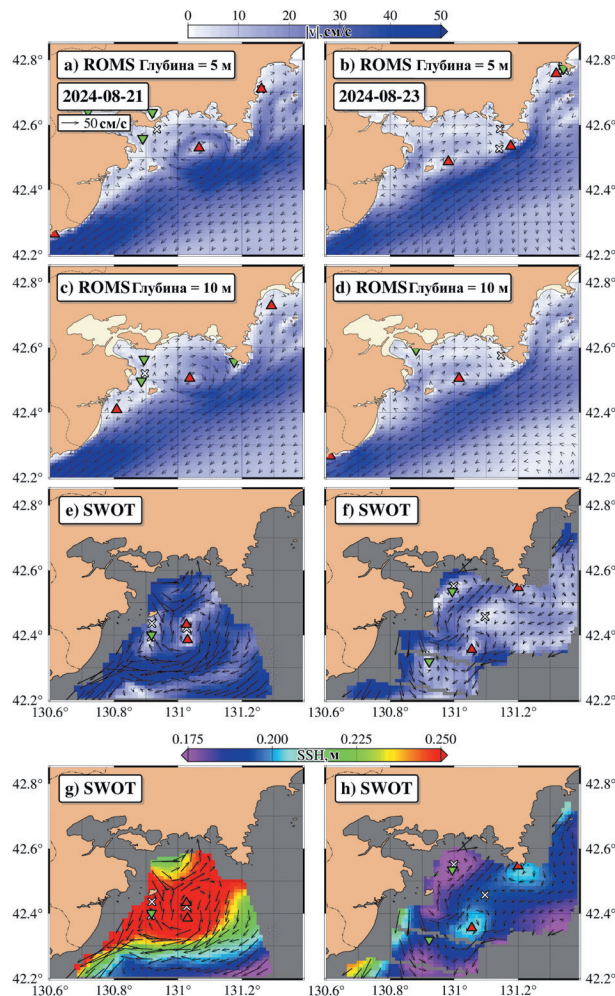


Рис. 3. Сравнение полей поверхностных течений в заливе Посыета по данным спутниковой альтиметрии SWOT и модели ROMS для эпизодов 21 августа 2024 г. (слева) и 23 августа 2024 г. (справа). *a-d*) поле полных скоростей из ROMS на горизонтах 5 м (*a*) и 10 м (*b*); *e, f*) поле геострофических скоростей, рассчитанных по данным SWOT.

Цветовая шкала показывает величины скоростей (*a-f*) и уровень океана (SSH, Sea Surface Height) (*g, h*). Красными треугольниками ▲ показаны центры антициклонов, зелеными ▼ — циклонов определённые методом НЕРТА. Крестики × соответствуют гиперболическим точкам.

Fig. 3. Comparison of surface current fields in Posyet Bay from SWOT satellite altimetry and ROMS model for episodes of August 21, 2024 (left) and August 23, 2024 (right).

a-d) full velocity field from ROMS at depths of 5 m (*a*) and 10 m (*b*);
e, f) geostrophic velocity field calculated from SWOT data.

Color scale shows velocity magnitudes (*a-f*) and sea surface height (SSH) (*g, h*). Red triangles ▲ mark anticyclone centers, green ▼ — cyclone centers identified by the HEPTA method. Crosses × correspond to hyperbolic points.

19 августа привело к усилению юго-западного течения в западной части залива Петра Великого, и к формированию антициклонического вихря 20 августа. Этот вихрь прослеживался до 22 августа, когда проходящий через акваторию залива Петра Великого тайфун JONGDARI перемешал верхний слой, что привело к диссипации антициклонического вихря.

Детальный анализ формирования антициклонических вихрей в северной части залива Посьета показал схожие механизмы. Усиление ветров восточных направлений приводит к усилению юго-западного течения в западной части залива Петра Великого, что, в свою очередь, приводит к формированию антициклонического вихря в северной части залива Посьета. Таким образом, основным физическим механизмом формирования подобного рода вихрей является инерционная неустойчивость, появляющаяся вследствие интенсификации горизонтального градиента скорости течения. Важно, что идентификация этого механизма стала возможной именно благодаря верифицированной модели, поскольку данные SWOT сами по себе не дают полного поля скорости и не позволяют рассчитать градиенты полных течений, необходимые для диагностики неустойчивости. Комплексный подход обеспечил надёжное выделение вихрей и последующий анализ их происхождения.

Заключение

В работе получены следующие основные результаты:

1) Показано, что данные спутниковой альтиметрии SWOT, несмотря на их высокое разрешение, дают только геострофическую (барическую) компоненту скорости, которая в мелководном прибрежном районе не отражает полного течения из-за существенной дрейфовой составляющей, связанной с ветром. Визуальное сопоставление полей абсолютной динамической топографии и геострофических скоростей из SWOT с полями модели ROMS для эпизодов 30—31 мая и 21—23 августа 2024 г. подтвердило, что модель адекватно воспроизводит барическую часть циркуляции (положение и структуру вихрей совпадают). Различия в амплитудах скоростей на горизонте 5 м обусловлены именно учётом в модели дрейфовой компоненты, которая затухает на глубине 10 м, что согласуется с физикой экмановского слоя. Это демонстрирует, что SWOT является эффективным инструментом для верификации барической составляющей региональных моделей, но не может использоваться как самостоятельный источник данных о полных течениях.

2) На основе верифицированной модели ROMS идентифицированы антициклонические вихри в заливе Посьета, возникающие в периоды усиления восточных ветров. Показано, что их генерация обусловлена инерционной неустойчивостью, развивающейся при интенсификации горизонтального градиента скорости юго-западного течения. Пространственные масштабы (десятки км) и время жизни (несколько суток) подтверждают их субмезомасштабную природу. Без привлечения модели, которая учитывает полное поле скорости, диагностика типа неустойчивости была бы невозможна.

3) Разработанная методология совместного анализа SWOT и ROMS позволяет разделить барический и дрейфовый вклады в поверхностные течения, что

критически важно для корректной интерпретации альтиметрических данных в прибрежных акваториях. Этот подход может быть рекомендован для валидации других региональных моделей и для изучения субмезомасштабных процессов в районах, где традиционная альтиметрия малоэффективна. В качестве прикладного примера показано, что идентифицированные вихри способны переносить загрязнённые воды реки Туманной в северо-восточном направлении, что создаёт экологические риски для Дальневосточного морского заповедника, однако главный вклад работы заключается в методологическом аспекте.

Список литературы

1. Tishchenko P. Y., Tishchenko P. P., Lobanov V. B. et al. Impact of the transboundary Razdolnaya and Tumannaya Rivers on deoxygenation of the Peter the Great Bay (Sea of Japan) // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2020. Vol. 239. 106731. doi: 10.1016/j.ecss.2020.106731.
2. Wang S. I., Wang D., Yang X.h. Urbanization and its impacts on water environment in Tumen River Basin // *Chinese Geographical Science*. 2002. Vol. 12. P. 273—281. doi: 10.1007/s11769-002-0014-z.
3. Tkalin A. V., Shapovalov E. N. Influence of Typhoon Judy on chemistry and pollution of the Japan Sea coastal waters near the Tumangan River mouth // *Ocean Research*. 1991. Vol. 13. P. 95—101.
4. Vyshkvartsev D. I., Lebedev E. B. The project of economic development of the Tumangan River is dangerous for shallow water ecosystems of Posyet Bay, Sea of Japan // *Russian Journal of Marine Biology*. 1997. Vol. 1. P. 51—55.
5. Stunzhas P. A., Tishchenko P. Y., Ivin V. V. et al. The first case of anoxia in waters of the Far East Marine Biosphere Reserve // *Doklady Earth Sciences*. 2016. Vol. 467. P. 295—298. doi: 10.1134/S1028334X16030144.
6. Fayman P. A., Salyuk P. A., Budyansky M. V. et al. Transport of the Tumen River water to the Far Eastern Marine Reserve (Posyet Bay) based on in situ, satellite data and Lagrangian modeling using ROMS current velocity output // *Marine Pollution Bulletin*. 2023. Vol. 194. 115414. doi: 10.1016/j.marpolbul.2023.115414.
7. Prants S. V., Fayman P. A., Budyansky M. V. et al. Simulation of winter deep slope convection in Peter the Great Bay (Japan Sea) // *Fluids*. 2022. Vol. 7. 134. doi: 10.3390/fluids7040134.
8. Григорьева Н. И., Мощенко А. В., Пропп Л. Н. и др. Изучение переноса вод и гидрохимических условий района к северу от устья реки Туманной // *Известия ТИНРО*. 1998. Т. 123. С. 423—430.
9. Навроцкий В. В., Дубина В. А., Павлова Е. П. и др. Анализ спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла в заливе Петра Великого (Японское море) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 1. С. 158—170. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-158-170.
10. Vanin N. S., Moshchenko A. V., Feldman K. L. et al. Simplified numerical model of the wind-driven circulation with emphasis on distribution of the Tuman River solid run-off // *Ocean Research*. 2000. Vol. 22. P. 81—90.
11. Fayman P., Ostrovskii A., Lobanov V., et al. Submesoscale eddies in Peter the Great Bay of the Japan/East Sea in winter // *Ocean Dynamics*. 2019. Vol. 69. P. 443—462. doi: 10.1007/s10236-019-01252-8.
12. Fayman P., Prants S., Budyansky M. et al. Coastal summer eddies in the Peter the Great Bay of the Japan sea: in situ data, numerical modeling and Lagrangian analysis // *Continental Shelf Research*. 2019. Vol. 181. P. 143—155. doi: 10.1016/j.csr.2019.05.002.
13. Morrow R., Fu L.-L., Arduin F. et al. Global Observations of Fine-Scale Ocean Surface Topography With the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) Mission // *Frontiers in Marine Science*. 2019. Vol. 6. 232. doi: 10.3389/fmars.2019.00232.
14. Fu L.-L., Pavelsky T., Crétaux J.-F. et al. The Surface Water and Ocean Topography Mission: A breakthrough in radar remote sensing of the ocean and land surface water // *Geophysical Research Letters*. 2024. Vol. 51. e2023GL107652. doi: 10.1029/2023GL107652.
15. Nencioli F., Dibarboure G. et al. An altimeter-based assessment of SWOT KaRIn spectral error requirements // *Advances in Space Research*. 2025. Vol. 76. No. 3. doi: 10.1016/j.asr.2025.05.073.

16. Gómez-Enri J., Arribas-Rodríguez B., Tejedor B. et al. Validation of the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) KaRIn Sea Level Data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2026. Vol. 64. P. 1—11. doi: 10.1109/TGRS.2026.3679467.
17. Shchepetkin A. F., McWilliams J. C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model // *Ocean Modelling*. 2005. Vol. 9. P. 347—404. doi: 10.1016/j.ocemod.2004.08.002.
18. Haidvogel D. B., Arango H. G., Hedstrom K. et al. Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2000. Vol. 32. P. 239—281. doi: 10.1016/S0377-0265(00)00049-X.
19. Marchesiello P., McWilliams J. C., Shchepetkin A. Equilibrium structure and dynamics of the California Current System // *Journal of Physical Oceanography*. 2003. Vol. 33. P. 753—783. doi: 10.1175/1520-0485(2003)033<753:ESADOT>2.0.CO;2.
20. Peliz A., Dubert J., Haidvogel D. B. et al. Generation and propagation of submesoscale eddies in the Iberian upwelling system // *Journal of Marine Research*. 2003. Vol. 61. P. 621—646. doi: 10.1357/002224003322621236.
21. Dinniman M. S., Klinck J. M., Smith W. O. Cross-shelf exchange in a model of the Ross Sea circulation and biogeochemistry // *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2003. Vol. 50. P. 3103—3120. doi: 10.1016/j.dsr2.2003.07.011.
22. Budgell W. P. Numerical simulation of ice-ocean variability in the Barents Sea region // *Ocean Dynamics*. 2005. Vol. 55. P. 370—387. doi: 10.1007/s10236-005-0008-3.
23. Warner J. C., Sherwood C. R., Arango H. G. et al. Performance of four turbulence closure methods implemented using a generic length scale method // *Ocean Modelling*. 2005. Vol. 8. P. 81—113. doi: 10.1016/j.ocemod.2003.12.003.
24. Warner J. C., Geyer W. R., Lerczak J. A. Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment // *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110. C05001. doi: 10.1029/2004JC002691.
25. Wilkin J. L., Arango H. G., Haidvogel D. B. et al. A regional ocean modeling system for the Long-term Ecosystem Observatory // *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110. C06S91. doi: 10.1029/2003JC002218.
26. Song Y., Haidvogel D. A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system // *Journal of Computational Physics*. 1994. Vol. 115. P. 228—244. doi: 10.1006/jcph.1994.1189.
27. Moore A. M., Arango H. G., Di Lorenzo E. et al. A comprehensive ocean prediction and analysis system based on the tangent linear and adjoint of a regional ocean model // *Ocean Modelling*. 2004. Vol. 7. P. 227—258. doi: 10.1016/j.ocemod.2003.11.001.
28. Moore A. M., Arango H. G., Di Lorenzo E. et al. An adjoint sensitivity analysis of the Southern California Current circulation // *Journal of Physical Oceanography*. 2006. Vol. 36. P. 1765—1787. doi: 10.1175/JPO2929.1.
29. Fairall C. W., Bradley E. F., Rogers D. P. et al. Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment // *Journal of Geophysical Research*. 1996. Vol. 101. P. 3747—3764. doi: 10.1029/95JC03205.
30. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002. Vol. 83. P. 1631—1643. doi: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
31. Bentamy A., & Fillon D. C. Gridded surface wind fields from Metop/ASCAT measurements // *International Journal of Remote Sensing*. 2012. Vol. 33. P. 1729—1754. doi: 10.1080/014311161.2011.600348.
32. Miyazawa Y., Varlamov S. M., Miyama T. et al. Assimilation of high-resolution sea surface temperature data into an operational nowcast/forecast system around Japan using a multi-scale three-dimensional variational scheme // *Ocean Dynamics*. 2017. Vol. 67. P. 713—728. doi: 10.1007/s10236-017-1056-1.
33. Flather R. A. A tidal model of the north-west European continental shelf // *Mémoires de la Société Royale des Sciences de Liège*. 1976. Vol. 6. P. 141—164.
34. Chapman D. C. Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model // *Journal of Physical Oceanography*. 1985. Vol. 15. P. 1060—1075. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1985\)015<1060:NTOCSSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1985)015<1060:NTOCSSO>2.0.CO;2).
35. Udalov A. A., Uleysky M. Yu. Hyperbolic and elliptic points tracking algorithm (HEPTA) in two-dimensional non-stationary velocity fields defined on a discrete grid // *Communications*

- in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2025. Vol. 152 (B). Art. no. 109208. doi: 10.1016/j.cnsns.2025.109208.
36. Budyansky M. V., Udalov A. A., Uleysky M. Yu. et al. Comparative analysis of vortex dynamics: Hyperbolic and Elliptic Point Tracking Algorithm – HEPTA vs. Angular Momentum Eddy Detection and Tracking Algorithm – AMEDA // *Ocean Modelling*. 2026. Vol. 203. 102765. doi: 10.1016/j.oceanmod.2026.102765.
 37. Sandalyuk N. V., Khachatryan E. M. Comparative Analysis of Eddies in Open Ocean and Marginal Ice Zone Using SWOT and Sentinel-1 Data // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2026. No. 1. doi: 10.2205/2026es001081.
 38. Липинская Н. А., Салюк П. А. Анализ гидробиологических и гидрооптических характеристик в субмезомасштабных вихрях залива Петра Великого по одновременным натурным и спутниковым данным // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14. № 3. С. 111—122. doi: 10.7868/S2073667321030102.
 39. Lipinskaya N. A., Salyuk P. A. Variations and Depth of Formation of Submesoscale Eddy Structures in Satellite Ocean Color Data in the Southwestern Region of the Peter the Great Bay // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. 5600. doi: 10.3390/rs15235600.

References

1. Tishchenko P. Y., Tishchenko P. P., Lobanov V. B., et al. Impact of the transboundary Razdolnaya and Tumannaya Rivers on deoxygenation of the Peter the Great Bay (Sea of Japan). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2020; (239):106731. doi: 10.1016/j.ecss.2020.106731.
2. Wang S. I., Wang D., Yang X.h. Urbanization and its impacts on water environment in Tumen River Basin. *Chinese Geographical Science*. 2002; (12):273—281. doi: 10.1007/s11769-002-0014-z.
3. Tkalin A. V., Shapovalov E. N. Influence of Typhoon Judy on chemistry and pollution of the Japan Sea coastal waters near the Tumangan River mouth. *Ocean Research*. 1991; (13):95—101.
4. Vyshkvartsev D. I., Lebedev E. B. The project of economic development of the Tumangan River is dangerous for shallow water ecosystems of Posyet Bay, Sea of Japan. *Russian Journal of Marine Biology*. 1997; (1):51—55.
5. Stunzhas P. A., Tishchenko P. Y., Ivin V. V., et al. The first case of anoxia in waters of the Far East Marine Biosphere Reserve. *Doklady Earth Sciences*. 2016; (467):295—298. doi: 10.1134/s1028334x16030144.
6. Fayman P. A., Salyuk P. A., Budyansky M. V., et al. Transport of the Tumen River water to the Far Eastern Marine Reserve (Posyet Bay) based on in situ, satellite data and Lagrangian modeling using ROMS current velocity output. *Marine Pollution Bulletin*. 2023; (194):115414. doi: 10.1016/j.marpolbul.2023.115414.
7. Prants S. V., Fayman P. A., Budyansky M. V., et al. Simulation of winter deep slope convection in Peter the Great Bay (Japan Sea). *Fluids*. 2022; (7):134. doi: 10.3390/fluids7040134.
8. Grigorieva N. I., Moshchenko A. V., Propp L.N., et al. Study of water transport and hydrochemical conditions in the area north of the Tumen River mouth. *Izvestiya TINRO = Proceedings of TINRO*. 1998; (123): (423—430). (In Russ.).
9. Navrotskiy V. V., Dubina V. A., Pavlova E. P., et al. Analysis of satellite observations of chlorophyll concentration in Peter the Great Bay (Sea of Japan). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2019; 16(1): (158—170). doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-158-170. (In Russ.).
10. Vanin N. S., Moshchenko A. V., Feldman K. L., et al. Simplified numerical model of the wind-driven circulation with emphasis on distribution of the Tuman River solid run-off. *Ocean Research*. 2000; (22):81—90.
11. Fayman P., Ostrovskii A., Lobanov V., et al. Submesoscale eddies in Peter the Great Bay of the Japan/East Sea in winter. *Ocean Dynamics*. 2019; (69): 443—462. doi: 10.1007/s10236-019-01252-8.
12. Fayman P., Prants S., Budyansky M., et al. Coastal summer eddies in the Peter the Great Bay of the Japan sea: in situ data, numerical modeling and Lagrangian analysis. *Continental Shelf Research*. 2019; (181): 143—155. doi: 10.1016/j.csr.2019.05.002.
13. Morrow R., Fu L.-L., Arduhin F., et al. Global Observations of Fine-Scale Ocean Surface Topography With the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) Mission. *Frontiers in Marine Science*. 2019; (6):232. doi: 10.3389/fmars.2019.00232.

14. Fu L.-L., Pavelsky T., Crétaux J.-F., et al. The Surface Water and Ocean Topography Mission: A breakthrough in radar remote sensing of the ocean and land surface water. *Geophysical Research Letters*. 2024; (51):e2023GL107652. doi: 10.1029/2023GL107652.
15. Nencioli F., Dibarboure G., et al. An altimeter-based assessment of SWOT KaRIn spectral error requirements. *Advances in Space Research*. 2025;76(3). doi: 10.1016/j.asr.2025.05.073.
16. Gómez-Enrí J., Arribas-Rodríguez B., Tejedor B., et al. Validation of the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) KaRIn Sea Level Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2026; (64):1—11. doi: 10.1109/TGRS.2026.3679467.
17. Shchepetkin A. F., McWilliams J. C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*. 2005; (9): 347—404. doi: 10.1016/j.ocemod.2004.08.002.
18. Haidvogel D. B., Arango H. G., Hedstrom K., et al. Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2000; (32): 239—281. doi: 10.1016/S0377-0265(00)00049-X.
19. Marchesiello P., McWilliams J. C., Shchepetkin A. Equilibrium structure and dynamics of the California Current System. *Journal of Physical Oceanography*. 2003; (33): 753—783. doi: 10.1175/1520-0485(2003)033<753:ESADOT>2.0.CO;2.
20. Peliz A., Dubert J., Haidvogel D. B., et al. Generation and propagation of submesoscale eddies in the Iberian upwelling system. *Journal of Marine Research*. 2003; (61): 621—646. doi: 10.1357/002224003322621236.
21. Dinniman M. S., Klinck J. M., Smith W.O. Cross-shelf exchange in a model of the Ross Sea circulation and biogeochemistry. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2003; 50: 3103—3120. doi: 10.1016/j.dsr2.2003.07.011.
22. Budgell W. P. Numerical simulation of ice-ocean variability in the Barents Sea region. *Ocean Dynamics*. 2005; 55: 370—387. doi: 10.1007/s10236-005-0008-3.
23. Warner J. C., Sherwood C. R., Arango H. G., et al. Performance of four turbulence closure methods implemented using a generic length scale method. *Ocean Modelling*. 2005; (8):81—113. doi: 10.1016/j.ocemod.2003.12.003.
24. Warner J. C., Sherwood C. R., Arango H. G., et al. Performance of four turbulence closure methods implemented using a generic length scale method. *Ocean Modelling*. 2005; (8):81—113. doi: 10.1016/j.ocemod.2003.12.003.
25. Wilkin J. L., Arango H. G., Haidvogel D. B., et al. A regional ocean modeling system for the Long-term Ecosystem Observatory. *Journal of Geophysical Research*. 2005; (110):C06S91. doi: 10.1029/2003JC002218.
26. Song Y., Haidvogel D. A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. *Journal of Computational Physics*. 1994; (115):228—244. doi: 10.1006/jcph.1994.1189.
27. Moore A. M., Arango H. G., Di Lorenzo E. et al. A comprehensive ocean prediction and analysis system based on the tangent linear and adjoint of a regional ocean model. *Ocean Modelling*. 2004; (7):227—258. doi: 10.1016/j.ocemod.2003.11.001.
28. Moore A. M., Arango H. G., Di Lorenzo E. et al. An adjoint sensitivity analysis of the Southern California Current circulation. *Journal of Physical Oceanography*. 2006; (36):1765—1787. doi: 10.1175/JPO2929.1.
29. Fairall C. W., Bradley E. F., Rogers D. P., et al. Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment. *Journal of Geophysical Research*. 1996; (101):3747-3764. doi: 10.1029/95JC03205.
30. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., et al. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002; (83):1631—1643. doi: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
31. Bentamy A., Croize Fillon D. Gridded surface wind fields from Metop/ASCAT measurements. *International Journal of Remote Sensing*. 2012; (33):1729—1754. doi: 10.1080/01431161.2011.600348.
32. Miyazawa Y., Varlamov S. M., Miyama T. et al. Assimilation of high-resolution sea surface temperature data into an operational nowcast/forecast system around Japan using a multi-scale three-dimensional variational scheme // *Ocean Dynamics*. 2017. Vol. 67. P. 713—728. doi: 10.1007/s10236-017-1056-1.

33. Flather R. A. A tidal model of the north-west European continental shelf. *Mémoires de la Société Royale des Sciences de Liège*. 1976; (6):141—164.
34. Chapman D. C. Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model. *Journal of Physical Oceanography*. 1985; (15):1060—1075. doi: 10.1175/1520-0485(1985)015<1060:NTOCSSO>2.0.CO;2.
35. Udalov A. A., Uleysky M. Yu. Hyperbolic and elliptic points tracking algorithm (HEPTA) in two-dimensional non-stationary velocity fields defined on a discrete grid. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2025; 152(B):109208. doi: 10.1016/j.cnsns.2025.109208.
36. Budyansky M. V., Udalov A. A., Uleysky M. Yu., et al. Comparative analysis of vortex dynamics: Hyperbolic and Elliptic Point Tracking Algorithm – HEPTA vs. Angular Momentum Eddy Detection and Tracking Algorithm – AMEDA. *Ocean Modelling*. 2026; (203):102765. doi: 10.1016/j.oceanmod.2026.102765.
37. Sandalyuk N. V., Khachatryan E. M. Comparative Analysis of Eddies in Open Ocean and Marginal Ice Zone Using SWOT and Sentinel-1 Data // Russian Journal of Earth Sciences. 2026. No. 1. doi: 10.2205/2026es001081.
38. Lipinskaya N. A., Salyuk P. A. Analysis of hydrobiological and hydrooptical characteristics in submesoscale eddies of Peter the Great Bay based on simultaneous in situ and satellite data. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika = Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2021; 14(3): (111—122). doi: 10.7868/S2073667321030102. (In Russ.).
39. Lipinskaya N. A., Salyuk P. A. Variations and Depth of Formation of Submesoscale Eddy Structures in Satellite Ocean Color Data in the Southwestern Region of the Peter the Great Bay. *Remote Sensing*. 2023; (15):5600. doi: 10.3390/rs15235600.

Информация об авторах

Дидов Александр Алексеевич, кандидат физико-математических наук, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН; м.н.с., didov.aa@poi.dvo.ru.

Файман Павел Аркадьевич, кандидат физико-математических наук, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН; в.н.с., pavel.fayman@yandex.ru.

Будянский Максим Васильевич, кандидат физико-математических наук, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН; в.н.с., plaztic@poi.dvo.ru.

Белоненко Татьяна Васильевна, доктор географических наук, профессор кафедры океанологии, Санкт-Петербургский государственный университет, btvlisab@yandex.ru.

Information about authors

Alexander A. Didov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; Junior Researcher.

Pavel A. Fayman, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; Leading Researcher.

Maxim V. Budyansky, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; Leading Researcher.

Tatyana V. Belonenko, Doctor of Geographical Sciences, Professor of the Department of Oceanology, St. Petersburg State University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 17.07.2026

Принята в печать 30.08.2026

The article was received on 17.07.2026

The article was accepted on 30.08.2026

Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 473—487.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(84):473—487.

Научная статья

УДК [465.7:639.2:597.555.5](265.2)

doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-473-487

**Влияние крупномасштабных изменений
в атмосфере и океане на состояние запасов тресковых рыб
Северного полушария.
Часть II. Северная часть Тихого океана**

*Андрей Сергеевич Кровнин, Сергей Петрович Мельников,
Андрей Валерьевич Датский, Георгий Петрович Мурый*

Государственный научный центр Российской Федерации федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», akrovnin@vniro.ru

Аннотация. Приведены результаты оценки влияния крупномасштабных изменений в атмосфере и океане на состояние запасов тресковых рыб в северотихоокеанском регионе за период с 1963 г. по 2024 г. К 43 временным рядам численности пополнения их запасов и различных климатических индексов был применен метод главных компонент. По результатам расчетов выделены группы биологических и физических переменных со схожим характером многолетней изменчивости. Показано, что синхронное влияние одного или группы взаимосвязанных (дальние связи «атмосфера—океан») крупномасштабных климатических факторов обуславливает наличие как транстихоокеанских статистических связей в колебаниях численности пополнения между северо-западными и северо-восточными запасами тресковых рыб, так и региональных связей у близко расположенных запасов.

Ключевые слова: северная часть Тихого океана, тресковые рыбы, климатические индексы, дальние связи, метод главных компонент.

Для цитирования: Кровнин А. С., Мельников С. П., Датский А. В., Мурый Г. П. Влияние крупномасштабных изменений в атмосфере и океане на состояние запасов тресковых рыб Северного полушария. Часть II. Северная часть Тихого океана // Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 473—487. doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-473-487.

Impact of the large-scale variations in the atmosphere and ocean on state of gadid stocks in the Northern Hemisphere. Part 2. The North Pacific

Andrei S. Krovnin, Sergei P. Melnikov, Andrey V. Datsky, Georgy P. Moury

State Science Center of the Russian Federation Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography («VNIRO»)

Summary. The gadid stocks in the North Pacific (NP) undergo the considerable long-term and interannual variability due to climate change and variations. The aim of this work is to study spatiotemporal relationships between their recruitment abundance and various large-scale climatic factors in order to improve the long-term forecasts of the stock state. Data on recruitment abundance of 8 walley pollock, 9 Pacific cod, and 2 navaga stocks have been used. We applied the principal component analysis (PCA) to total 43 time series of recruitment abundance and various oceanic and atmospheric indices for the 1994-2020 period. As a result, several groups of gadid stocks and physical parameters with similar character of multi-year variability were identified. It was shown that recruitment dynamics of most gadid stocks was associated with the main modes of climatic variability in the North Pacific region, such as North Pacific Gyre Oscillation, West Pacific pattern, and Pacific Decadal Oscillation. These climatic modes determine, in particular, the opposite relationships of recruitment abundance variations between the northwestern and northeastern gadid stocks in the North Pacific basin. The relationships revealed may be explained partly by biological reasons, in particular, by absence of complete reproductive isolation of stocks of the same species, with extensive larval transfer between spawning grounds located in the adjacent areas and migrations of maturing individuals.

Keywords: North Pacific, gadid stocks, climatic indices, teleconnections, principal component analysis.

For citation: Krovnin A. S., Melnikov S. P., Datsky A. V., Moury G. P. Impact of the large-scale variations in the atmosphere and ocean on state of gadid stocks in the Northern Hemisphere. Part 2. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(84):(473—487). doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-473-487. (In Russ.).

Введение

Основным районом, обеспечивающим на современном этапе наибольшую долю общероссийского вылова водных биоресурсов (ВБР), является Дальневосточный рыбохозяйственный бассейн, включающий в себя Охотское, Берингово, Японское и Чукотское моря с прилегающими к ним в пределах 200-мильной экономической зоны РФ акваториями Тихого океана [1, 2]. Согласно статистике вылова последних лет, лишь около 11 % суммарной добычи приходится на анадромных и пресноводных рыб, а также на беспозвоночных, в то время как до 89 % всех уловов составляют морские рыбы. Среди морских рыб основу вылова составляют тресковые рыбы трех видов (минтай, треска, навага), сайку не добывают. По данным за 2025 г. их общий вылов достиг 2,336 млн т или 76,0 % от всех уловов основных морских рыб, из которых уловы минтая составили 2,181 млн т (93,4 % уловов тресковых). Трески и наваги было поймано 117,0 (5,0 %) и 38,1 (1,6 %) тыс. т, соответственно. Сайка, еще один вид тресковых рыб, обитает в морях Арктики, мигрируя в периоды её высокой численности в северную часть Берингова моря, где и наблюдается в уловах преимущественно научных судов [3].

Минтай — один из наиболее массовых видов рыб в северной части Тихого океана. Будучи вторым по объёмам вылова объектом в мире (после перуанского анчоуса), этот вид является объектом номер один в отечественном рыболовстве, составляя более 70 % всего вылова рыб в дальневосточных морях и прилегающих акваториях. Основными районами добычи минтая являются Охотское, Берингово моря и тихоокеанские воды у восточного побережья Камчатки, северных и южных Курильских островов. Меньшее значение имеют как запасы, так и промысел в ИЭЗ РФ в Японском море [1].

Вследствие региональных особенностей исследуемых акваторий северо-западной части Тихого океана и различающихся условий обитания рыб в них, общая динамика обилия минтая естественным образом не отражает флюктуации численности отдельных группировок морских рыб. Так, в 1970-е гг. наблюдались довольно высокие биомассы западноберингоморской и восточнокамчатской популяций минтая, рыб у Северо-Восточного Сахалина и Приморья. В 1980-е гг. наибольшие значения обилия показали восточно-, западноберингоморская, южнокурильская и восточноохотоморская группировки, а также приморский минтай. Относительно высокая биомасса в 1990-е гг. была замечена только у минтая северо-восточной части Охотского и северо-западной части Берингова морей. С начала 2000-х гг. и по настоящий момент максимальное обилие данного вида выявлено у анадырско-наваринской, восточнокамчатской и восточноохотоморской группировок, прочие популяции, за исключением рыб из восточной части Берингова моря, находятся на своём минимуме. В целом, общий тренд на увеличение обилия за весь период наблюдений отмечается у восточноберингоморской, анадырско-наваринской, восточнокамчатской и восточноохотоморской группировок минтая, у остальных биомасса имеет тенденцию к снижению. У минтая различных группировок периоды появления наибольшей биомассы находились в пределах 9,9—11,2 лет, которые во многом обусловлены появлением урожайных поколений [4, 5].

Анализ причин динамики запасов минтая и других видов тресковых в северной части Тихого океана является одной из важнейших рыбохозяйственных задач по их сохранению и рациональному использованию. В первой части статьи нами было рассмотрено влияние крупномасштабных климатических факторов на динамику численности пополнения основных запасов тресковых рыб в североатлантическом регионе. Были выявлены группы запасов, многолетние изменения каждой из которых обусловлены воздействием одного и того же климатического фактора.

Цель настоящей работы заключается в изучении влияния крупномасштабных изменений в атмосфере и океане на состояние запасов тресковых рыб в северной части Тихого океана как научной основы прогнозирования долгосрочной динамики их состояния и численности.

Материалы и методы

В работе использованы данные по численности пополнения 8 запасов минтая, 9 запасов трески и 2 запасов наваги в северотихоокеанском регионе. Положение районов, с которыми связаны указанные запасы, схематично показано на рис. 1. Названия запасов, соответствующие цифрам, представлены в табл. 1.

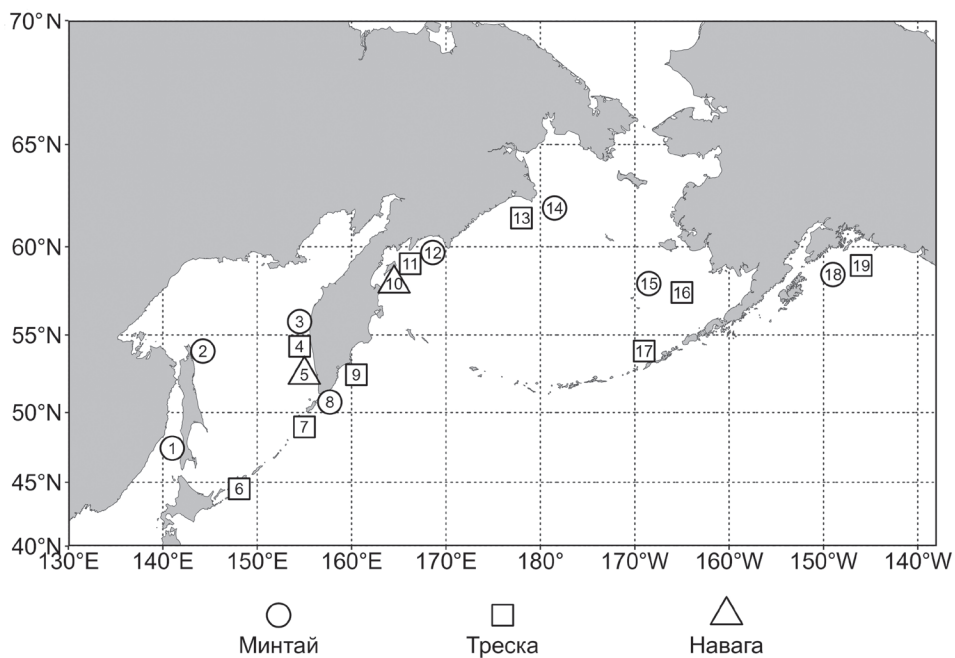


Рис. 1. Схематичное положение районов распределения основных запасов тресковых рыб в северной части Тихого океана.

Fig. 1. Schematic position of distribution areas of main gadid stocks in the North Pacific.

Таблица 1
Запасы тресковых рыб, используемые при анализе динамики численности их пополнения
Gadid stocks used for analysis of recruitment abundance dynamics

№	Запас	Период, гг.
1	минтай западносахалинский	1990—2024
2	минтай северовостоносахалинский	2000—2024
3	минтай восточноооходоморский	1963—2023
4	треска западнокамчатская	1971—2023
5	навага западнокамчатская	1987—2023
6	треска южнокурильская	1981—2023
7	треска северокурильская	1975—2023
8	минтай восточнокамчатский	1973—2023
9	треска восточнокамчатская	1990—2023
10	навага олюторско-карагинская	1974—2023
11	треска олюторско-карагинская	1980—2023
12	минтай западноберинговоморский	1968—2023
13	треска анадырско-наваринская	1968—2022
14	минтай анадырско-наваринский	1994—2024

Окончание табл. 1

№	Запас	Период, гг.
15	минтай восточноберинговоморский	1964—2023
16	треска восточноберинговоморская	1978—2024
17	треска алеутская	1989—2023
18	минтай залива Аляска	1970—2023
19	треска залива Аляска	1977—2024

Изучение пространственно-временных связей между климатическими характеристиками и численностью пополнения тресковых рыб выполнено с использованием временных рядов среднемесячных значений различных климатических индексов за период с 1950 г. по 2024 г. [6]. Эти индексы характеризуют известные дальние связи в северной части Тихого океана и атмосфере Северного полушария. Для всех рядов были рассчитаны средние зимние значения, которые охватывали период с декабря по февраль для атмосферных индексов и с января по апрель — для океанических индексов.

В работе использовались методы многомерного статистического анализа, используемые в промысловой океанологии [7, 8]. Так, для характеристики зимних термических условий на поверхности Северной части Тихого океана выполнено районирование ее акватории с помощью иерархического кластерного анализа методом Уорда [9]. Для этого был использован массив данных по температуре поверхности океана (ТПО) из архива Росгидрометцентра за период с 1957 г. по 2018 г. Выделены квазистационарные (в пространстве) районы, по которым можно проводить корректное осреднение средних зимних (январь—апрель) аномалий ТПО (АТПО). Положение районов показано на рис. 2.

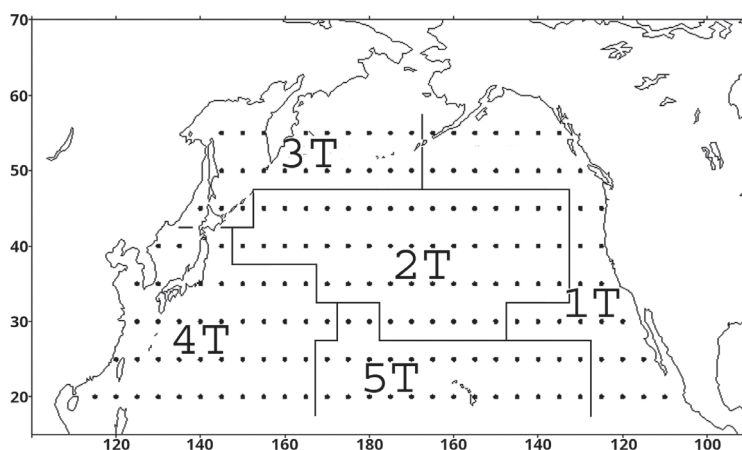


Рис. 2. Результаты кластерного анализа полей средних зимних АТПО в северной части Атлантического Тихого океана для периода с 1987 г. по 2018 г. [10].

Fig. 2. Results of cluster analysis of mean winter SSTA in the North Pacific for 1987—2018 [10].

Выявление ведущих климатических факторов, влияющих на группы запасов тресковых рыб исследуемого региона выполнено с использованием метода главных компонент. Расчеты проводились с использованием пакета программ Climate Data Operators [11] для 43 временных рядов биологических и физических параметров (1994—2020 гг.). Для указанного периода имеются данные по численности пополнения всех рассматриваемых в работе запасов тресковых рыб.

Результаты и обсуждение

В табл. 3 представлены коэффициенты корреляции между каждым из используемых в работе рядов и каждой из первых пяти ГК в североатлантическом регионе. Эти компоненты объясняют 61,77 % общей дисперсии всех 43 временных рядов. Как и в случае Северной Атлантики, в табл. 3 представлены только те биологические и физические характеристики, которые статистически значимо коррелируют с соответствующей ГК.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции
между пятью первыми главными компонентами 43 временных биологических и
физических временных рядов и каждым из рядов за период с 1994 г. по 2020 г.
Выделены коэффициенты корреляции с абсолютными значениями $r \geq 0,40$

Loadings of the first five principal components of the 43 biological and climatic time series
for 1994—2020. Color indicates correlation coefficients with absolute values $r \geq 0,40$

Название переменной	ГК1	ГК2	ГК3	ГК4	ГК5
	17,82%	15,41%	12,17%	9,41%	6,96%
Минтай анадырско-наваринский	−0,07	0,05	0,27	−0,14	0,35
Минтай западноберинговоморский	0,45	−0,17	−0,68	0,00	−0,02
Минтай восточнокамчатский	0,50	0,25	−0,66	0,17	−0,17
Минтай восточноохотоморский	0,70	−0,10	−0,05	0,36	0,36
Минтай западносахалинский	0,70	−0,10	−0,04	0,26	0,37
Минтай восточноберинговоморский	0,21	−0,45	0,25	0,03	0,26
Минтай залива Аляска	0,00	0,39	−0,13	−0,08	0,24
Треска анадырско-наваринская	0,53	0,39	−0,09	0,09	−0,17
Треска олюторско-карагинская	0,25	0,52	−0,02	0,54	0,30
Треска восточнокамчатская	0,60	0,14	−0,58	0,11	−0,10
Треска западнокамчатская	0,71	0,16	0,04	−0,12	0,01
Треска северокурильская	−0,13	−0,05	−0,53	−0,40	−0,33
Треска южнокурильская	0,38	−0,12	−0,40	0,03	−0,02
Треска восточноберинговоморская	−0,09	0,69	0,03	0,08	−0,13
Треска залива Аляска	−0,15	0,74	0,12	0,18	0,19
Треска алеутская	−0,36	−0,19	0,44	−0,48	0,03
Навага олюторско-карагинская	0,25	0,58	−0,33	0,36	−0,24
Навага западнокамчатская	0,64	0,02	−0,02	0,34	0,43
Индекс АМО (январь—апрель)	−0,03	−0,19	−0,56	0,24	−0,43
Индекс ВА (декабрь—март)	0,13	−0,37	−0,15	0,30	0,15

Окончание табл. 2

Название переменной	ГК1	ГК2	ГК3	ГК4	ГК5
	17,82%	15,41%	12,17%	9,41%	6,96%
Индекс ВА/ЗР (декабрь—март)	−0,26	−0,52	−0,05	−0,05	−0,34
Индекс САК (декабрь—март)	0,46	−0,26	−0,04	−0,43	0,44
СТО индекс (декабрь—март)	0,43	0,59	−0,28	−0,48	0,06
Индекс ОСТК (январь—апрель)	−0,69	0,20	−0,29	0,39	0,22
Индекс ТДО (январь—апрель)	0,26	−0,75	0,31	0,45	0,00
Индекс ТСА (декабрь—февраль)	−0,24	−0,58	−0,07	0,56	0,17
Индекс ПОЛ (декабрь—февраль)	−0,21	−0,15	0,35	−0,26	−0,45
Индекс СКАНД (декабрь—февраль)	0,08	0,40	0,23	0,57	−0,23
Индекс ТСП (декабрь—февраль)	0,44	0,28	−0,24	−0,27	0,31
Индекс ЗТ (декабрь—февраль)	−0,01	−0,15	−0,65	0,00	−0,06
Индекс ЗА (декабрь—февраль)	−0,48	0,31	0,06	0,21	−0,22
АТПО в Районе 1Т (январь—апрель)	0,49	−0,61	0,51	0,07	−0,17
АТПО в Районе 2Т (январь—апрель)	−0,17	0,25	0,00	−0,73	0,07
АТПО в Районе 3Т (январь—апрель)	0,57	0,01	0,54	−0,16	−0,49
АТПО в Районе 4Т (январь—апрель)	−0,64	−0,32	−0,45	−0,25	0,06
АТПО в Районе 5Т (январь—апрель)	−0,28	−0,48	−0,35	0,01	0,04
АТПО в Районе 1А (январь—апрель)	−0,29	−0,36	−0,57	0,08	0,00
АТПО в Районе 2А (январь—апрель)	0,14	−0,22	−0,61	−0,46	0,34
АТПО в Районе 5А (январь—апрель)	−0,57	−0,27	−0,52	−0,14	−0,22
АТПО в Районе 6А (январь—апрель)	0,02	0,13	0,66	−0,17	0,38

Первая ГК (17,82 %) обнаруживает тесную отрицательную связь с индексом осцилляции северотихоокеанских круговоротов (ОСТК—NPGO) [12] ($r = -0,69$, $p < 0,01$) (табл. 3). Следовательно, положительные значения первой главной компоненты соответствуют отрицательной фазе ОСТК. В средней тропосфере этой фазе соответствует меридиональный диполь с областью повышенного атмосферного давления над Беринговым и Охотским морями и центром противоположного знака в субтропических широтах северной части Тихого океана (рис. 3 б). Этот диполь характеризует отрицательную фазу северотихоокеанского колебания. При такой ситуации ветровое воздействие способствует формированию положительных АТПО в Аляскинском круговороте и вдоль северной периферии субарктического круговорота (рис. 3 в). В районе восточной Камчатки и в восточной части Охотского моря пониженная теплоотдача с морской поверхности за счет преобладания ветров южных румбов на западном фланге области повышенного атмосферного давления приводит к формированию положительных АТПО, что проявляется в статистически значимой положительной корреляция зимних АТПО в районе ЗТ (северо-западная часть Тихого океана, рис. 2) с первой ГК ($r = 0,57$, $p < 0,01$).

С первой ГК статистически значимо коррелируют временные ряды численности пополнения восьми запасов тресковых рыб. К ним относятся: западносахалинский, восточноохотоморский, восточнокамчатский и западноберингоморский минтай, западнокамчатская, восточнокамчатская и анадырско-наваринская

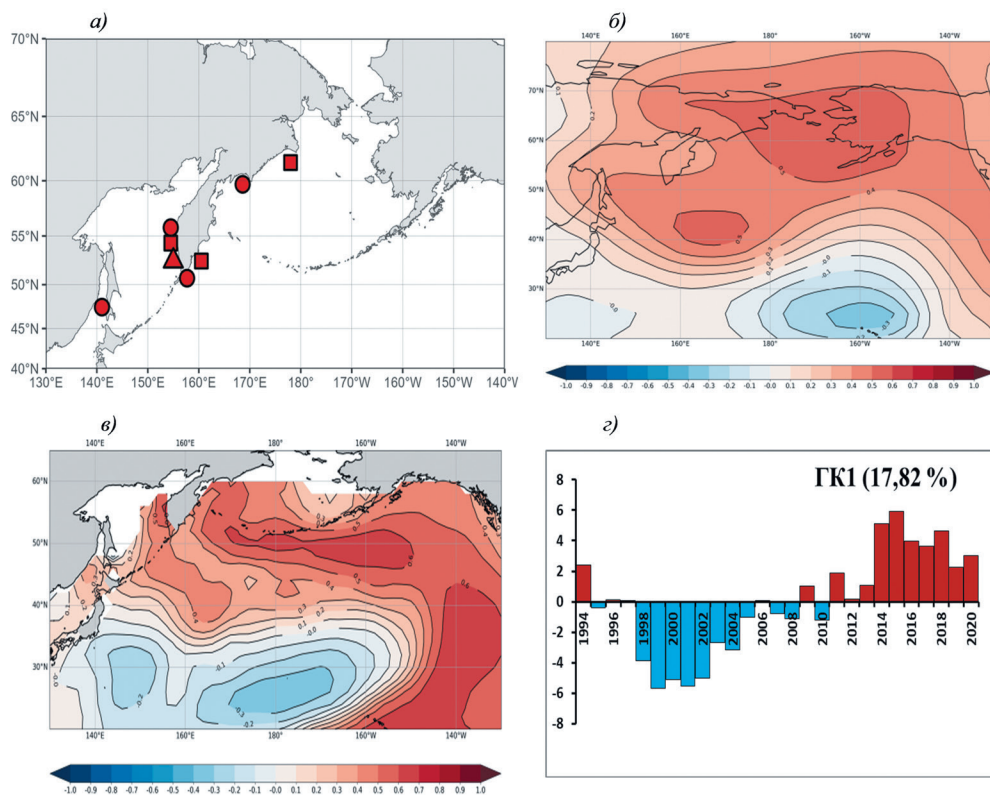


Рис. 3. Запасы тресковых рыб, связанные с ГК1 (а), распределение коэффициентов корреляции между ГК1 и полями средних зимних аномалий геопотенциальных высот поверхности 500 гПа (б) и ТПО (в) в северной части Тихого океана; временной ход ГК1 (г).

Fig. 3. Gadid stocks associated with PC1 (a), correlation patterns of PC1 with fields of mean winter anomalies of H500 (b) and SST (c) in the North Pacific, time series of PC1 (d).

треска, западнокамчатская навага (рис. 3 а). При этом для всех указанных запасов знаки коэффициентов корреляции положительны. Следовательно, потепление вод в северо-западной части Тихого океана, связанное с развитием отрицательной фазы ОСТК, оказывает благоприятное влияние на урожайность поколений всех восьми отмеченных выше запасов тресковых рыб региона. Выявленная синхронность в динамике численности пополнения тресковых одного и того же вида также может быть связана с отсутствием репродуктивной изоляции в период воспроизводства, когда урожайное поколение одного из запасов вносит свой вклад в пополнение других запасов.

Многолетние изменения первой ГК характеризуются снижением ее значений с 1994 г. до минимума в 1999 г., а затем их ростом с максимумом в 2015 г. (рис. 3 г). При этом с 2011 г. преобладали положительные значения ГК1.

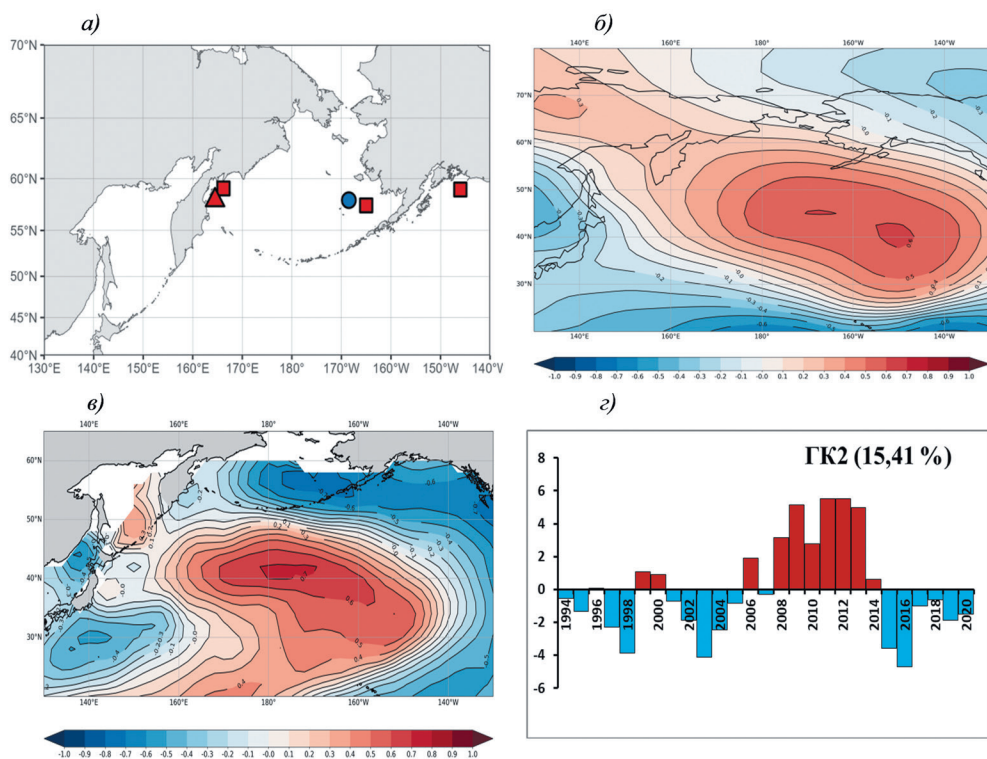


Рис. 4. Запасы тресковых рыб, связанные с ГК2 (а), распределение коэффициентов корреляции между ГК2 и полями средних зимних аномалий геопотенциальных высот поверхности 500 гПа (б) и ТПО (в) в северной части Тихого океана, временной ход ГК2 (г).

Fig. 4. Gadid stocks associated with PC2 (a), correlation patterns of PC2 with fields of mean winter anomalies of H500 (b) and SST (c) in the North Pacific, time series of PC2 (d).

Среди физических параметров наиболее тесную связь с ГК2 (15,41 %) имеет индекс тихоокеанской декадной осцилляции (ТДО—PDO) [13], причем эта связь отрицательная ($r = -0,75$, $p < 0,01$). В средней тропосфере этой осцилляции соответствует тихоокеанско/североамериканская ДС (рис. 4 б). Отрицательная фаза ТДО характеризуется похолоданием поверхностных вод вдоль западного побережья Северной Америки и их потеплением в обширном районе между 30—45° с.ш., простирающемся от азиатского побережья до 130—140° з.д. (рис. 4 в), что проявляется в статистически значимой отрицательной связи ГК2 со среднезимними АТПО в районе 1Т (рис. 2). С рассматриваемой ГК2 связаны многолетние изменения численности пополнения 5 запасов, в том числе положительно коррелирующие с ней ряды пополнения олюторско-карагинских трески и наваги, восточноберингоморской трески и трески залива Аляска и отрицательно коррелирующий ряд восточноберингоморского минтая (табл. 3, рис. 4 а). Таким образом, установление отрицательной фазы ТДО благоприятно для роста уровня пополнения

запасов трески и наваги юго-западной части Берингова моря и запасов трески в СВТО и менее благоприятно для восточноберинговоморского минтая.

Временной ход ГК2 характеризуется хорошо выраженными декадными колебаниями с переходом от отрицательных значений к положительным в 2008 г. и обратным переходом в 2015 г. (рис. 4 з).

ГК3 (12,17 %) наиболее тесно (отрицательно) коррелирует с индексом западно-тихоокеанской дальней связи (ЗТ—WP) [14] ($r = -0,65$, $p < 0,01$) (табл. 3), которая является одной из двух ведущих мод низкочастотной изменчивости атмосферы над северной частью Тихого океана. В зимние и весенние месяцы эта ДС представляет собой меридиональный диполь, один центр которого расположен над Камчаткой, а другой, обширный центр противоположного знака, охватывает районы Юго-Восточной Азии и западный сектор тропического пояса северной части Тихого океана (рис. 5 б). При отрицательных значениях индекса ЗТ температура на поверхности океана повышается в восточной части Охотского моря и в районе к юго-востоку от Камчатки и снижается южнее и юго-восточнее Японских островов (рис. 5 в). Описанные особенности проявления ЗТ подтверждаются статистически значимыми коэффициентами корреляции ГК3 с рядами среднезимних АТПО в северо-западном (ЗТ) и юго-западном (4Т) районах северной части Тихого океана (табл. 3, рис. 2).

С ГК3 связаны шесть запасов тресковых рыб, четыре из которых обитают в водах у юго-восточного побережья Камчатки и с океанической стороны Курильских островов, один — в Карагинском заливе и один — в районе Алеутских островов (рис. 5 а). Временные ряды численности пополнения всех запасов из северо-западной части океана отрицательно коррелируют с ГК3 (как и индекс ЗТ), а запас алеутской трески на северо-востоке региона — положительно. Вероятно, что уровень пополнения северо-западных запасов меняется в одной фазе с ЗТ, т. е. он выше в периоды положительной фазы ЗТ, когда на северо-западе океана формируются отрицательные АТПО.

Во временном ходе ГК3 четко выделяются два периода: положительных значений в 1994—1998 гг. и преимущественно отрицательных значений в 1999—2020 гг., причем снижение значений ГК3 значительно усилилось с 2016 г. (рис. 5 з).

ГК4 (9,41 %) обнаруживает наиболее тесную (отрицательную) связь с вариациями зимних АТПО в центральном районе (район 2Т, рис. 2, рис. 6 в) северной части Тихого океана ($r = -0,73$, $p < 0,01$) (табл. 3). Несколько более низкие (положительные) корреляции отмечаются для взаимосвязанных между собой индексов ТДО и тихоокеанско/североамериканской ДС в атмосфере. При этом в поле корреляций между ГК4 и полем аномалий геопотенциальных высот поверхности 500 гПа хорошо выражен Алеутский минимум атмосферного давления, который способствует потеплению поверхностных вод в юго-восточной части Берингова моря и их похолоданию на северо-западе исследуемой акватории (рис. 6 б).

С ГК4 связаны изменения пополнения трех запасов: олюторско-карагинской, северокурильской и алеутской трески (рис. 6 а). Пополнение первого запаса выше при отрицательных АТПО в центральной части океана, а у двух других — ниже.

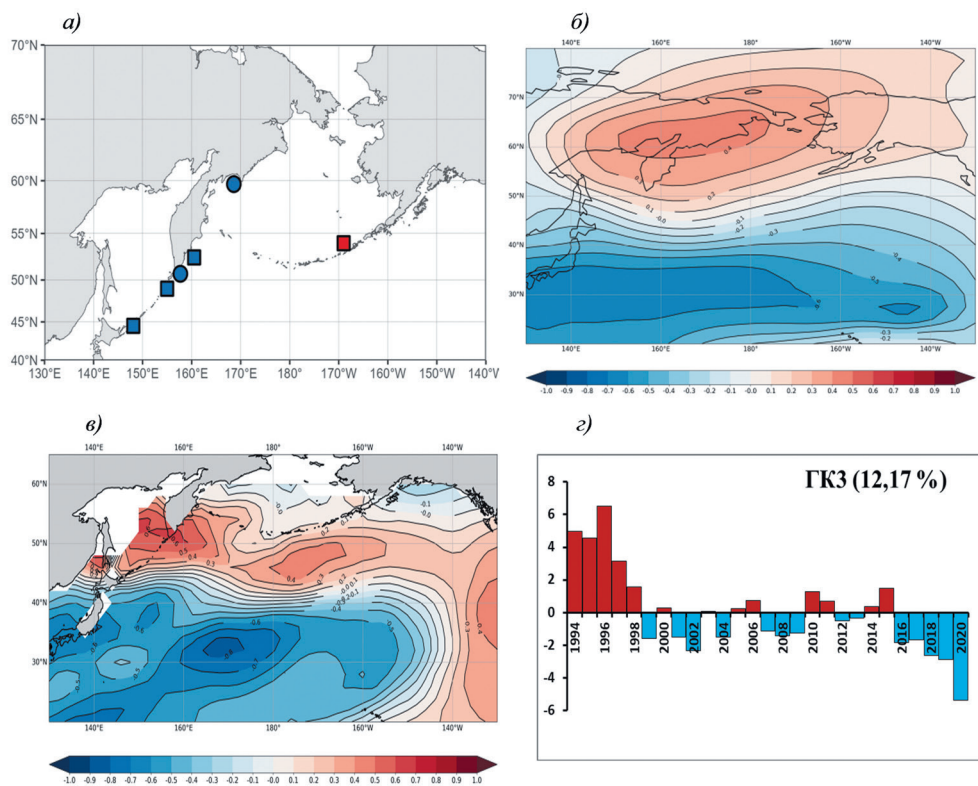


Рис. 5. Запасы тресковых рыб, связанные с ГКЗ (а), распределение коэффициентов корреляции между ГКЗ и полями средних зимних аномалий геопотенциальных высот поверхности 500 гПа (б) и ТПО (в) в северной части Тихого океана, временной ход ГКЗ (г).

Fig. 5. Gadid stocks associated with PC3 (a), correlation patterns of PC3 with fields of mean winter anomalies of H500 (b) and SST (c) in the North Pacific, time series of PC3 (d).

Многолетние изменения ГК4 демонстрируют чередование периодов с преобладанием ее отрицательных значений в 1994—2000 гг., положительных — в 2001—2016 гг. и вновь отрицательных — 2017—2020 гг. (рис. 6 г).

ГК5 (6,96 %) характеризуется относительно невысокой ($r = -0,49$) статистической связью с средними зимними АТПО в районе ЗТ, в состав которого входит вся акватория Охотского моря (рис. 2). С этой компонентой связан всего лишь один запас западнокамчатской наваги, причем связь колебаний численности его пополнения с ГК5, в отличие от АТПО в районе ЗТ, положительная (рис. 7 а). Таким образом, численность пополнения этой группировки наваги меняется в противофазе с зимними АТПО в восточной части Охотского моря.

Временной ход ГК5 характеризуется чередование периодов положительных и отрицательных значений продолжительностью 3—5 лет (рис. 7 б).

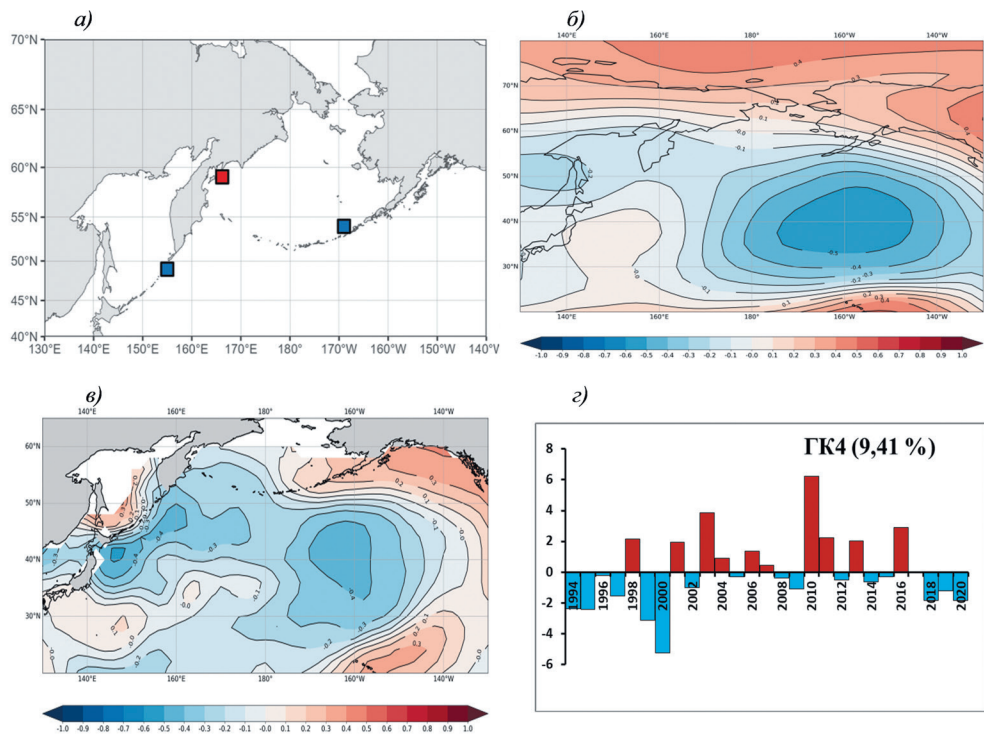


Рис. 6. Запасы тресковых рыб, связанные с ГК4 (а), распределение коэффициентов корреляции между ГК4 и полями средних зимних аномалий геопотенциальных высот поверхности 500 гПа (б) и ТПО (в) в северной части Тихого океана и временной ход ГК4 (г).

Fig. 6. Gadid stocks associated with PC4 (a), correlation patterns of PC4 with fields of mean winter anomalies of H500 (b) and SST (c) in the North Pacific, time series of PC4 (d).

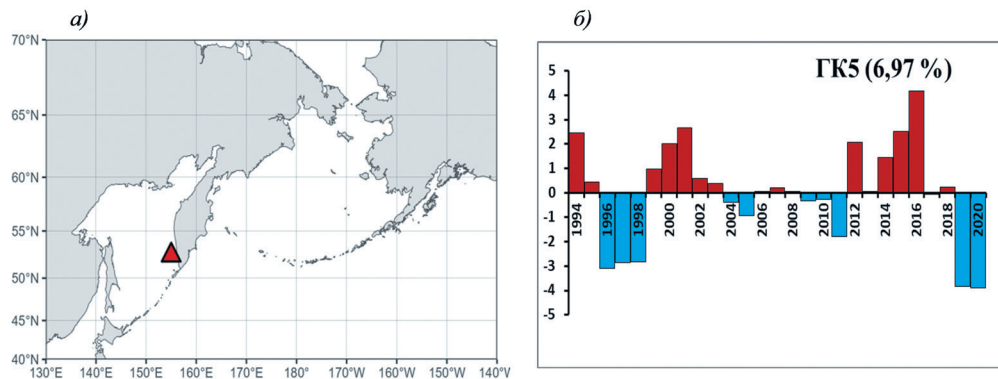


Рис. 7. Запас тресковых рыб северной части Тихого океана, связанный с ГК5 (а); временной ход ГК5 (б).

Fig. 7. Gadid stock associated with PC5 (a); time series of PC5 (b).

Заключение

Выполнен анализ влияния крупномасштабных климатических факторов на динамику численности пополнения 19 запасов минтая, тихоокеанской трески и наваги. Показано, что синхронное влияние одного (ТДО, ЗТ) или группы взаимосвязанных (ДС «атмосфера—океан») крупномасштабных климатических факторов обуславливает наличие как трансстихоокеанских статистических связей в колебаниях численности пополнения между северо-западными и северо-восточными запасами тресковых рыб, так и региональных (локальных) связей у близко живущих популяций.

Статистически значимые связи, как правило, одного знака, обнаруживаются между близко расположенными запасами, а противоположного знака — между удаленными запасами тресковых рыб. В северотихоокеанском регионе эти связи обусловлены северным центром западнотихоокеанской ветви дальних связей, который, вероятно, и обуславливает противофазность в изменениях численности пополнения северо-западных запасов трески и минтая с одной стороны и алеутской трески с другой.

Выявленные локальные связи могут частично объясняться и биологическими причинами, в частности, отсутствием полной репродуктивной изоляции запасов одного вида с обширным переносом личинок между нерестилищами смежных районов и миграциями созревающих особей.

Результаты работы позволили расширить представление об общих закономерностях многолетней изменчивости пополнения запасов тресковых рыб как научной основы для прогнозирования долгосрочной динамики их состояния и численности.

Список литературы

1. Антонов Н. П., Кловач Н. В., Орлов А. М. и др. Рыболовство в Дальневосточном рыбохозяйственном бассейне в 2013 г. // Труды ВНИРО. 2016. Т. 160. С. 133—211.
2. Антонов Н. П., Датский А. В. Использование сырьевой базы морских рыб в Дальневосточном рыбохозяйственном бассейне в 2018 г. // Рыбное хозяйство. 2019. № 3. С. 66—76.
3. Датский А. В. Тресковые рыбы российских вод Берингова моря: запасы и перспективы промысла / II Международная научно-практическая конференция ФГБНУ «ВНИРО» «Рыбохозяйственный комплекс России: 300 лет российской академической науке (26—27 марта 2024 г.)». М.: Изд-во ВНИРО. 2024. С. 110—118.
4. Датский А. В., Кулик В. В., Датская С. А. Динамика обилия массовых промысловых рыб дальневосточных морей и прилегающих районов открытой части Тихого океана и влияющие на неё факторы // Труды ВНИРО. 2021. Т. 186. С. 31—77. DOI/10.36038/2307-3497-2021-186-31-77.
5. Датский А. В., Шейбак А. Ю., Антонов Н. П. Минтай Берингова моря: особенности распределения и биологии, запасы, промысел // Труды ВНИРО. 2022. Т. 189. С. 73—94. DOI: 10.36038/2307-3497-2022-189-73-94.
6. PSL – Physical Sciences Laboratory. URL: <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/> (дата обращения: 11.08.2025 г.).
7. Малинин В. Н., Чернышков П. П., Гордеева С. М. Канарский апвеллинг: крупномасштабная изменчивость и прогноз температуры воды. СПб: Гидрометеиздат. 2002. 156 с.
8. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Промысловая океанология юго-восточной части Тихого океана. Том I. Изменчивость факторов среды обитания. СПб: РГГМУ. 2009. 278 с.

9. Ward J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. // J. Am. Stat. Assoc. 1963. V. 58. P. 236—244.
10. Кровнин А. С. Роль крупномасштабных климатических факторов Северного полушария в многолетних колебаниях запасов основных объектов российского промысла / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. Москва. ФГБНУ ВНИРО. 2020. 26 с.
11. Schulzweida Uwe. CDO User Guide (2.1.0). Zenodo. 2022. DOI:10.5281/zenodo.7112925.
12. Di Lorenzo E., Schneider N., Cobb K. M. et al. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change. // Geophys. Res. Lett. 2008. V.35. L08607. DOI:10.1029/2007GL032838.
13. Mantua J. N., Hare S. R., Zhang Y. et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impact on salmon production // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1997. V. 78. P. 1069—1079. DOI:10.1175/1520-0477(1997)078<1069: APICOW>2.0.CO;2.
14. Barnston A. C., Livezey R. E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Mon. Weather Rev. 1987. V.115. P. 1083—1126.

References

1. Antonov N. P., Klovatch N. V., Orlov A. M., et al. Fishing in the Russian Far East fishery basin in 2013. *Trudy VNIRO = Proceedings of VNIRO*. 2016; 160: (133—211) (in Russ.).
2. Antonov N. P., Datsky A. V. Exploitation of marine fish resource in the Far Eastern fishery basin in 2018. *Rybnoe khozyaistvo = Fisheries*. 2019; 3: (66—76) (in Russ.).
3. Datsky A. V. Codfish of the Russian waters of the Bering Sea: stocks and prospects of fishery. II Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya FGBNU «VNIRO» «Rybnokhozyaystvennyi kompleks Rossii: 300 let rossiyskoi akademicheskoi nauke (26-27 marta 2024) = II International Scientific and Practical Conference of the Federal State Budgetary Scientific Institution VNIRO “Fisheries Complex of Russia: 300 years of Russian academic science (March 26—27, 2024)”. Moscow: VNIRO. 2024: 110—118 (in Russ.).
4. Datsky A. V., Kulik V. V., Datskaya S. A. The dynamics of the abundance of commercial fish in the Far Eastern seas and adjacent areas of the open part of the Pacific Ocean and factors influencing it. *Trudy VNIRO = Proceedings of VNIRO*. 2021; 186: (31—77). (in Russ.). DOI/10.36038/2307-3497-2021-186-31-77.
5. Datsky A. V., Sheybak A. Yu., Antonov N. P. Walleye pollock of the Bering Sea: features of distribution and biology, stocks, fishery. *Trudy VNIRO = Proceedings of VNIRO*. 2022; 189: (73—94). (in Russ.). DOI: 10.36038/2307-3497-2022-189-73-94.
6. PSL – Physical Sciences Laboratory. URL: <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/> (date of access: 11.08.2025).
7. Malinin V. N., Chernyshkov P. P., Gordeeva S. M. *Kanarskiy apvellings: krupnomasshtabnaya izmenchivost' i prognoz temperatury vody. = Canary Islands Upwelling: Large-Scale Water Temperature Variability and Forecast*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat. 2002: 156 p. (In Russ.).
8. Malinin V. N., Gordeeva S. M. *Promyslovaya okeanologiya yugo-vostochnoy chasti Tikhogo okeana. Tom I. Izmenchivost' faktorov sredy obitaniya = Fishery oceanology of south-east Pacific. Volume 1. Variability of habitat factors*. St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University. 2009: 278 p. (In Russ.).
9. Ward J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. Am. Stat. Assoc.* 1963; 58: 236—244.
10. Krovnin A. S. Role of large-scale climatic factors of the Northern hemisphere in long-term variations of main commercial fish stocks of the Russian fishery. *Avtoferat dissertatsii na soiskanie uchyonoi stepeni kandidata geographicheskikh nauk = Synopsis of the thesis prepared by candidate of Earth sciences*. Moscow: VNIRO. 2020: 26 p. (In Russ.).
11. Schulzweida Uwe. CDO User Guide (2.1.0). Zenodo. 2022. DOI:10.5281/zenodo.7112925.
12. Di Lorenzo E., Schneider N., Cobb K. M. et al. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change. *Geophys. Res. Lett.* 2008; 35. L08607. DOI:10.1029/2007GL032838.
13. Mantua J. N., Hare S. R., Zhang Y. et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impact on salmon production. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1997; 78: (1069—1079).

14. Barnston A. C., Livezey R. E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Weather Rev.* 1987; 115: (1083—1126).

Сведения об авторах

Кровнин Андрей Сергеевич, доктор географических наук, старший научный сотрудник, начальник Отдела динамики климата и водных экосистем Государственного научного центра РФ ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», akrovnin@vniro.ru.

Мельников Сергей Петрович, доктор биологических наук, начальник Отдела многостороннего международного сотрудничества Государственного научного центра РФ ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», melnikov@vniro.ru.

Датский Андрей Валерьевич, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела морских рыб Дальнего Востока Государственного научного центра РФ ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», adatsky@vniro.ru.

Мурый Георгий Петрович, ведущий специалист Отдела динамики климата и водных экосистем Государственного научного центра РФ ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», moury@vniro.ru.

Information about authors

Krovnin Andrei Sergeevich, doctor (Geogr. Sci.), senior scientist/Head of Division of climate dynamics and aquatic ecosystems, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography.

Melnikov Sergei Petrovich, doctor (Biol. Sci.), Head of Division of multi-lateral international cooperation, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography.

Datsky Andrey Valerievich, PhD (Biol. Sci.), lead scientist, Division of Marine Fish of the Far East, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography.

Moury Georgy Petrovich, lead specialist of Division of climate dynamics and aquatic ecosystems, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 19.04.2026

Принята к печати после доработки 27.08.2026

The article was received on 19.04.2026

The article was accepted after revision on 27.08.2026

Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 488—497.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(84):488—497.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 574.1:639.21(285.212)

doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-488-497

Оценка динамики разнообразия рыбных запасов озера Ильмень

***Григорий Тевелевич Фрумин¹, Елена Сергеевна Васильева²,
Наталья Львовна Болотова³***

¹ Российский государственный педагогический университет имени А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия, gfrumin@mail.ru

² Новгородский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (НовгородНИРО), Великий Новгород, Россия

³ Вологодский государственный университет, Вологда, Россия

Аннотация. В статье обсуждается актуальная проблема оценки динамики биологического разнообразия на примере промысловых рыбных запасов озера Ильмень. Изменение структуры рыбной части озерного сообщества прослежено на материалах ихтиологических исследований и данных рыбопромысловой статистики за период с 1975 г. по 2024 г. Целью данного исследования являлся сравнительный анализ информативности разных индексов биоразнообразия рыбных запасов озера Ильмень. Для расчетов использованы следующие индексы: индекс Шеннона (H), индекс Шелдона (SH), индекс Пиелу (E), индекс доминирования Симпсона (C) и индекс разнообразия Симпсона (D). Установлено, что наиболее информативным индексом для оценки разнообразия рыбных запасов в озере Ильмень является индекс Пиелу.

Ключевые слова: озеро Ильмень, рыбные запасы, индексы разнообразия.

Для цитирования: Фрумин Г. Т., Васильева Е. С., Болотова Н. Л. Оценка динамики разнообразия рыбных запасов озера Ильмень // Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 488—497. doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-488-497.

Original article

Assessment of the dynamics of diversity of fish population of lake Ilmen

Grigory T. Frumin¹, Elena S. Vasilyeva², Natalia L. Bolotova³

¹ Herzen State Pedagogical University of Russia

² Novgorod branch of the All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography (NovgorodNIRO)

³ Vologda State University

Summary. Lake Ilmen is a large fishery reservoir. The main morphometric indicators of Lake Ilmen are presented. This article discusses the pressing issue of assessing biodiversity dynamics using the commercial fish population of Lake Ilmen as an example. Changes in the structure of the lake's fish community are traced using ichthyological studies and fishery statistics for the period 1975—2024. For the mathematical and statistical analysis, the primary dataset on commercial fish catches was divided into five-year periods. Despite the selectivity of the fishery, the catch structure in long-term observation series adequately reflects the dynamics of the fish population and changes in its species diversity, represented by the composition of catches and the ratio of biomasses of different fish species. However, the reliability of assessing the trend of diversity decline remains controversial when using various biodiversity indices. The aim of this study was to comparatively analyze the information content of various biodiversity indices for the fish population of Lake Ilmen. This article presents the results of calculating five indices of fish population diversity in Lake Ilmen for the period 1975—2024. The following indices were used in the calculations: the Shannon index (H), the Sheldon index (SH), the Pielou index (E), the Simpson dominance index (C), and the Simpson diversity index (D). Regression equations were constructed between the indices and fishing seasons, and their statistical characteristics were determined. The Pielou index was found to be the most informative index for assessing fish population diversity in Lake Ilmen.

Keywords: Lake Ilmen, fish population, diversity indices.

For citation: Frumin G. T., Vasilyeva E. S., Bolotova N. L. Assessment of the dynamics of diversity of fish population of lake Ilmen. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(84):(488—497). doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-488-497. (In Russ.).

Введение

Актуальность проблемы сохранения и оценки биоразнообразия рассмотрена во многих публикациях [1—5]. Для выявления состояния водных экосистем в условиях хронического антропогенного пресса адекватным показателем служит изменение биоразнообразия рыбных запасов как верхнего трофического уровня. Изменение рыбной части сообщества наглядно выражено в мелководных озерах, характеризующихся быстрым ухудшением качества воды, высокой прогреваемостью на фоне потепления климата и для которых сильное воздействие промысла связано с возможностью облова всей акватории [6]. К таким озерам относится крупный рыбохозяйственный водоем — озеро Ильмень в Новгородской области.

Озеро Ильмень расположено в центре обширной Приильменской низины с координатами 58°16' с.ш., 31°17' в.д. Это мелководное озеро с плоским дном, сложенным 9—10 метровой толщей ила (табл. 1) [7].

Основные морфометрические показатели озера Ильмень

Main morphometric parameters of Lake Ilmen

Показатели	Значение
Высота над уровнем моря, м	20
Площадь зеркала, км ²	1090—1200
Объем водной массы, км ³	2,9—3,5
Средняя глубина, м	2
Максимальная глубина, м	4
Время водообмена, лет	0,25
Площадь водосбора, км ²	67200

Среди рыбопромысловых водоемов Северо-Запада озеро Ильмень отличается высокой продуктивностью. Так, в 1970—1980 гг. вылов достигал до 3,0—3,5 тыс. т рыбы (25—30 кг/га), а в настоящее время объемы промышленной рыбодобычи уловы составляют до 2 тыс. т [8]. Среди благоприятных условий для формирования ихтиофауны озера Ильмень можно выделить его выгодное географическое положение и гидрологическую сеть, обеспечившую связь с Ладожским озером, а также лимнологические особенности, связанные с обширной поймой и разнообразием биотопов. Ядро ихтиофауны формируют представители понтокаспийского фаунистического комплекса (лещ, судак, чехонь, синец и др.), а также присутствуют холодолюбивые представители бореального комплекса (снеток, налим). Здесь обитают как реофильные виды (жерех, язь, сырть), так и представители малопроточных вод (линь, карась). Наблюдаемые сдвиги в структуре рыбных запасов озер происходят под влиянием изменения условий обитания и воспроизводства вследствие процессов эвтрофирования, загрязнения и потепления климата [8, 9].

К настоящему времени предложено более 40 индексов, предназначенных для оценки биоразнообразия. В [4] отмечаются трудности в применении показателей разнообразия, в частности связанные с отсутствием объективной шкалы отсчета разнообразия наряду с субъективным характером выбора индексов для исследований, поэтому неоднозначным вопросом остается достоверность оценки изменения разнообразия рыбной части сообщества при применении разных индексов биоразнообразия.

Исходя из вышеизложенного, целью данной работы являлся сравнительный анализ применения разных индексов биоразнообразия для оценки динамики разнообразия рыбных запасов озера Ильмень по данным рыбопромысловой статистики за пятидесятилетний период.

Методика исследования

В работе использована информация из опубликованных источников, фондов Новгородского филиала ФГБНУ «ВНИРО», а также материалы официальной рыбопромысловой статистики Северо-Западного территориального управления Росрыболовства за период с 1975 г. по 2024 г. Обработка материалов выполнена с использованием программы Excel.

Для математико-статистического анализа изменения состава уловов рыб массив первичных данных рыбопромысловой статистики за период с 1975 г. по 2024 г. был разделен на пятилетние периоды (табл. 2).

Таблица 2

Периодизация статистики рыбодобычи в озере Ильмень
Periodization of fishing statistics in Lake Ilmen

Период (τ)	Годы	Период (τ)	Годы
1	1975—1979	6	2000—2004
2	1980—1984	7	2005—2009
3	1985—1989	8	2010—2014
4	1990—1994	9	2015—2019
5	1995—1999	10	2020—2024

Для количественной оценки изменения разнообразия рыбных запасов озера Ильмень по каждому пятилетнему периоду показателей рыбодобычи использованы пять следующих индексов биоразнообразия: индекс Шеннона (H), индекс Пиелу (E), индекс Шелдона (SH), индексы Симпсона: индекс доминирования (C) и индекс разнообразия (D) [10] (табл. 3).

Таблица 3

Индексы биоразнообразия,
использованные для оценки разнообразия рыбных запасов озера Ильмень
Biodiversity indices used to assess the diversity of the fish population of Lake Ilmen

Индекс	Формула
Шеннона (H)	$H = -\sum p_i \log_2 p_i$, p_i — доля вида
Шелдона (SH)	$SH = \exp(H)$
Пиелу (E)	$E = H / \log_2 S$, S — число видов
Симпсона (доминирования) (C)	$C = \sum p_i^2$
Симпсона (разнообразия) (D)	$D = 1/C$

Расчет индексов биоразнообразия базировался на предварительной оценке величин доли вылова каждого вида рыб — p_i (табл. 4).

Таблица 4

Соотношение биомассы разных видов рыб в уловах озера Ильмень
за пятилетние периоды с 1975 г. по 2024 г.
The ratio of biomass of different fish species in catches of Lake Ilmen
for 5-year periods from 1975 to 2024

Период	Судак	Щука	Лещ	Густера	Синец	Чехонь	Окунь	Плотва	Снеток	Прочие
1	0,027	0,075	0,279	0,003	0,170	0,040	0,004	0,061	0,181	0,160
2	0,042	0,133	0,340	0,000	0,438	0,009	0,000	0,023	0,015	0,000
3	0,053	0,124	0,320	0,005	0,249	0,026	0,014	0,086	0,016	0,107
4	0,041	0,123	0,343	0,020	0,313	0,002	0,021	0,065	0,071	0,001

Окончание табл. 4

Период	Судак	Щука	Лещ	Густера	Синец	Чехонь	Окунь	Плотва	Снеток	Прочие
5	0,040	0,079	0,328	0,036	0,295	0,001	0,046	0,100	0,072	0,001
6	0,052	0,069	0,270	0,055	0,320	0,033	0,041	0,082	0,041	0,038
7	0,080	0,075	0,275	0,056	0,273	0,052	0,037	0,071	0,040	0,041
8	0,049	0,081	0,233	0,092	0,284	0,040	0,059	0,104	0,004	0,054
9	0,030	0,082	0,261	0,105	0,288	0,058	0,058	0,094	0,003	0,023
10	0,035	0,094	0,252	0,120	0,254	0,067	0,066	0,075	0,021	0,017

Результаты исследований

Для сравнительного анализа динамики видового разнообразия рыбных запасов озера Ильмень были проведены расчеты с использованием пяти индексов, применяемых в оценке биоразнообразия сообществ экосистем (табл. 5).

Таблица 5

Показатели изменения разнообразия рыбных запасов озера Ильмень
Indicators of change in the diversity of the fish population of Lake Ilmen

Годы	Индексы разнообразия				
	<i>H</i>	<i>SH</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
1975—1979	2,73	15,33	0,18	5,65	0,82
1980—1984	1,91	6,75	0,33	3,05	0,68
1985—1989	2,63	13,87	0,20	4,94	0,79
1990—1994	2,40	11,02	0,24	4,12	0,72
1995—1999	2,53	12,55	0,22	4,51	0,76
2000—2004	2,77	15,96	0,20	5,05	0,83
2005—2009	2,87	17,64	0,18	5,63	0,86
2010—2014	2,85	17,29	0,17	5,84	0,86
2015—2019	2,76	15,80	0,19	5,40	0,83
2020—2024	2,88	17,81	0,17	5,98	0,87

Для выбора наиболее информативного индекса биоразнообразия, отражающего тренд изменения видового разнообразия рыбных запасов озера Ильмень, были построены регрессионные уравнения между индексами и периодами рыбодобычи, а также определены их статистические характеристики (табл. 6).

Таблица 6

Регрессионные уравнения и статистические характеристики индексов биоразнообразия, отражающие изменения разнообразия рыбных запасов озера Ильмень

Regression equations and statistical characteristics of biodiversity indices reflecting changes in the diversity of the fish population of Lake Ilmen

Регрессионные уравнения	Статистические показатели				
	<i>n</i>	σ	<i>r</i>	<i>Fp</i>	<i>Fp/F_r</i>
$H = 2,30 + 0,061 \cdot \tau$	10	0,25	0,62	5,0	0,9
$SH = 10,20 + 0,76 \cdot \tau$	10	2,77	0,66	6,3	1,2

Регрессионные уравнения	Статистические показатели				
	n	σ	r	Fp	Fp/F_T
$C = 0,26 + 0,009 \cdot \tau$	10	0,04	0,54	3,3	0,6
$D = 4,05 + 0,18 \cdot \tau$	10	0,78	0,58	4,1	0,8
$E = 0,72 + 0,01 \cdot \tau$	10	0,05	0,67	6,6	1,3

Примечание: τ — период, n — количество периодов, σ — стандартная ошибка, r — коэффициент корреляции, Fp — расчетное значение критерия Фишера, F_T — табличное значение критерия Фишера при уровне значимости 0,05 %.

Наилучшее уравнение должно иметь наибольшее значение расчетного критерия Фишера и наибольший коэффициент детерминации. Сформулированным условиям в наибольшей степени соответствует индекс Пиелу. Индекс выравненности Пиелу (E) указывает, насколько равномерно распределена относительная численность особей в сообществе рыб при определённом количестве видов.

В публикации по сравнительному анализу ихтиофауны притоков в озеро указано низкое значения индекса Пиелу (0,5) на основании исследовательских уловов в 2020—2021 гг. в озере Ильмень за счет резкого преобладания массовых лимнофильных видов — плотвы и окуня [9]. В этом озере за период с 1975 г. по 2024 г. индекс Пиелу варьировался в интервале 0,70—0,87. Низкие значения показателя свидетельствуют о дисбалансе, который демонстрирует резкие отличия в численности видов. Зафиксирован положительный тренд индекса Пиелу за пятидесятилетний период по данным уловов (рис. 1). Очевидно, это связано с изменением организации промысла, что детально проанализировано в обзоре по истории промышленного рыболовства на озере Ильмень [11].

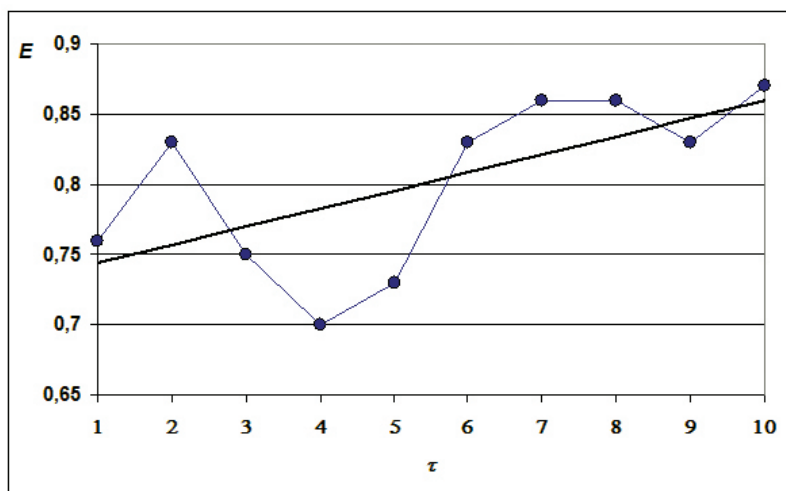


Рис. 1. Динамика индекса биоразнообразия Пиелу рыбных запасов озера Ильмень.

Fig 1. Dynamics of the Pielu biodiversity index of the fish population of Lake Ilmen.

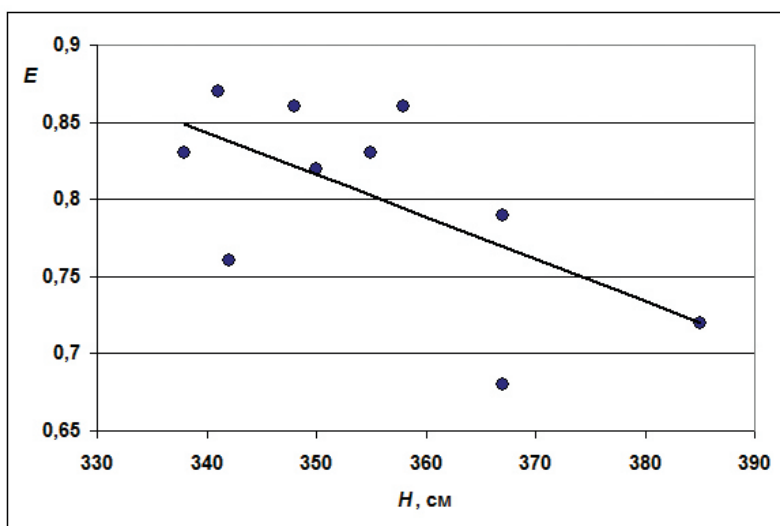


Рис. 2. Соотношение между индексами Пиелу и уровнями воды (H) в озере Ильмень.

Fig 2. The relationship between the Pielu indices and water levels in Lake Ilmen.

Низкое значение индекса Пиелу, свидетельствующее о сильном доминировании одних видов над другими, может характеризовать больший уровень адаптационных возможностей некоторых видов к условиям природных и техногенных воздействий (рис. 2).

Линия регрессии, приведенная на рис. 2, описывается следующим уравнением:

$$E = 1,77 + 0,0027 \cdot H \quad (1)$$

$$n = 10 \quad r = 0,63 \quad r^2 = 0,39 \quad \sigma = 0,05 \quad F_p = 5,18 \quad F_T = 5,12 \quad F_p/F_T = 1,01$$

Согласно шкале Чеддока [13] теснота связи между индексами Пиелу и уровнями воды в озере Ильмень характеризуется как «заметная» ($r = 0,63$). Озеро отличается уровнем режимом от других крупных озер России. Для него свойственна большая амплитуда колебаний, которая достигает 650—747 см, среднемноголетняя — 314 см. Эти изменения площади и объема водной массы определяют условия нереста и нагула молоди рыб и играют важную роль в динамике их численности [10].

Существенные колебания уровня воды отражаются на ведении промысла. Его эффективность возрастает при понижении уровня воды, что соответственно увеличивает концентрации рыбы на единицу площади, а при высоком уровне — снижается. Для мелководных озер, к которым относится Ильмень, приоритетным фактором изменения рыбной части сообщества служит эвтрофирование. Одним из основных показателей продвинутого процесса эвтрофирования является увеличение содержания в воде фосфора, поэтому была исследована связь индексов разнообразия и концентрации фосфора общего по имеющимся данным за период с 2000 г. по 2024 г. (табл. 7).

Таблица 7

Концентрации фосфора общего и индексы Пиелу в озере Ильмень

Total phosphorus concentrations and Pielu indices in Lake Ilmen

Годы	2000—2004	2005—2009	2010—2014	2015—2019	2020—2024
Фосфор общий, $P_{\text{общ}}$, мкг/дм ³	64	69	63	60	77
Индекс Пиелу	0,83	0,86	0,86	0,83	0,87

Зависимость индексов Пиелу от концентраций фосфора общего выражается следующим уравнением:

$$E = 0,707 + 0,002P_{\text{общ}} \quad (2)$$

$$n = 5 \quad r = 0,76 \quad r^2 = 0,58 \quad \sigma = 0,01 \quad F_p = 4,18 \quad F_T = 7,71 \quad F_p/F_T = 0,54$$

Поскольку $r = 0,76$, теснота связи между E и $P_{\text{общ}}$ характеризуется как «высокая».

В период с 2000 г. по 2024 г. в воде озера отмечались высокие концентрации фосфора общего (средняя величина 67 мкг/дм³), что по принятым критериям характеризует трофический статус водоема как эвтрофный [12]. Известным следствием эвтрофирования являются изменения рыбных запасов водоемов, включая уменьшение численности, затем исчезновение наиболее требовательных к качеству воды видов рыб, а также снижение рыбопродуктивности водоема или отдельных его зон, переход водоема из одного рыбохозяйственного типа в другой.

Рассчитанный коэффициент корреляции между индексами Пиелу и температурами воды озера Ильмень за период с 2000 г. по 2024 г. (по пятилеткам) равен 0,61. Это значение характеризует тесноту связи между указанными переменными как «заметное» [13].

Заключение

Впервые для озера Ильмень проведена оценка динамики разнообразия рыбных запасов по многолетним рядам рыбопромысловой статистики за пятидесятилетний период (1975—2024 гг.). Для количественной оценки биоразнообразия использованы пять следующих индексов: индекс Шеннона (H), индекс Пиелу (E), индекс Шелдона (SH), индекс Симпсона — индекс доминирования (C) и индекс Симпсона — индекс разнообразия (D). Установлено, что наиболее информативным индексом для оценки биоразнообразия в озере Ильмень является индекс Пиелу. Индекс выравнивания Пиелу (E) показывает, насколько равномерно распределена относительная численность особей в сообществе рыб при определённом количестве видов. Низкие значения показателя индекса Пиелу (0,68—0,87) свидетельствуют о дисбалансе, отражающем резкие отличия численности видов, увеличение доминирования и упрощение рыбной части сообщества. Теснота связи между индексами Пиелу и уровнями воды в озере Ильмень характеризуется как «заметная» (коэффициент корреляции $r = 0,63$). Средняя концентрация фосфора общего (растворенного) в воде за период с 2000 г. по 2024 г. увеличилась от 64 до 77 мкг/дм³, что характеризует трофический статус озера в настоящее время как эвтрофный. Таким образом, основными факторами, определяющими динамику

разнообразие рыбных запасов в озере Ильмень, являются специфика уровня режима и ускорение процессов эвтрофирования.

Список литературы

1. Бродский А. К. Биоразнообразие: структура, проблемы и перспективы сохранения // Аспекты биоразнообразия: Сборник трудов Зоологического музея МГУ им. М. В. Ломоносова. Т. 54(1). М.: Товарищество научных изданий КМК. 2016. С. 380—396.
2. Захаров В. М., Трофимов И. Е. Оценка состояния биоразнообразия: исследование стабильности развития. М.: Товарищество научных изданий КМК. 2019. 160 с.
3. Шайхутдинова А. А. Методы оценки биоразнообразия: методические указания. Оренбург: ОГУ, 2019. 37 с.
4. Шитиков В. К., Розенберг Г. С. Оценка биоразнообразия: попытка формального обобщения // Количественные методы экологии и гидробиологии. Тольятти: СамНЦ РАН, 2005. С. 91—129.
5. Песенко Ю. А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. 288 с.
6. Болотова Н. Л., Степанов М. В., Фрумин Г. Т., Болотов О. В. Динамика рыбного населения крупных озер Вологодской области. / Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Материалы V Международной научной конференции. Минск: Издательский центр БГУ, 2016. С. 283—284.
7. Румянцев В. А., Драбкова В. Г., Измайлова А. В. Озера европейской части России. СПб.: ЛЕМА, 2015. 392 с.
8. Васильева Е. С., Бондарь Р. А. Промышленное рыболовство на озере Ильмень Новгородской области: динамика уловов в XX веке и современное состояние промысла // Вопросы рыболовства. 2024. Том 25. №3. С. 37—54. <https://doi.org/10.36038/0234-2774-2024-25-3-37-54>.
9. Фрумин Г. Т., Михалап С. Г. Оценка динамики разнообразия рыбного населения Псковского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 2. С. 91—100. doi: 10.17076/lim2058.
10. Быков А. Д., Тыркин И. А., Образов В. В., Бондарь Р. А. Оценка состояния ихтиофауны нижнего течения рек и пойменных водоемов бассейна озера Ильмень по данным учета мелкочешуйстыми орудиями лова в 2020—2021 годах // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 8. С. 73—87. doi: 10.17076/eco1601.
11. Озеро Ильмень / Природные ресурсы больших озёр СССР и вероятные их изменения. Кириллова В. А. Ленинград. 1984. С. 81—104.
12. OECD. Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control, OECD, Paris, 1982: 154 p.
13. Макарова Н.В., Трофимец В.Я. Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.

References

1. Brodsky A. K. Biodiversity: structure, problems and conservation prospects. *Aspekty bioraznoobraziya: Sbornik trudov Zoologicheskogo muzeya MGU im. M. V. Lomonosova = Aspects of biodiversity: Collection of works of the Zoological Museum of Moscow State University. M. V. Lomonosov*. Vol. 54(1). Moscow: KMK Scientific Publications Partnership. 2016: 380—396. (In Russ.).
2. Zakharov V. M., Trofimov I. E. Assessment of the state of biodiversity: a study of development stability. *M.: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK = Moscow: KMK Scientific Publications Partnership*. 2019: 160 p. (In Russ.).
3. Shaikhutdinova A. A. *Metody otsenki bioraznoobraziya: metodicheskiye ukazaniya = Methods of biodiversity assessment: guidelines*. Orenburg: OSU. 2019: 37 p.
4. Shitikov V. K., Rosenberg G. S. *Otsenka bioraznoobraziya: popytka formal'nogo obobshcheniya. Kolichestvennyye metody ekologii i gidrobiologii Biodiversity assessment: an attempt at formal generalization = Quantitative methods of ecology and hydrobiology*. Tolyatti: Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2005; (91—129). (In Russ.).
5. Pesenko Yu. A. *Printsipy i metody kolichestvennogo analiza v faunisticheskikh issledovaniyakh = Principles and methods of quantitative analysis in faunistic studies*. Moscow: Nauka. 1982: 288 p. (In Russ.).

6. Bolotova N. L., Stepanov M. V., Frumin G. T., Bolotov O. V. Dynamics of fish population of large lakes of the Vologda region. Lake ecosystems: biological processes, anthropogenic transformation, water quality. *Materialy V Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii = Proceedings of the V International Scientific Conference*. Minsk: Publishing Center of BSU, 2016; (283—284). (In Russ.).
7. Rumyantsev V. A., Drabkova V. G., Izmailova A. V. *Ozera yevropeyskoy chasti Rossii = Lakes of the European part of Russia*. St. Petersburg: LEMA. 2015: 92 p. (In Russ.).
8. Vasilyeva E. S., Bondar R. A. Industrial fisheries on Lake Ilmen in the Novgorod region: catch dynamics in the 20th century and the current state of the fishery. *Voprosy rybolovstva = Questions of Fisheries*. 2024; 5(3): (37—54). <https://doi.org/10.36038/0234-2774-2024-25-3-37-54>. (In Russ.).
9. Frumin G. T., Mikhlap S. G. Assessment of the dynamics of diversity of the fish population of Lake Pskov. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2025; (2): (91—100). doi: 10.17076/lim2058. (In Russ.).
10. Bykov A. D., Tyrkin I. A., Obrazov V. V., Bondar R. A. Assessment of the state of the ichthyofauna of the lower reaches of rivers and floodplain water bodies of the Lake Ilmen basin based on small-mesh fishing gear surveys in 2020—2021. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences*. 2022; (8): (73—87). doi: 10.17076/ecol601. (In Russ.).
11. Kirillova V. A. *Ozero Il'men'. Prirodnyye resursy bol'shikh ozor SSSR i veroyatnyye ikh izmeneniya = Lake Ilmen. Natural resources of large lakes of the USSR and their probable changes*. Leningrad. 1984; (81—104). (In Russ.).
12. OECD. Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. OECD. Paris, 1982: 154 p.
13. Makarova N. V., Trofimets V. Ya. *Statistika v Exel = Statistics in Excel*. Moscow: Finance and Statistics. 2002: 368 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Фрумин Григорий Тевелевич, доктор химических наук, профессор, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории факультета географии Российского государственного педагогического университета имени А.И. Герцена, gfrumin@mail.ru.

Васильева Елена Сергеевна, руководитель Новгородского филиала ФГНУ «ВНИРО», novgorod@vniro.ru.

Болотова Наталья Львовна, доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры биологии и химии Вологодского государственного университета, bolotova.vologda@mail.ru.

Information about authors

Grigory T. Frumin, dr. Sci. in Chemistry, prof., Leading Researcher, Research Laboratory of the Faculty of Geography, Herzen State Pedagogical University of Russia.

Vasilyeva Elena Sergeevna, head of the Novgorod branch of the Federal State Scientific Institution “VNIRO”.

Bolotova Natalia Lvovna, Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor of the Department of Biology and Chemistry of the Vologda State University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 07.05.2026

Принята в печать 11.07.2026

The article was received on 07.05.2026

The article was accepted on 11.07.2026

Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 498—509.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(84):498—509.

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК [504.5:546.3]:502.51(268.45)

doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-498-509

Оценка загрязнения вод и донных отложений бухты Новик (залив Петра Великого, Японское море) тяжелыми металлами

***Евгения Александровна Петрова¹, Александр Владимирович Зязя²,
Валерий Иванович Петухов², Алексей Валерьевич Кирьянов²,
Яна Юрьевна Блиновская², Полина Павловна Зацепина²***

¹ ФГБУН «Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН»,
Владивосток, Россия

² ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия,
blinovskaia.iaiu@dvfu.ru

Аннотация. В исследовании представлен анализ загрязнения вод и донных отложений бухты Новик (Японское море) тяжелыми металлами. Выявлены и проанализированы основные источники загрязнения акватории. Проведена оценка уровня загрязнения донных отложений относительно фоновых концентраций, нормативных показателей по «Голландским листам» и с помощью индексов загрязнения (I_{geo} , EF , Z_c). Установлена динамика индекса геоаккумуляции (I_{geo}) за период с 2016 г. по 2023 г., отмечен устойчивый рост концентраций Ni , Cd и Hg за весь период наблюдения, а также обнаружено превышение предельно допустимой концентрации Mn на всех станциях отбора проб воды.

Ключевые слова: морская вода, донные отложения, бухта Новик, залив Петра Великого, тяжелые металлы, индексы загрязнения.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ТОИ ДВО РАН по теме «Исследование структуры и динамики вод Мирового океана в условиях современных климатических изменений», регистрационный № 124022100079-4.

Для цитирования: Петрова Е. А., Зязя А. В., Петухов В. И. и др. Оценка загрязнения вод и донных отложений бухты Новик (залив Петра Великого, Японское море) тяжелыми металлами // Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 498—509. doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-498-509.

Original article

Assessment of water and bottom sediment pollution in Novik Bay (Peter the Great Bay, Sea of Japan) by heavy metals

***Evgenia A. Petrova¹, Alexandr V. Zyazya², Valery I. Petukhov²,
Alexey V. Kiryanov², Yana Yu. Blinovskaya², Polina P. Zatsepina²***

¹ V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

² Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Summary. The study presents an analysis of waters and bottom sediments pollution of Novik Bay by heavy metals. The main sources of the water area pollution have been identified and analyzed. The pollution level of bottom sediments was assessed against background concentrations, Dutch Sheets standards and pollution indices (I_{geo} , EF , Z_o). The dynamics of the geoaccumulation index (I_{geo}) for the 2016—2023 period was established, a steady increase in the concentrations of Ni , Cd and Hg was noted for the entire observation period, and an excess of the maximum permissible concentration of Mn was found at all water sampling stations. Studies showed that in the spring-summer period in the bottom part of the water area there is not only a stressed oxygen regime, but also increased concentrations of heavy metal ions (TM) in bottom sediments. The presence of metal-resistant (Ni , Cd , Cu , Zn) microorganisms was also recorded, which necessitates regular monitoring of the bay ecosystem in order to assess the anthropogenic impact and develop environmental measures. It should also be noted the likelihood of secondary pollution caused by changes in redox conditions. Thus, the use of integral indicators made it possible to objectively assess the geoecological state of Novik Bay by the main natural environments.

Keywords: seawater, bottom sediments, Novik Bay, Peter the Great Bay, heavy metals, pollution indices.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state assignment of the TOI FEB RAS on the topic «Study of the structure and dynamics of the waters of the World Ocean under modern climatic changes», registration No. 124022100079-4.

For citation: Petrova E. A., Zyazya A. V., Petukhov V. I. Assessment of water and bottom sediment pollution in Novik Bay (Peter the Great Bay, Sea of Japan) by heavy metals. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(84):(498—509). doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-498-509. (In Russ.).

Введение

Бухта Новик — узкая длинная акватория между мысами Елагина и Старицкого, отделяющая полуостров Саперный от основной части острова Русский. Протяженность бухты составляет 13 км, ширина на входе — 1,5 км, максимальная глубина — 20,7 м. Берега бухты преимущественно высокие, обрывистые, за исключением мелководной вершины, где побережье пологое и окаймлено осушкой [1]. До начала 2000-х гг. в бухте располагались военные подразделения Тихоокеанского флота РФ, что делало ее закрытой для исследований. С 2008 г. началось активное развитие на острове гражданской инфраструктуры, в том числе строительство кампуса Дальневосточного федерального университета, завершившееся в 2012 г. к проведению саммита Азиатско-Тихоокеанского экономического

сотрудничества. Это привело к новому витку освоения бухты Новик, которая стала рассматриваться, в том числе, как объект рекреации, базирования маломерных судов и других видов антропогенной деятельности.

Среди источников загрязнения акватории следует выделить канализационные очистные сооружения (КОС) «Лесная», сбрасывающие воды в вершину бухты, выпуски КГУП «Приморский водоканал»: «Экипажный», «Мелководный», «Парис», стоки которых поступают в центральную часть акватории, а также ливневые стоки с прилегающих территорий острова Русский.

Гидрологический режим бухты характеризуется затрудненным водообменом и сезонной стратификацией, что способствует интенсивному накоплению загрязняющих веществ в воде и в донных отложениях. Гидродинамика подчиняется муссонной циркуляции: при северных ветрах возникает нагонный эффект в кутовой части, при южных — ослабление циркуляции из-за орографии острова [2, 3].

Исследования [4, 5] показали, что в весенне-летний период в придонной части акватории отмечается не только напряженный кислородный режим, но и повышенные концентрации ионов тяжелых металлов (ТМ) в донных осадках. Также зафиксировано наличие металл-резистентных (*Ni*, *Cd*, *Cu*, *Zn*) микроорганизмов [5], что обуславливает необходимость проведения регулярного мониторинга экосистемы бухты с целью оценки антропогенного воздействия и разработки природоохранных мероприятий. В связи с этим целью статьи является оценка степени загрязненности водной среды и донных отложений (ДО) тяжелыми металлами и анализ многолетней динамики их накопления в бухте Новик.

Материалы и методы

В исследовании изучались пробы морской воды и донных отложений, полученные в мае 2023 г. с 6 станций, равномерно распределенных по акватории бухты Новик (рис. 1). Отбор проб воды проводился с борта маломерного судна батометром Нискина с поверхностного и придонного горизонтов в соответствии с ГОСТом Р 59024-2020, ДО — дночерпателем Ван Вина по ГОСТу 17.1.5.01-80. Анализ содержания ТМ проведен в аккредитованной лаборатории ООО «Экоаналитика» методами атомно-абсорбционной спектроскопии согласно РД 52.10.775-2013 (осадки) и ПНД Ф 14.1:2.4.214-06 (вода).

Качество воды устанавливалось на основе нормативов, определенных Приказом Федерального агентства по рыболовству № 296 от 26.05.2025 г. «*Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения*».

Для ДО ввиду отсутствия нормативов, регламентирующих содержание загрязняющих веществ, были использованы для сравнения фоновые концентрации (условно «чистые» акватории) залива Петра Великого [6, 7] и «Голландские литы» (ДК) (целевые концентрации при хроническом воздействии) [8].

Кроме того, для оценки интегральных значений степени загрязнения ДО были рассчитаны коэффициент геоаккумуляции (I_{geo}), фактор обогащения (EF) и суммарный показатель загрязнения (Z).

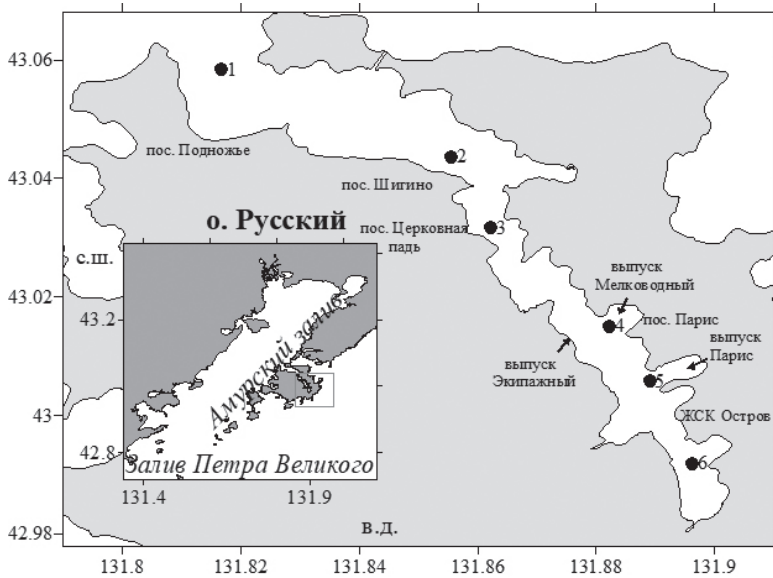


Рис. 1. Схема распределения станций отбора проб морской воды и донных отложений в бухте Новик.

Fig. 1. Novik Bay sampling station distribution scheme.

Коэффициент геоаккумуляции (I_{geo}) характеризует накопление металла относительно фоновых значений с учетом литогенных вариаций и рассчитывается как:

$$I_{geo} = \log_2 (C_n / 1,5 \times B_n), \quad (1)$$

где C_n — концентрация металла в пробе, B_n — геохимический фон, а уровень загрязнения определяется на основе шкалы из семи классов [9].

Фактор обогащения (EF) позволяет выявить антропогенный вклад в накопление того или иного элемента и определяется по формуле:

$$EF = \frac{\left(\frac{M_e}{F_e} \right)_{\text{образец}}}{\left(\frac{M_e}{F_e} \right)_{\text{фон}}}, \quad (2)$$

где M_e — концентрация анализируемого элемента в изучаемом образце, F_e — концентрация реперного (контрольного) элемента в том же образце. В знаменателе рассчитываются соотношения тех же элементов в материале из фоновой станции. Уровень загрязнения устанавливается в соответствии с пятью градациями [10].

Суммарный показатель загрязнения (Z_c) используется для оценки комплексного воздействия группы загрязняющих веществ, позволяет ранжировать территории по степени загрязнения и служит индикатором потенциального риска. Он рассчитывается по формуле:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ПДК_i} - (n-1), \quad (3)$$

где C_i — концентрация i -го металла, $ПДК_i$ — его допустимый уровень по «Голландским листам» [8]. На основе многолетних исследований разработана четырехступенчатая шкала, которая связывает Z_c с категориями загрязнения [12]. Анализ многолетней динамики выполнен научным коллективом департамента природно-технических систем и техносферной безопасности ДВФУ [12, 13, 14].

Результаты и обсуждение

Результаты анализа проб воды показывают, что содержание ТМ на всех станциях мониторинга не превышают допустимых значений, за исключением марганца (*Mn*) (табл. 1). Его концентрация варьировалась в диапазоне от 0,069 до 0,084 мг/л, что выше ПДК в 1,4—1,7 раза.

Таблица 1

Содержание тяжелых металлов в акватории бухты Новик по состоянию на 2023 г., мг/л

Heavy metals content in the water area of Novik Bay as of 2023, mg/l

Элемент	Минимум	Максимум	ПДК*
Fe	0,015	0,044	0,05
Mn	0,069	0,084	0,05
Cr	0,003	0,005	0,02
Zn	0,001	0,019	0,05
Cd	0,001	0,004	0,01
Cu	0,0009	0,0024	0,005
Pb	0,0007	0,0010	0,01
Ni	0,0006	0,0009	0,01
Co	0,0001	0,0003	0,005
As	0,002	0,003	0,01
Hg	0,000009	0,000042	0,0001

Примечание: * Приказ Росрыболовства от 26 мая 2025 г. № 296.

Превышение концентрации *Mn* может быть как следствием природных факторов (выщелачивание подстилающих пород, обогащенных *Mn*, разложение водных организмов, особенно сине-зеленых и диатомовых водорослей), так и антропогенных (коррозия корпусов судов, ливневые стоки с береговых объектов). В работах [4, 5] также отмечаются аномалии *Mn*, что обуславливает необходимость комплексного изучения природы поступления данного поллютанта и факторов, влияющих на формы его нахождения.

В отличие от водной толщи формирование донных отложений является финальным этапом миграции осадочного материала. Химический состав грунтов отражает результат всего комплекса биогеохимических процессов, происходящих на этапе мобилизации на суше, миграции с поверхностными стоками, осаждения в водной толще и диагенетического преобразования в верхнем слое. Таким образом, пути

попадания ТМ в донный грунт чрезвычайно разнообразны и их содержание может отражать объективную картину уровня антропогенной нагрузки на акваторию.

Как показано в табл. 2 превышение фоновых значений и ДК большинства контролируемых параметров указывает на устойчивое антропогенное воздействие практически на всей исследуемой акватории. Существенное превышение доли никеля (*Ni*) и кобальта (*Co*) зафиксировано на всех станциях, что может быть связано с активной навигационной деятельностью и поверхностными стоками. Максимальные концентрации цинка (*Zn*), кадмия (*Cd*), меди (*Cu*) и ртути (*Hg*) приурочены к станциям 4 и 5, где гидродинамика ослаблена, причем в непосредственной близости имеются выпуски сточных вод, что приводит к более активной аккумуляции загрязнения. Массовая доля остальных ТМ не превышает ни фоновых, ни допустимых значений, однако общие тенденции накопления загрязнителей могут служить сигналом напряженной экологической ситуации. В соответствии с этим были рассчитаны интегральные показатели загрязнения донных отложений.

На рис. 2 приведены результаты распределения индекса геоаккумуляции (I_{geo}), являющегося количественным показателем превышения содержания химического элемента относительно его фоновой концентрации. Таким образом, в соответствии с принятой классификацией ДО станция 5 по *Ni* и *Co* характеризуется как категория «от умеренно до сильно загрязненных» ($I_{geo} = 1,9$ и $2,1$ соответственно), по *Cd*, *Cu*, *Hg* — «умеренно загрязненная» ($I_{geo} = 1,2—1,3$).

Фактор обогащения (*EF*) используется для оценки степени антропогенного влияния на распределение химических элементов в ДО и позволяет дифференцировать естественные и антропогенные источники их поступления. Расчеты показали, что *Cd* имеет техногенное происхождение, что особенно ярко выражено на станциях 1, 5 и 6 (табл. 3). Для остальных ТМ установлено минимальное обогащение. С одной стороны, такие показатели характерны для литогенной составляющей, но с другой, учитывая наличие источников, загрязнение определяет необходимость регулярного мониторинга ДО.

Таблица 2

Содержание тяжелых металлов в донных отложениях бухты Новик по состоянию на 2023 г., мг/кг

Heavy metals content in the bottom sediments of Novik Bay as of 2023, mg/kg

Ст.	<i>Cr</i>	<i>Zn</i>	<i>Cd</i>	<i>Cu</i>	<i>Pb</i>	<i>Ni</i>	<i>Co</i>	<i>As</i>	<i>Hg</i>
1	48,9	128,6	1,46	20,1	35,1	53,8	32,4	15,0	0,060
2	43,1	87,0	0,58	19,3	29,4	39,5	29,1	16,8	0,110
3	56,3	118,9	0,68	19,9	47,5	43,9	29,3	15,0	0,140
4	64,7	143,1	0,78	30,6	76,5	46,4	47,5	11,2	0,150
5	60,6	155,9	1,30	61,9	73,7	78,4	51,8	18,0	0,589
6	51,4	71,9	1,09	20,7	23,8	45,5	29,7	14,0	0,016
Фон*	7,0	40,0	0,10	10,0	10,0	10,0	8,0	1,5	0,020
ДК**	100	140	0,8	36	85	35	9	29	0,3

Примечание: * фоновые значения для залива Петра Великого [7]; ** контрольный уровень при хроническом воздействии по «Голландским листам» [8].

Таблица 3

Оценки фактора обогащения (*EF*)
для донных отложений бухты Новик по состоянию на 2023 г.
Enrichment factor (*EF*) for Novik Bay sediments as of 2023

Ст.	<i>Cr</i>	<i>Zn</i>	<i>Cd</i>	<i>Cu</i>	<i>Pb</i>	<i>Ni</i>	<i>Co</i>	<i>As</i>	<i>Hg</i>
1	0,8	1,1	3,8	0,4	0,9	1,0	1,2	0,8	0,2
2	0,8	0,8	1,6	0,5	0,8	0,8	1,2	1,0	0,4
3	0,9	1,0	1,7	0,4	1,2	0,8	1,1	0,8	0,4
4	0,9	1,0	1,7	0,5	1,6	0,7	1,5	0,5	0,4
5	0,8	1,1	2,8	1,1	1,6	1,2	1,7	0,8	1,5
6	0,9	0,6	3,0	0,5	0,6	0,9	1,2	0,8	0,05

Примечание: $EF < 2$ — обогащение минимальное, источник элемента преимущественно природный; $2 \leq EF < 5$ — умеренное обогащение; $5 \leq EF < 20$ — значительное обогащение; $20 \leq EF < 40$ — очень высокое обогащение; $EF \geq 40$ — экстремальное обогащение, связанное преимущественно с техногенным воздействием.

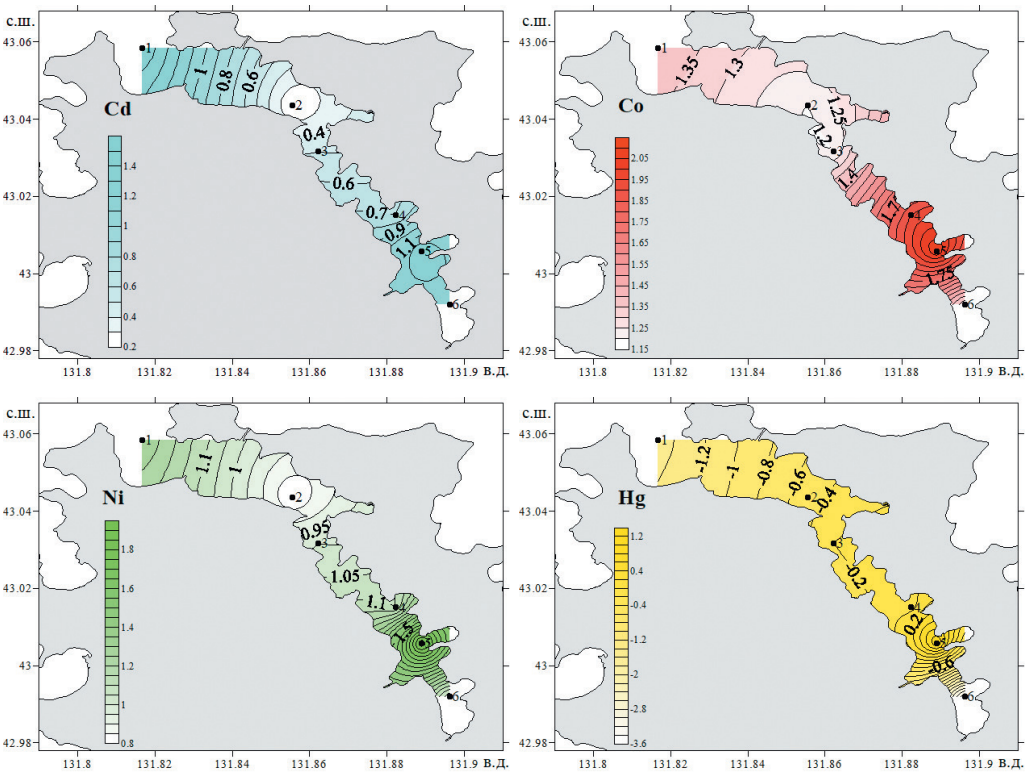


Рис. 2. Распределение индекса геоаккумуляции (I_{geo}) в бухте Новик.

Fig. 2. Geoaccumulation index (I_{geo}) distribution in Novik Bay.

Расчет суммарного показателя загрязнения (Z_c) показал, что ДО бухты Новик характеризуются допустимым загрязнением ($Z_c < 16$) (рис. 3). Однако в бухте выделяется зона с более высоким значением: это станция 5, где была получена максимальная для акватории величина ($Z_c = 15,3$), что, вероятно, связано как с затрудненным водообменом, так и наличием выпуска сточных вод. На станциях 1 и 4 установлены средние для бухты показатели — 7,2 и 7,8 соответственно. Данные участки характеризуются более активным судоходством и наличием береговых источников загрязнения, однако здесь отмечается более активная гидродинамика, способствующая перемешиванию и перемещению осадков.

Для анализа многолетней динамики загрязнения ДО использованы данные, полученные на этих же станциях в период с 2016 г. по 2018 г. [12, 13]. В результате было подтверждено более интенсивное антропогенное влияние на станцию 5 (рис. 4). Сравнение с ранее полученными данными показало устойчивый рост концентраций Ni , Cd и Hg . Индекс I_{geo} по Ni вырос с 0,0 (практически незагрязненная среда) до 1,9 (умеренно загрязненная среда); по Hg — с -1,5 до 1,2; по Cd — с 0,1 до 1,3 (от практически незагрязненной до умеренно загрязненной среды). Это свидетельствует о продолжающемся накоплении этих токсикантов в ДО бухты Новик.

Таким образом, применение интегральных показателей позволило объективно оценить геоэкологическое состояние бухты Новик по основным природообразующим средам.

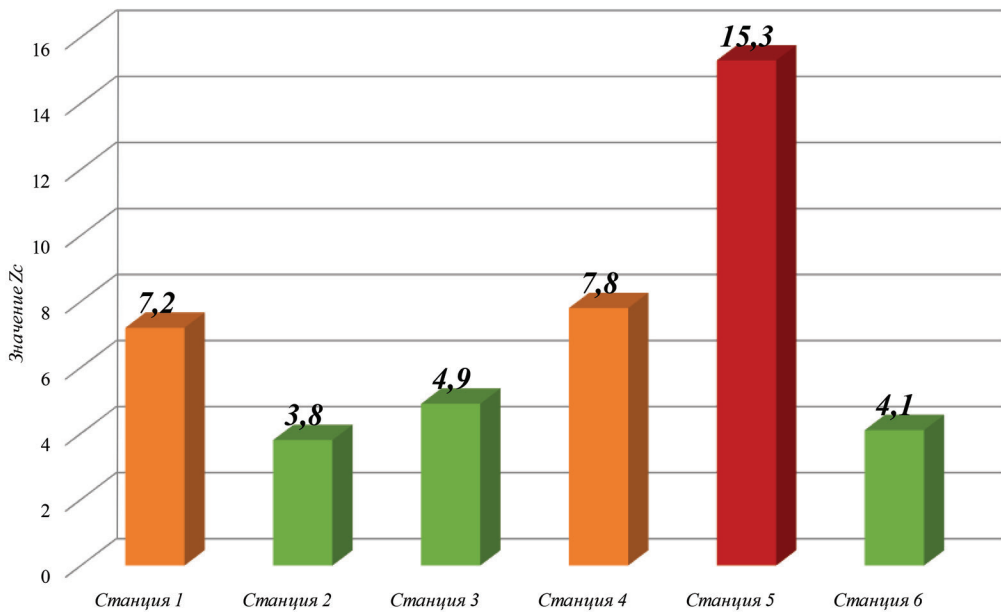


Рис. 3. Результаты расчета суммарного показателя загрязнения (Z_c).

Fig. 3. Calculation results of total pollution index (Z_c).

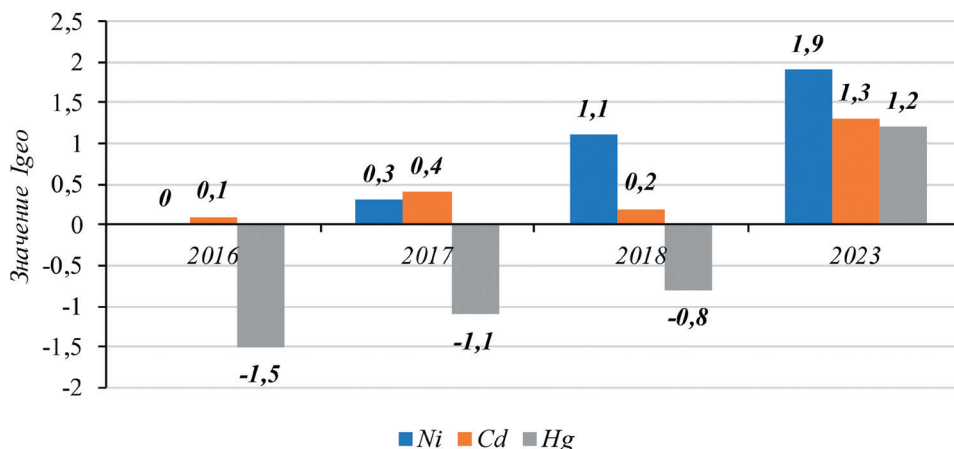


Рис. 4. Динамика индекса геоаккумуляции (I_{geo}) в период с 2016 г. по 2023 г. на станции 5.

Fig. 4. Dynamics of the geoaccumulation index (I_{geo}) in 2016—2023 at station 5.

Водная толща. Соответствие качества вод нормативам (кроме *Mn*) свидетельствует об относительно эффективной работе очистных сооружений. Повышенные концентрации *Mn*, вероятно, связаны как с природными, так и с антропогенными факторами, что обуславливает необходимость проведения регулярного мониторинга водной среды.

Донные отложения. I_{geo} и EF указывают на два типа загрязнения:

1. Фоновое (природное) — для *Cr*, *As*, частично *Ni* и *Co* ($EF < 1,5$ на большинстве станций);
2. Антропогенное (локальное) — для *Cd*, *Pb*, *Zn*, *Cu*, *Hg* на станциях 4—5 в районе выпуска сточных вод Мелководный и Парис. EF для *Cd* достигает 3,8, что подтверждает влияние выпусков сточных вод.

Особую тревогу вызывает рост I_{geo} для *Ni*, *Cd* и *Hg* на станции 5. Выявленные тенденции могут быть связаны с гидрологическими особенностями акватории (формирование застойных зон), что способствует накоплению поллютантов без их выноса придонными течениями. Также следует отметить вероятность вторичного загрязнения, вызванного изменениями редокс-условий (гипоксия в летний период) [6]. В этой связи станция 5 ($Z_c = 15,3$) должна рассматриваться как «горячая точка», т. е. зона, требующая проведения регулярного мониторинга и, возможно, проведения инженерно-экологических мероприятий (например, дноуглубления или локального удаления загрязненных осадков).

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

— По результатам проведенного в 2023 г. исследования, воды бухты Новик соответствуют рыбохозяйственным нормативам по содержанию тяжелых металлов, за исключением *Mn* (с превышением ПДК в 1,5 раза).

— Донные отложения характеризуются повышенным содержанием Ni , Co , Cd , Zn , Cu , Hg . Наибольшее загрязнение установлено для Ni и Co на станции 5.

— Фактор обогащения указывает на антропогенное происхождение Cd (EF до 3,8) в центральной части бухты.

— Участок акватории в районе станций 4 и 5 характеризуется повышенным экологическим риском, где Z_c достигает максимального значения (15,3).

— За период с 2016 г. по 2023 г. выявлен устойчивый рост содержания Ni , Cd и Hg , подтвержденный увеличением I_{geo} .

— Рекомендуются включить бухту Новик в программу регулярного мониторинга в рамках государственной системы наблюдений в заливе Петра Великого и провести дополнительные исследования для оценки риска вторичного загрязнения.

Список литературы

1. Лоща северо-западного берега Японского моря. СПб.: ГУНИО, 1996. 354 с.
2. Лазарюк А. Ю., Кильматов Т. Р., Марьина Е. Н., Кустова Е. В. Особенности сезонной изменчивости гидрологического режима бухты Новик (о. Русский, залив Петра Великого, Японское море) // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37. № 6. С. 680—695. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-6-680-695>.
3. Кильматов Т. Р. Искусственный канал на острове Русский для интенсификации циркуляции в целях самоочищения бухты Новик // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 2(59). С. 91—95. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-2/91-95>.
4. Христофорова Н. К., Дегтева Ю. Е., Бердасова К. С. и др. Химико-экологическое состояние вод бухты Новик (остров Русский, зал. Петра Великого, Японское море) // Известия ТИНРО. 2016. Т. 186. С. 135—144. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2016-186-135-144>.
5. Христофорова Н. К., Лазарюк А. Ю., Бойченко Т. В., Емельянов А. А. Ранневесеннее опробование качества среды бухты Новик (о. Русский, зал. Петра Великого, Японское море) в апреле 2023 г. // Известия ТИНРО. 2023. Т. 203. № 3. С. 639—649. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2023-203-639-649>.
6. Шулькин В. М. Металлы в экосистемах морских мелководий. Владивосток: Дальнаука, 2004. 279 с.
7. Калинин В. В., Мишуков В. Ф., Елисафенко Т. Н., Аксентов К. И. Комплексные химико-экологические исследования прибрежной зоны северо-восточной части острова Русский // Вестник ДВО РАН. 2010. № 5. С. 96—106.
8. Warmer H., van Dokkum R. Water pollution control in the Netherlands. Policy and practice 2001 // RIZA report 2002.009. Lelystad. Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95. 2002. 77 p.
9. Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River // GeoJournal. 1969. Vol. 2. No. 3. P. 108—118.
10. Sutherland R. A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii // Environmental Geology. 2000. Vol. 39. No. 6. P. 611—627.
11. Валиев В. С., Иванов Д. В., Зиганшин И. И. и др. Анализ распределения форм металлов в донных отложениях озер природных и урбанизированных территорий // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 9. С. 45—53.
12. Петрова Е. А., Петухов В. И. Методические аспекты оценки загрязнения морских донных отложений тяжелыми металлами на примере залива Угловой (Амурский залив, Японское море) // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2025. № 3. С. 66—77. DOI: 10.34078/1814-0998-2025-3-66-77.
13. Петухов В. И., Петрова Е. А., Лосев О. В. Загрязнение вод залива Углового тяжелыми металлами и нефтепродуктами в феврале 2010—2016 гг. // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 1. С. 102—113. <https://doi.org/10.31857/S0321-0596461102-113>.
14. Petukhov V., Petrova E., Kiryanov A., et al. Assessment of contamination of marine sediments and their potential toxicity in the Uglovoy Bay, Peter the Great Gulf, Sea of Japan/East Sea // Environmental

References

1. Lotcia severo-zapadnogo berega Yaponskogo moray = *Sailing directions of the Japan Sea Northwest Coast*. A textbook. St. Petersburg: GUNIO, 1996: 354 p. (in Russ.).
2. Lazaryuk A. Yu., Kilmатов T. R., Mar'ina E. N., Kustova E. V. Features of seasonal variability of the hydrological regime of Novik Bay (Russky Island, Peter the Great Bay, Sea of Japan). *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal = Marine Hydrophysical Journal*. 2021; 37(3): (680—695) (in Russ.).
3. Kilmатов T.R. Artificial channel on Russky Island to intensify circulation for self-cleaning of Novik Bay. *Vestnik Inzhenernoy Shkoly Dalnevostochnogo federalnogo universiteta = Engineering School Bulletin of the Far Eastern Federal University*. 2024; 2(59): (91—95) (in Russ.).
4. Khristophorova N. K., Degteva Yu. E., Berdasova K. S. et al. Chemical and ecological state of the waters of Novik Bay (Russky Island, Hall. Peter the Great, Sea of Japan). *Izvestiya TINRO = News-bulletin TINRO*. 2016; 186: (135—144) (in Russ.).
5. Khristophorova N. K., Lazaryuk A. Yu., Boychenko T. V., Emelyanov A. A. Early spring testing of the quality of the Novik Bay environment (Russky Island, Hall. Peter the Great, Sea of Japan) in April 2023. *Izvestiya TINRO = News-bulletin TINRO*. 2023; 203 (3): (639—649) (in Russ.).
6. Shulkin V.M. *Metally v ekosistemakh morskikh melkovodiy = Metals in Marine Shallow Water Ecosystems*. Vladivostok: Dalnauka, 2004: 279 p. (in Russ.).
7. Kalinchuk V. V., Mishukov V. F., Elisaphenko T. N., Aksentov K. I. Comprehensive chemical and ecological studies of the coastal zone of the northeastern part of Russky Island. *Vestnik DVO RAN = Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2010; 5: (96—106) (in Russ.).
8. Warmer H., van Dokkum R. Water pollution control in the Netherlands. Policy and practice 2001. *RIZA report 2002.009*. Lelystad. Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95. 2002: 77 p.
9. Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal*. 1969; 2(3): 108—118.
10. Sutherland R.A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*. 2000; 39(6): 611—627.
11. Valiev V. S., Ivanov D. V., Ziganshin I. I. Analysis of the Distribution of Metal Forms in the Bottom Sediments of Lakes in Natural and Urbanized Areas. *Trudy KarNC RAN = Proceedings of KarNC RAS*. 2016; 9: (45—53) (in Russ.).
12. Petrova E. A., Petukhov V. I. Methodological Aspects of Assessment of Pollution of Marine Bottom Sediments with Heavy Metals on the Example of Uglovoye Bay (Amur Bay, Sea of Japan). *Vestnik SVNC DVO RAN = VSNIS DVO RAS Bulletin*. 2025; 3: (66—77) (in Russ.).
13. Petukhov V. I., Petrova E. A., Losev O. V. Pollution of the waters of Ugolovoye Bay with heavy metals and petroleum products in February 2010-2016. *Vodniye resursy = Water Resources*. 2019; 46(1): (102—113) (in Russ.).
14. Petukhov V., Petrova E., Kiryanov A., et al. Assessment of contamination of marine sediments and their potential toxicity in the Uglovoy Bay, Peter the Great Gulf, Sea of Japan/East Sea. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. 30(31): 77798—77806.

Сведения об авторах

Петрова Евгения Александровна, кандидат географических наук, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, лаборатория гидрологических процессов и климата, старший научный сотрудник, petrova@poi.dvo.ru.

Зязя Александр Владимирович, аспирант, Дальневосточный федеральный университет, Политехнический институт, Департамент природно-технических систем и техносферной безопасности, ziazia.av@dvfu.ru.

Петухов Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет, Политехнический институт, Департамент природно-технических систем и техносферной безопасности, профессор, petukhov.vi@dvfu.ru.

Кириянов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, Дальневосточный федеральный университет, Политехнический институт, Департамент электроники, телекоммуникации и приборостроения, доцент, kirianov.av@dvfu.ru.

Блиновская Яна Юрьевна, доктор технических наук, доцент, Дальневосточный федеральный университет, Политехнический институт, Департамент природно-технических систем и техносферной безопасности, профессор, blinovskaia.iaiu@dvfu.ru.

Зацепина Полина Павловна, аспирант, Дальневосточный федеральный университет, Политехнический институт, Департамент природно-технических систем и техносферной безопасности, zatsepina.pp@dvfu.ru.

Information about authors

Petrova Evgeniya Alexandrovna, candidate of science (geography), V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Laboratory of Hydrological Processes and Climate, Senior Researcher.

Zyazya Alexander Vladimirovich, postgraduate student, Far Eastern Federal University, Polytechnical institute, Natural and technical system and technosferical safety department.

Petukhov Valeriy Ivanovich, doctor of science (technical), professor, Far Eastern Federal University, Polytechnical institute, Natural and technical system and technosferical safety department, professor.

Kiryanov Alexey Valerievich, candidate of science (technical), Far Eastern Federal University, Polytechnical institute, Department of electronics, telecommunications and instrumentation engineering, associate professor.

Blinovskaya Yana Yurievna, doctor of science (technical), associate professor, Far Eastern Federal University, Polytechnical institute, Natural and technical system and technosferical safety department, professor.

Zatsepina Polina Pavlovna, postgraduate student, Far Eastern Federal University, Polytechnical institute, Natural and technical system and technosferical safety department.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 06.07.2026

Принята в печать 07.09.2026

The article was received on 06.07.2026

The article was accepted on 07.09.2026

Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 510—522.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(84):510—522.

ГЕОИНФОРМАТИКА

Научная статья

УДК 528.9: 004.8:551.467(268.52)

doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-510-522

Геоинформационная методика оценки качества нейросетевых прогнозов морского льда на примере акватории Карского моря

Илья Дмитриевич Болховский¹, Сергей Иванович Биденко²

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, ilya.bolkhovsky@gmail.com

² АО «НПО „Импульс»», Санкт-Петербург

Аннотация. В работе представлена геоинформационная методика оценки качества нейросетевых прогнозов морского льда для задач навигационно-гидрографического обеспечения Арктики. Показано, что традиционные метрики оценки качества прогнозов и нормативная процедура оправдываемости положения кромки льда не учитывают пространственное распределение ошибок и не позволяют оценить применимость прогноза для навигационных задач. Представлена методика пространственной декомпозиции ошибок на основе интегрированной ледовой пограничной ошибки, разделяемой на ошибку площади и ошибку положения границы (кромки). Показано, что для навигационных задач минимизация ошибки положения границы (кромки) имеет приоритет над минимизацией ошибки площади. Предложена четырёхэтапная методика валидации с критерием навигационной применимости модели. Методика реализуется как модуль геоинформационной системы.

Ключевые слова: геоинформационные системы, Арктическая зона, ледовые поля, оценка качества прогнозов, искусственные нейронные сети, пространственный анализ, навигационно-гидрографическое обеспечение.

Для цитирования: Болховский И. Д., Биденко С. И. Геоинформационная методика оценки качества нейросетевых прогнозов морского льда на примере акватории Карского моря // Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 510—522. doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-510-522.

Original article

Geoinformation Methodology for Quality Assessment of Neural Network Sea Ice Forecasts: A Case Study of the Kara Sea

Ilya D. Bolkhovskiy¹, Sergey I. Bidenko²

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia,
ilya.bolkhovsky@gmail.com

² JSC “NPO Impuls”, Saint Petersburg, Russia

Summary. This paper addresses quality assessment of neural network sea ice forecasts for navigation and hydrographic support of the Arctic Zone of the Russian Federation. Neural network models trained on remote sensing data demonstrate significant advantages over traditional numerical models in computational speed and accuracy. However, their integration into critical navigation infrastructure requires careful independent validation on data not used during model training. Traditional forecast quality metrics, including root mean square error, mean absolute error, and coefficient of determination, evaluate only statistical agreement between predicted and observed values without accounting for spatial distribution of errors. This limitation is critical for navigation tasks, where the precise location of the ice edge determines route safety, while aggregate area metrics may mask dangerous local discrepancies. This paper builds on the established spatial decomposition of the Integrated Ice Edge into the Absolute Extent Error, quantifying the difference in total ice-covered areas, and the Misplacement Error, measuring spatial displacement of the ice boundary at preserved total area. For navigation tasks, Misplacement Error takes priority since the precise position of the ice edge is more critical than the overall ice extent. The contribution of the present work is the operational interpretation of this decomposition for neural-network forecast validation in the context of navigation and hydrographic support of the Arctic Zone: a model applicability criterion; a comparison with the regulatory ice edge prediction reliability assessment procedure (RD 52.27.759-2011) that resolves three ambiguities of its application to raster forecasts; and a four-stage validation methodology with a model applicability criterion is proposed. The methodology is implemented as a module of a geoinformation system.

Keywords: geoinformation systems, Arctic zone, ice fields, forecast quality assessment, artificial neural networks, spatial analysis, navigation and hydrographic support.

For citation: Bolkhovskiy I. D., Bidenko S. I. Geoinformation Methodology for Quality Assessment of Neural Network Sea Ice Forecasts: A Case Study of the Kara Sea // *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(84):(510—522). doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-510-522. (In Russ.).

Введение

Арктическая зона Российской Федерации (АЗРФ) является стратегически важным регионом страны, а состояние ледовых полей её акваторий — решающим фактором эффективности морской деятельности в Арктике [1, 2]. Основным источником данных о состоянии ледяного покрова служат космические средства дистанционного зондирования Земли (далее — ДЗЗ) [3]. Действующая процедура оценки качества прогнозов положения кромки льда определена нормативными документами Росгидромета — РД 52.27.759–2011 (§7.3.4.1.6) и ГОСТ Р 72039–2025 (§7.3.3). Указанный критерий сформулирован для положения кромки льда как линии: оправдываемость определяется через её длину, а допуск $\delta_{кр}$ — по отклонению двух кривых.

Применение алгоритмов машинного обучения для обработки спутниковых данных при подготовке оперативных навигационных ледовых карт ведётся в отечественных научных центрах. Нейронные сети применяются для автоматизированной классификации спутниковых РСА-изображений морского льда [4]. Параллельно разрабатываются нейросетевые методы оперативного краткосрочного прогноза концентрации льда, в частности, модели с архитектурой U-Net для Баренцева, Лабрадорского и Лаптева морей [5].

Современные международные публикации фиксируют переход к нормированным пространственным метрикам ошибки кромки как стандарту валидации нейросетевых прогнозов [1, 5—6]. Нейросетевая модель выдаёт прогноз в виде пиксельной маски концентрации льда на регулярной сетке, поэтому прямое применение нормативной процедуры оправдываемости к такому формату приводит к некоторым методическим неопределённостям, описанным в настоящей работе.

Алгоритмы машинного обучения, в отличие от физических моделей атмосферы и океана, извлекают закономерности непосредственно из эмпирических данных. Подобный подход сопряжён с риском скрытых систематических ошибок при отклонении условий от обучающей выборки и с барьером предсказуемости морского льда, обусловленным начальными условиями, атмосферной неопределённостью и внутренней изменчивостью океана. Опыт мировых ледовых служб показывает, что полная автоматизация интерпретации ледовой обстановки нецелесообразна и финальная оценка качества прогноза должна оставаться в зоне ответственности ледового аналитика [7]. Этому соответствует гибридная схема, в которой автоматизированная валидация служит средством информирования эксперта и поставщиком метрик, интерпретируемых в терминах задач навигации.

Целью настоящей работы является разработка геоинформационной методики оценки качества нейросетевых прогнозов ледовой обстановки для задач навигационно-гидрографического обеспечения АЗРФ на примере акватории Карского моря, дополняющей нормативную процедуру оправдываемости положения кромки льда по РД 52.27.759–2011 для пиксельных нейросетевых прогнозов на регулярной сетке.

Для достижения поставленной цели необходимо решить четыре задачи:

1) сопоставить предлагаемую методику с действующей процедурой оправдываемости положения кромки льда по РД 52.27.759–2011 (§7.3.4.1.6) и установить области их совместного применения;

2) обосновать приоритет минимизации ошибки положения границы (кромки) над ошибкой общей площади для задач навигационно-гидрографического обеспечения исходя из физической интерпретации компонентов декомпозиции;

3) проиллюстрировать применение методики на численном примере прогноза концентрации морского льда;

4) предложить четырёхэтапную методику валидации, реализуемую как программный модуль геоинформационной системы.

Вкладом настоящей работы является интерпретация декомпозиции интегрированной ледовой пограничной ошибки E на компоненты ошибки общей площади и ошибки положения границы (кромки) [8] для валидации нейросетевых прогнозов в задачах навигационно-гидрографического обеспечения АЗРФ.

Ограничения агрегатных метрик оценки ледовых прогнозов

Валидация прогнозов концентрации морского льда традиционно опирается на агрегатные метрики, обобщающие отклонения прогноза от наблюдений по всей области интереса. Среднеквадратичная ошибка σ_ε и средняя абсолютная ошибка $\delta_{\text{ср}}$ вычисляются по формулам:

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_{\text{прогноз},i} - C_{\text{набл},i})^2},$$

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |C_{\text{прогноз},i} - C_{\text{набл},i}|,$$

где N — количество ячеек, $C_{\text{прогноз}}$ и $C_{\text{набл}}$ — прогнозируемая и наблюдаемая концентрация морского льда соответственно. Метрика σ_ε придаёт больший вес значительным отклонениям прогноза, тогда как $\delta_{\text{ср}}$ менее чувствительна к отдельным большим ошибкам. Коэффициент детерминации вычисляется по формуле $R^2 = \sigma_{\text{объясн}}^2 / \sigma_{\text{факт}}^2$, где $\sigma_{\text{объясн}}^2$ — дисперсия, объяснённая моделью, $\sigma_{\text{факт}}^2$ — полная дисперсия наблюдений.

Перечисленные показатели оценивают усреднённую по акватории величину ошибки концентрации льда. Действующая процедура оценки методов прогнозов полей (§7.1.4.5) и положения кромки льда, выраженной кривой (§7.1.4.6), по РД 52.27.759–2011 использует скалярный критерий обеспеченности метода (не ниже 68 %). Общим свойством агрегатных показателей и нормативной оправдываемости является приведение пространственно разнородных ошибок к одному числу, что не позволяет различить два принципиально разных типа ошибок: ошибку общей площади ледового покрова и ошибку положения кромки льда при сохранении общей площади. Для задач навигационно-гидрографического обеспечения критична именно вторая составляющая — точное положение границы льда в районе плавания [7]. Данное ограничение обуславливает необходимость применения специализированных пространственных метрик, способных оценить положение кромки.

Интегрированная ледовая пограничная ошибка и её декомпозиция на ошибку площади и ошибку положения кромки

Интегрированная ледовая пограничная ошибка E (англ. Integrated Ice Edge Error, *ИЕЕ*) — метрика, целенаправленно созданная для оценки точности определения положения ледовой кромки [8]. В отличие от σ_ε и $\delta_{\text{ср}}$, метрика E использует бинаризованное представление поля концентрации: каждая ячейка сетки получает метку «лёд» или «открытая вода» в зависимости от порога концентрации морского льда C . Согласно конвенции, принятой в спутниковом пассивном микроволновом зондировании, стандартным порогом границы ледовой кромки является $C > 15\%$ [8–9]. По шкале сплочённости номенклатуры ВМО этот порог находится в нижней части диапазона редкого льда (10–30 %). Величина E определяется как сумма двух компонентов:

$$E = E_+ + E_-,$$
$$E_+ = \int_A 1[C_{\text{прогноз}} > 0,15 \wedge C_{\text{набл}} \leq 0,15] dA,$$
$$E_- = \int_A 1[C_{\text{прогноз}} \leq 0,15 \wedge C_{\text{набл}} > 0,15] dA,$$

где $1[\cdot]$ — индикаторная функция, равная 1 при выполнении условия в скобках и 0 в остальных случаях; порог 0,15 отвечает ледовой кромке $C > 15\%$; индексы «прогноз» и «набл» относятся к прогнозируемой и наблюдаемой концентрации C соответственно; A — область интереса. Компонент E_+ (переоценка, англ. Overestimation Error, OE) — суммарная площадь участков, где модель предсказывает лёд, отсутствующий по данным наблюдений (ситуация «ложной тревоги»); E_- (недооценка, англ. Underestimation Error, UE) — площадь, где прогноз не содержит фактически наблюдаемого льда, что создаёт угрозу безопасности судна, входящего в неопознанную ледовую зону. Геометрически E равна суммарной площади участков, на которых прогнозируемое и наблюдаемое ледовые покрытия расходятся, то есть областей, отнесённых ко льду лишь на одной из двух карт, и измеряется в единицах площади (км^2).

Декомпозиция E на два независимых компонента, предложенная в работе [8], представляется следующим образом:

$$E = E_s + E_{\text{гр}},$$
$$E_s = |E_+ - E_-|,$$
$$E_{\text{гр}} = 2 \min(E_+, E_-).$$

Компонент E_s (ошибка площади, англ. Absolute Extent Error, AEE) равен модулю разности E_+ и E_- и отражает систематическое смещение модели: при $E_+ > E_-$ модель систематически переоценивает площадь ледового покрова, при $E_- > E_+$ — недооценивает. Компонент $E_{\text{гр}}$ (ошибка положения кромки, англ. Misplacement Error, ME) равен удвоенному минимуму E_+ и E_- и характеризует ситуацию компенсированных ошибок, когда общая площадь льда воспроизведена корректно, но его пространственное распределение отличается от наблюдаемого. Физический смысл компонентов декомпозиции и характерные ситуации сведены в табл. 1.

Таблица 1

Компоненты декомпозиции интегрированной ледовой пограничной ошибки
Components of Integrated Ice Edge Error decomposition

Компонент	Физический смысл	Пример ситуации
E_s	Ошибка общего количества льда	Прогноз: 100 тыс. км^2 льда. Факт: 80 тыс. км^2 . $E_s = 20$ тыс. км^2
$E_{\text{гр}}$	Ошибка положения кромки льда	Прогноз: 100 тыс. км^2 льда. Факт: 100 тыс. км^2 , но в другом месте. $E_{\text{гр}} > 0$, $E_s = 0$

Для задач навигационно-гидрографического обеспечения минимизация $E_{гр}$ имеет приоритет над минимизацией E_s ввиду того, что точное положение кромки льда определяет безопасность маршрута, тогда как ошибка общей площади ледового покрова не препятствует прокладке курса при правильно определённой границе. Соответственно, модель прогнозирования может считаться применимой для навигационных задач при выполнении условия $(E_{гр} / E) < 0,5$.

Это условие соответствует доминированию ошибки площади над ошибкой положения. В противном случае модель требует доработки или ограничения области применения климатологическими задачами. Согласование критерия с современной международной практикой нормированных пограничных метрик отражено в работе [6].

Сопоставление декомпозиции интегрированной ледовой пограничной ошибки с нормативной оценкой оправдываемости положения кромки льда

Действующая нормативная процедура оценки качества прогнозов положения кромки льда определена в РД 52.27.759–2011. Согласно §7.3.4.1.6, в качестве допустимой ошибки положения кромки принимается величина $\delta_{кр} = 0,674 \sigma_{кр}$, где $\sigma_{кр}$ — среднеквадратическое отклонение положения кромки льда. Оправдываемость прогноза определяется по формуле $P = (l_1 / l_s) \times 100$, где l_1 — общая длина участков прогностической кромки, на которых отклонение от фактического положения не превышает $\delta_{кр}$; l_s — длина прогностической кромки, обеспеченной фактическими данными. Согласно §7.1.4.6, метод считается удовлетворительным при обеспеченности не ниже 68 %. ГОСТ Р 72039–2025 (§7.3.3) воспроизводит указанные критерии и ссылается на РД 52.27.759–2011 как на источник методики оценки.

РД 52.27.759–2011 — это обобщённый нормативный документ, а его критерий оправдываемости положения кромки сформулирован для кромки льда как линии и опирается на её длину. При применении этого критерия к нейросетевым прогнозам концентрации, представленным полем C на регулярной сетке, возникают три методических расхождения.

Первое расхождение касается того, как измеряется длина кромки. После бинаризации прогноза по порогу 15 % C граница превращается в ступенчатый растровый контур, длина которого зависит от схемы трассировки (4-/8-связные звенья, метод марширующих квадратов и пр.) и при уменьшении размера пикселя не сходится к длине истинной гладкой кромки — это известный эффект цифровой геометрии, поэтому знаменатель l_s в формуле (32 РД) $P = l_1 / l_s$ определён лишь с точностью до этого систематического смещения. Суммарная площадь, где прогноз и наблюдение расходятся по наличию льда, на которой построена метрика E [8], этого недостатка лишена: площадь несоответствия сходится к истинному значению при уточнении сетки независимо от способа трассировки границы.

Второе расхождение состоит в скалярности нормативного критерия. Показатель P агрегирует пространственно разнородные ошибки в одно число и не различает компенсирующиеся ошибки разного знака в разных участках акватории,

когда общая площадь льда сохранена, но положение кромки смещено. Последний случай соответствует ситуации $E_{гр} > 0$ при $E_s = 0$ в терминах декомпозиции [8]. Разложение $E = E_s + E_{гр}$ выделяет два физически независимых компонента ошибки, что недоступно скалярному показателю P .

Третье расхождение связано со спецификой обучения нейросетевых моделей. При настройке весов модели минимизируется поузловая мера расхождения прогнозного и наблюдаемого полей концентрации. Как правило, этой мерой является средняя абсолютная ($\delta_{ср}$) или среднеквадратичная (σ_e) ошибка. В работе [5] для оперативного прогноза концентрации льда с помощью модели U-Net показано, что наибольшие отклонения локализованы именно вдоль ледовой кромки; авторы отмечают, что этот эффект присущ и динамическим моделям. В действующих процедурах валидации он не разделяется на компоненты E_s и $E_{гр}$ — это и обосновывает применение декомпозиции E . Численный пример, иллюстрирующий характер такого расхождения, приведён в следующем разделе.

Таким образом, предлагаемая методика на основе декомпозиции E не отменяет нормативную процедуру оценки оправдываемости положения кромки (§7.3.4.1.6 РД 52.27.759–2011, §7.3.3 ГОСТ Р 72039–2025), а расширяет её геоинформационной декомпозицией для пиксельных нейросетевых прогнозов на регулярной сетке. Критерий $E_{гр}/E < 0,5$ предлагается как геоинформационное дополнение к нормативной процедуре, реализуемое непосредственно на сетке прогноза без необходимости извлечения гладкой кривой кромки и оценки $\sigma_{кр}$.

Методика валидации нейросетевых прогнозов ледовой обстановки на основе декомпозиции интегрированной ледовой пограничной ошибки

На основании сопоставления с действующей нормативной процедурой и физического обоснования компонентов декомпозиции E предлагается четырёхэтапная методика валидации нейросетевых прогнозов ледовой обстановки (рис. 1).

Этап 1. Подготовка данных

Входные данные методики — прогнозные и референсные поля концентрации морского льда. Прогнозное поле C формируется нейросетевой моделью произвольной архитектуры; референсное поле C получают из источника, независимого от обучающей выборки [1], — пассивного микроволнового зондирования (AMSR2, SSM/I), климатических записей OSI SAF/ESA CCI [9], радаров с синтезированной апертурой (Sentinel-1, RADARSAT) с автоматической классификацией [4] либо ледовых карт ААНИИ [7]. Прогнозные и референсные поля приводятся к единой пространственной сетке методом билинейной интерполяции; разрешение определяется задачей.

Этап 2. Бинаризация и расчёт компонентов

Бинаризация — это приведение поля к двум классам: «лёд» или «вода» по заданному порогу. В данном случае для каждой ячейки сетки выполняется

бинаризация по стандартному порогу 15 %. Площади переоценки и недооценки вычисляются как:

$$E_+ = \sum_{i \in A} S_i \cdot 1[C_{\text{прогноз},i} > 0,15 \wedge C_{\text{набл},i} \leq 0,15],$$

$$E_- = \sum_{i \in A} S_i \cdot 1[C_{\text{прогноз},i} \leq 0,15 \wedge C_{\text{набл},i} > 0,15],$$

где S_i — площадь ячейки i , A — область интереса, $1[\cdot]$ — индикаторная функция. На основе E_+ и E_- вычисляются итоговые метрики:

$$E = E_+ + E_-,$$

$$E_s = |E_+ - E_-|,$$

$$E_{\text{гр}} = 2 \cdot \min(E_+, E_-).$$

Этап 3. Интерпретация результатов

Интерпретация результатов валидации в контексте задач навигационно-гидрографического обеспечения осуществляется по соотношению компонентов ошибки (табл. 2).

Таблица 2

Классификация моделей по соотношению компонентов ошибки

Model classification by error component ratio

Соотношение	Диагноз	Рекомендация
$E_{\text{гр}}/E < 0,5$	Доминирует ошибка площади	Модель применима для навигационных задач; возможна коррекция систематического смещения
$E_{\text{гр}}/E \geq 0,5$	Доминирует ошибка положения	Модель требует доработки для навигационных задач
$E_+ \gg E_-$	Консервативный прогноз	Приемлемо для навигации; возможны экономические потери
$E_- \gg E_+$	Оптимистичный прогноз	Опасно для навигации; требуется коррекция

Дополнительно рекомендуется анализировать пространственное распределение ошибок E_+ и E_- для выявления регионов с систематическими ошибками прогнозирования.

Этап 4. Рекомендации для операторов ГИС НГО

Результаты валидации транслируются в практические рекомендации для операторов ГИС НГО: отбор моделей с наименьшим $E_{\text{гр}}$ при сопоставимых значениях E ; определение регионов и сезонов применимости каждой модели; квантификация неопределённости через значения E_+ и E_- для отдельных районов; передача результатов автоматической валидации ледовому аналитику для принятия финального решения о применимости прогноза [10].

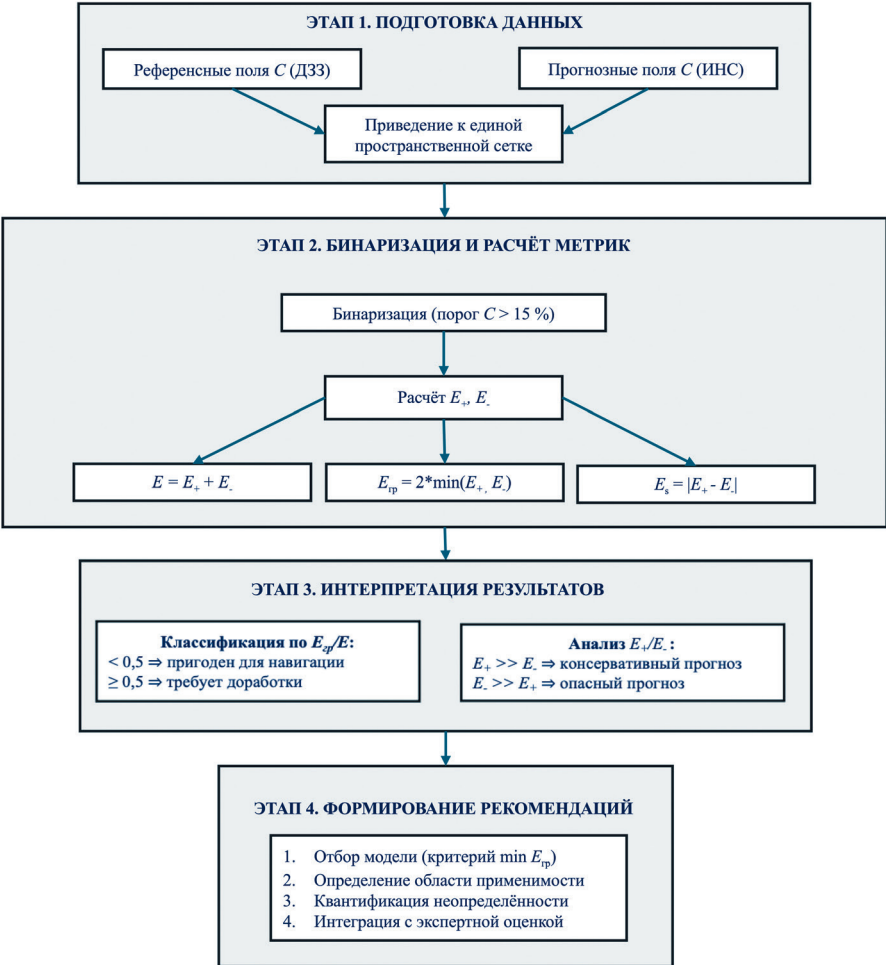
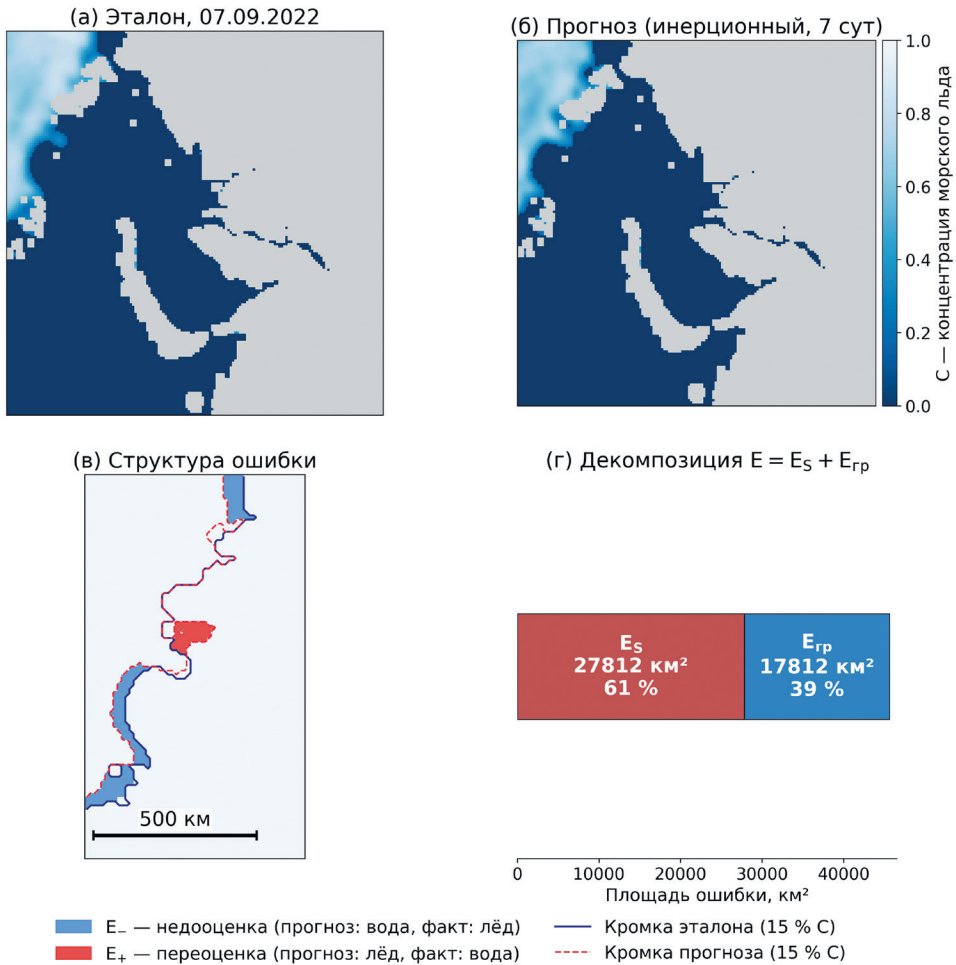


Рис. 1. Блок-схема методики валидации нейросетевых прогнозов ледовой обстановки на основе декомпозиции E .

Fig. 1. Flowchart of neural network sea ice forecast validation methodology based on Integrated Ice Edge Error decomposition.

Численный пример применения методики валидации прогноза концентрации морского льда на акватории Карского моря

В качестве иллюстрации применения методики приведён численный пример валидации одного прогноза концентрации морского льда на акватории Карского моря (рис. 2). Эталоном служит поле C из OSI SAF Climate Data Record на 07.09.2022 [9]; оцениваемым прогнозом — инерционный прогноз с заблаговременностью 7 суток, то есть перенос наблюдаемого состояния ледяного покрова



E_s — систематическая ошибка общей ледосодержащей площади
 E_{gp} — ошибка пространственного положения кромки

Рис. 2. Численный пример применения методики на акватории Карского моря (прогноз на 07.09.2022, заблаговременность 7 суток):

- а) концентрация морского льда по наблюдениям OSI SAF;
 б) прогнозируемое поле концентрации; в) пространственное распределение ошибок переоценки E_+ и недооценки E_- после бинаризации полей по порогу $C > 15\%$;
 г) разложение интегрированной ошибки на компоненты E_s и E_{gp} .

Fig. 2. Numerical example over the Kara Sea (persistence forecast for 07.09.2022, 7-day lead time): а) OSI SAF reference SIC; б) forecast SIC;
 в) OE/UE distribution after binarisation at SIC > 15 %; г) IIEE = AEE + ME decomposition.

на 31.08.2022 без изменений на дату 07.09.2022. Период соответствует фазе осеннего становления льда, в которую положение кромки меняется наиболее интенсивно. Расчёт по четырёхэтапной методике даёт: $\sigma_\epsilon = 0,051$; $\delta_{\text{ср}} = 0,010$; $E = 45\,625 \text{ км}^2$; $E_s = 27\,812,5 \text{ км}^2$; $E_{\text{гр}} = 17\,812,5 \text{ км}^2$; $E_{\text{гр}}/E = 0,39$.

Полученное значение σ_ϵ формально указывает на низкую ошибку прогноза, тогда как декомпозиция показывает, что 39 % полной интегрированной ошибки кромки относится к компоненту смещения $E_{\text{гр}}$ — ошибке положения границы (кромки) льда, не отражённой в показателе σ_ϵ . Значение $E_{\text{гр}}/E = 0,39$ удовлетворяет предложенному критерию применимости ($E_{\text{гр}}/E < 0,5$), относя данный прогноз к категории моделей с доминирующей ошибкой площади. Тем самым численный пример иллюстрирует основное свойство декомпозиции — способность выделить пространственную ошибку положения границы (кромки) льда даже при низких значениях агрегатных показателей. Проведение массовой статистической оценки предлагаемой методики на выборке нейросетевых прогнозов планируется в следующей работе авторов.

Заключение

Показано, что традиционные агрегатные метрики оценки качества прогнозов (σ_ϵ , $\delta_{\text{ср}}$, R^2) и нормативная процедура оправдываемости положения кромки льда по РД 52.27.759–2011 не выделяют ошибку пространственного положения кромки как самостоятельный класс. Декомпозиция интегрированной ледовой пограничной ошибки на компоненты E_s и $E_{\text{гр}}$ позволяет разделить два принципиально различных источника ошибок — ошибку общей площади и ошибку положения границы (кромки) льда; для задач навигационно-гидрографического обеспечения АЗРФ минимизация $E_{\text{гр}}$ имеет приоритет над минимизацией E_s , поскольку положение кромки льда непосредственно определяет безопасность маршрута.

Предложенная методика реализована как четырёхэтапный программный модуль геоинформационной системы. Методика не отменяет нормативную процедуру оправдываемости (РД 52.27.759–2011, §7.3.4.1.6; ГОСТ Р 72039–2025, §7.3.3), а расширяет её геоинформационной декомпозицией для пиксельных нейросетевых прогнозов на регулярной сетке. При практическом использовании рекомендуется анализировать соотношение E_+/E_- для выявления консервативных и оптимистичных прогнозов и проводить валидацию в акватории судоходных маршрутов.

Список литературы

1. Andersson T. R., Hosking J. S., Pérez-Ortiz M., et al. Seasonal Arctic Sea Ice Forecasting with Probabilistic Deep Learning // Nature Communications. 2021. Vol. 12. No. 1. C. 5124. doi: 10.1038/s41467-021-25257-4.
2. Миронов Е. У., Клячкин С. В., Макаров Е. И. и др. Особенности ледовых процессов в осенний период 2021 г. в морях Российской Арктики и оценка оправдываемости ледовых прогнозов // Российская Арктика. 2021. № 15. С. 40—53. doi: 10.24412/2658-4255-2021-4-40-53.
3. Миронов Е. У., Клячкин С. В., Фролов С. В. и др. Современное состояние и перспективы исследований ледяного покрова морей Российской Арктики // Российская Арктика. 2020. № 10. С. 12—21. doi: 10.24411/2658-4255-2020-12102.
4. Zakhvatkina N., Smirnov V. Satellite SAR Data-based Sea Ice Classification: An Overview // Geosciences. 2019. Vol. 9, No. 4. C. 152. doi: 10.3390/geosciences9040152.

5. Grigoryev T., Verezemskaya P., Krinitskiy M., et al. Data-Driven Short-Term Daily Operational Sea Ice Regional Forecasting // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, No. 22. С. 5837. doi: 10.3390/rs14225837.
6. Kvanum A. F., Palerme C., Müller M., et al. Developing a Deep Learning Forecasting System for Short-Term and High-Resolution Prediction of Sea Ice Concentration [Электронный ресурс]. 2024. URL: <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2024/egusphere-2023-3107/> (дата обращения: 11.04.2026). doi: 10.5194/egusphere-2023-3107.
7. Афанасьева Е. В., Алексеева Т. А., Соколова Ю. В., и др. Методика составления ледовых карт ААНИИ // *Российская Арктика*. 2019. № 7. С. 5—20. doi: 10.24411/2658-4255-2019-10071.
8. Goessling H. F., Tietsche S., Day J. J., et al. Predictability of the Arctic Sea Ice Edge // *Geophysical Research Letters*. 2016. Vol. 43, No. 4. С. 1642—1650. doi: 10.1002/2015GL067232.
9. Laverne T., Sørensen A. M., Kern S., et al. Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI Sea-Ice Concentration Climate Data Records // *The Cryosphere*. 2019. Vol. 13, No. 1. С. 49—78. doi: 10.5194/tc-13-49-2019.
10. Биденко С. И., Храмов И. С., Бенгерт А. А., Мучкаева И. С. Геоинформационная процедура оценки региональной ситуации на основе оперативного ИНС-анализа гидрометеорологической и экологической информации (на примере Обской губы) // *Гидрометеорология и экология*. 2022. № 68. С. 508—524. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-508-524.

References

1. Andersson T. R., Hosking J. S., Pérez-Ortiz M., et al. Seasonal Arctic sea ice forecasting with probabilistic deep learning. *Nature Communications*. 2021; 12(1): 5124. doi: 10.1038/s41467-021-25257-4.
2. Mironov E. U., Klyachkin S. V., Makarov E. I., et al. Features of ice processes in autumn 2021 in the seas of the Russian Arctic and evaluation of ice forecast reliability. *Rossiyskaya Arktika = Russian Arctic*. 2021; (15): (40—53). doi: 10.24412/2658-4255-2021-4-40-53. (In Russ.).
3. Mironov E. U., Klyachkin S. V., Frolov S. V., et al. Current state and prospects of studies of sea ice cover of the Russian Arctic. *Rossiyskaya Arktika = Russian Arctic*. 2020; (10): (12—21). doi: 10.24411/2658-4255-2020-12102. (In Russ.).
4. Zakhvatkina N., Smirnov V. Satellite SAR data-based sea ice classification: an overview. *Geosciences*. 2019; 9(4): 152. doi: 10.3390/geosciences9040152.
5. Grigoryev T., Verezemskaya P., Krinitskiy M., et al. Data-driven short-term daily operational sea ice regional forecasting. *Remote Sensing*. 2022; 14(22): 5837. doi: 10.3390/rs14225837.
6. Kvanum A. F., Palerme C., Müller M., et al. Developing a deep learning forecasting system for short-term and high-resolution prediction of sea ice concentration. 2024. Preprint. Available at: <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2024/egusphere-2023-3107/> (accessed on: 11.04.2026). doi: 10.5194/egusphere-2023-3107.
7. Afanas'eva E. V., Alekseeva T. A., Sokolova Yu. V., et al. Methodology of the AARI sea ice charts composition. *Rossiyskaya Arktika = Russian Arctic*. 2019; (7): (5—20). doi: 10.24411/2658-4255-2019-10071. (In Russ.).
8. Goessling H. F., Tietsche S., Day J. J., et al. Predictability of the Arctic sea ice edge. *Geophysical Research Letters*. 2016; 43(4): 1642—1650. doi: 10.1002/2015GL067232.
9. Laverne T., Sørensen A. M., Kern S., et al. Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI sea-ice concentration climate data records. *The Cryosphere*. 2019; 13(1): 49—78. doi: 10.5194/tc-13-49-2019.
10. Bidenko S. I., Khramov I. S., Bengert A. A., Muchkaeva I. S. Geoinformation procedure for regional situation assessment based on real-time ANN analysis of hydrometeorological and ecological information (case study of the Gulf of Ob). *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2022; (68): (508—524). doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-508-524. (In Russ.).

Сведения об авторах

Болховский Илья Дмитриевич, аспирант, кафедра информационных технологий и систем безопасности, Российский государственный гидрометеорологический университет, ilya.bolkhovsky@gmail.com.

Биденко Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, АО «НПО „Импульс»», главный эксперт управления инновационного развития и стратегического планирования, sibidenko@mail.ru.

Information about authors

Ilya D. Bolkhovskiy, postgraduate student of the Department of Information Technologies and Cybersecurity, Russian State Hydrometeorological University.

Sergey I. Bidenko, doctor of Technical Sciences, Professor, JSC “NPO Impuls”, Chief Expert of the Department of Innovative Development and Strategic Planning.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 09.02.2026

Принята к печати после доработки 24.06.2026

The article was received on 09.02.2026

The article was accepted after revision on 24.06.2026

УДК 910.4(092)

doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-523-531

**Иван Папанин:
эпоха становления от первых морских экспедиций
до управления Главсевморпути**

Алла Олеговна Волгушева

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург,
Volgusheva_irbis@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена жизненному пути Ивана Дмитриевича Папанина, который внес значительный вклад в освоение Арктики. На основе исторических документов анализируются истоки формирования его личности в детские годы, а также первые практические шаги в качестве участника морских и полярных экспедиций. Подробно рассматривается, как опыт ранних экспедиций и личные качества исследователя предопределили его выдвижение на пост руководителя Главсевморпути — мощного локомотива освоения природных богатств Арктики.

Ключевые слова: Иван Дмитриевич Папанин, история освоения Арктики, дрейфующая станция СП-1, Северный морской путь, Главсевморпуть.

Введение

В современной геополитике наблюдается возрастающий интерес к арктическому региону, в связи с чем возникает необходимость обращения к историческому опыту освоения русского Севера, в частности к фигуре Ивана Дмитриевича Папанина (1894—1986), дважды героя Советского Союза, контр-адмирала, который золотыми буквами вписан в историю освоение Арктики. Будучи не только героем-полярником, но и гениальным кризис-менеджером, он помогал стране выиграть битву за Арктику задолго до того, как это стало мировой тенденцией.

И. Д. Папанин, с одной стороны, был руководителем первой в мире дрейфующей станции «Северный полюс-1» (1937—1938), с другой — на его плечах лежал огромный спектр государственных задач и решений, с которыми он удивительным образом справлялся в нелегкое для страны время. В данной статье стоит



Выдающийся полярник,
дважды герой Советского Союза
Иван Дмитриевич Папанин.

цель проанализировать, каким образом деятельность И. Д. Папанина повлияла на институционализацию полярных исследований в СССР.

Путь в Арктику: становление лидера. Детство, отрочество, юность

Анализ автобиографии И. Д. Папанина в книге «Лед и пламень» дает ценный материал для реконструкции его детства и понимания социально-психологических истоков формирования его характера. Он родился в бедной семье матроса, в Корабельной стороне — отдаленном районе Севастополя. Семья была многодетной, но из девяти детей выжило лишь шесть. Его отец, Дмитрий Николаевич Папанин, был потомственным матросом, после действительной службы на флоте работал баржевым матросом, развозив по военным кораблям воду. Такая работа приносила нищенские заработки и семья бедствовала, но именно от отца И. Д. Папанин унаследовал организованность, флотскую дисциплину и любовь к морю. Про свою мать, Секлетию Петровну, он писал с неподдельной нежностью. Он любил ее самозабвенно и искренне, называя ее «горемычной, так и не узнавшей, что такое счастье» [1, с. 6]. Мать как могла старалась для семьи: обшивала детей, следила за их внешним видом и дети, несмотря на бедность, всегда были пострижены и чисто одеты.

Трудовая деятельность будущего исследователя началась в шестилетнем возрасте с рыбного промысла. Полученный улов был дополнительным источником дохода семьи. В детстве он также добывал деньги, ныряя за монетами, которые бросали в море богатые туристы. Заработок нырянием открыл Ивану глаза на классовое неравенство, но материнский наказ научил его главному: бедность не оправдывает бесчестие, а честно заработанная копейка позволяет ходить с высоко поднятой головой [1, с. 5—9]. Учеба в земской школе давалась ему достаточно легко, о чем свидетельствует ее окончание с отличием. Интерес к математике и географии также отражен в автобиографии.

Интересным представляется сопоставительный анализ публицистических материалов и личных воспоминаний И. Д. Папанина, где имеется явное расхождение. СМИ навязали героический миф о «призвании к Арктике», на самом деле имела место прагматическая мотивация личности. Юношеские стремления исследователя были ориентированы не на полюс, а на тропические широты, как пространство климатического комфорта и пищевого изобилия, избавленное от тягот сурового быта и холода [1, с. 15].

В автобиографии Иван Дмитриевич Папанин подчеркивал прикладной характер своего раннего профессионального опыта: работа в мастерских по производству мореходных приборов (учреждение «Лоция») стала для него первой ступенью социализации в морской среде, соединив ремесленное обучение с практическими нуждами военного флота.

Получив профессиональные навыки токаря, он к шестнадцати годам стал зарабатывать больше отца. Несмотря на сильную привязанность к семье и роль «опоры для матери», стремление к профессиональной самореализации и финансовой

независимости стало определяющим фактором для отъезда в Ревель, где он стал работать на крупном судостроительном предприятии, получая зарплату, превышавшую прежний доход вдвое [1, с. 23].

Трансформация личности в условиях общественно-политических катаклизмов первой четверти XX века

Жизненный путь И. Д. Папанина следует рассматривать сквозь призму процессов первой четверти XX столетия. Опыт Первой мировой и Гражданской войн, а также смена политических приоритетов стали определяющими моментами его биографии.

Военно-политическая биография И. Д. Папанина началась в 1914 г. с зачисления в личный состав Севастопольского военного порта. Смена государственного строя в 1917 г. способствовала его переходу в ряды Черноморского отряда Красной армии, где он проявил себя как активный участник боевых операций и инициатор формирования партизанских объединений на Крымском полуострове.

В начале 1920-х годов Папанин занимал ответственные посты в структуре морских сил Юго-Западного фронта и региональных подразделениях ВЧК, специализируясь на оперативной работе и противодействии антиправительственным формированиям. Сам Иван Дмитриевич Папанин характеризовал свою деятельность в органах ВЧК как период «предельного напряжения», обусловленный сложной оперативной обстановкой в послевоенном Крыму [1, с. 56].

Дальнейшая траектория карьеры была связана с работой в центральных аппаратах Наркомата морских дел и Наркомата почт и телеграфов в Москве.

В 1925 г. важнейшей вехой в преодолении информационной изолированности Якутской Автономной Социалистической Советской Республики (ЯАССР) стало развертывание государственного радиостроительства в её золотопромышленных районах. Значимый вклад в этот процесс внесла научно-техническая экспедиция Наркомата почт и телеграфов, организованная в сотрудничестве с нижегородской радиолaborаторией под руководством выдающегося инженера П. А. Острякова. Участие И. Д. Папанина в качестве заместителя начальника строительства мощной дуговой радиостанции на Алдане (г. Томмот) позволило досрочно сдать объект в эксплуатацию, заложив технологическую основу для интеграции удаленных территорий автономной республики в общесоюзную сеть связи [1, с. 75].

Успешная реализация данной миссии послужила отправной точкой для окончательного перехода И. Д. Папанина в сферу высокоширотных арктических исследований [2]. Оценивая значимость этого опыта в своих мемуарах, он подчеркивал, что именно со строительства радиостанции началась «северная повесть» его жизни [1, с. 78].

Следует отметить, что алданский период не только предопределил дальнейший вектор профессиональной деятельности И. Д. Папанина, позволив выработать комплекс управленческих и тактических навыков для руководства последующими полярными экспедициями, но и создал объективные предпосылки для его

дальнейшего теоретико-практического обучения: по возвращении в Москву он совмещал подготовку на Высших административных курсах связи с обучением в качестве слушателя первого факультета связи во Всесоюзной плановой академии (ВПА) при Госплане СССР [1, с. 78].

Закалка Севером: опыт руководства полярными станциями (1931—1936)

Историки отмечают, что именно в период с 1931 г. по 1935 г. сформировался «героический канон» и методическая база его управленческой деятельности [4]. Хронология и масштаб арктических кампаний И. Д. Папанина в 1931—1935 гг. фиксируют закономерный рост уровня его ответственности и последовательное усложнение его организаторских функций.

Высокоширотный рейс на ледокольном пароходе «Малыгин» (июль 1931 г.)

Летом 1931 г. Германия организовала арктическую научно-исследовательскую экспедицию на дирижабле «Граф Цеппелин» для изучения ледового покрова и уточнения географических координат полярных архипелагов. В рамках межгосударственных соглашений СССР разрешил полет над своей территорией при условии участия советских специалистов и обмена научными данными. Для проведения запланированного в бухте Тихой (Земля Франца-Иосифа) почтового обмена с дирижаблем и специального гашения марок Наркомат почт и телеграфов СССР направил на ледоколе «Малыгин» И. Д. Папанина, возглавившего развернутое на судне временное отделение связи, что подчеркивало статус СССР как равноправного игрока в полярных широтах. Успех И. Д. Папанина в обеспечении взаимодействия между ледоколом и дирижаблем закрепил за ним репутацию блестящего организатора в экстремальных условиях.

Необходимо отметить еще один важный эпизод, случившийся в экспедиции на «Малыгине», — это знакомство с выдающимися полярниками, среди которых были Р. Л. Самойлович и В. Ю. Визе, которые повлияли на решение И. Д. Папанина поменять административную работу в Москве на Арктику [3, с. 42]. Можно сказать, что В. Ю. Визе стал «крестным отцом» И. Д. Папанина в полярной науке, а также, как отмечает сам И. Д. Папанин в мемуарах «Лед и пламень», именно рекомендации Визе способствовали его дальнейшему продвижению по административной линии в Главсевморпути [1].

И хотя большинство исследователей считают, что в дальнейшем отношения между Владимиром Визе и Иваном Папаниным представляли собой сугубо профессиональное сотрудничество, в массиве личной переписки И. Д. Папанина, хранящейся в Центральном государственном архиве научно-технической документации Санкт-Петербурга (далее ЦГАНТД СПб), выделяется сугубо конфиденциальное обращение В. Ю. Визе. Автор просит о содействии в приобретении дефицитного медицинского препарата, производство которого только осваивалось советской фармацевтической промышленностью. Свободное распределение

данного лекарственного средства в аптечной сети отсутствовало, а его получение напрямую зависело от доступа к системе номенклатурного обеспечения — Центральной (Кремлевской) аптеке, возможностями которой И. Д. Папанин, в силу своего административного статуса, несомненно, располагал.

Полярная станция в бухте Тихой (1932—1933)

Если в 1931 г. на «Малыгине» И. Д. Папанин выполнял узкоспециализированные функции представителя Наркомпочтеля [1], то уже на Земле Франца-Иосифа (1932—1933) под его началом находился крупный коллектив из 35 человек, включая строителей и научных сотрудников [5]. Для участия в этой экспедиции И. Д. Папанин даже оставил учебу во Всесоюзной плановой академии [6, с. 10]. В результате станция была полностью модернизирована и превращена в крупнейшую в мире обсерваторию. Успешно была выполнена программа Второго Международного полярного года. Возведены новые жилые дома, ангары, гидрологический домик. Внедрен жесткий санитарный контроль [8].

Полярная станция на мысе Челюскин (1934—1935)

Организационным триумфом «папанинского метода» администрирования стала экспедиция на мыс Челюскин (1934—1935). В рамках системного освоения Северного морского пути отряд из 25 специалистов во главе с И. Д. Папаниным в условиях абсолютной изоляции возвел передовой научно-технический комплекс на крайней северной материковой точке Евразии [7]. Уникальной особенностью этой зимовки стало привлечение его супруги, Галины Кирилловны Папаниной, в качестве руководителя метеорологической станции и административно-хозяйственной работы, что оказало существенное воздействие на психологический климат внутри замкнутой социальной группы. Итогами этой экспедиции были построение с нуля мощного научно-исследовательского полярного комплекса, возведение здания радиоцентра, магнитной и метеорологической обсерваторий, запуск первой в Арктике ветроэлектростанции [1, с. 115—117].

Административно-снабженческая деятельность И. Д. Папанина на дрейфующей льдине (21 мая 1937 г. — 19 февраля 1938 г.)

Станция «Северный полюс-1» стала первым в мировой истории успешным опытом круглогодичного научно-исследовательского дрейфа в экстремально высоких широтах. До середины 1930-х гг. эксперты сходились во мнении, что организация жизнедеятельности на дрейфующих льдах в период полярной ночи технически невозможна. Коллектив СП-1 опроверг этот скептический тезис, впервые в истории превратив дрейфующую льдину в полноценную, автономную научную лабораторию.

Успех экспедиции во многом предопределила скрупулезная кадровая работа: И. Д. Папанин лично формировал команду, оценивая кандидатов не только по профессиональным навыкам, но и по фактору психологической совместимости



Палатка дрейфующей станции «Северный Полюс-1».

в условиях изоляции. В результате этот жесткий отбор прошли геофизик Е. К. Федоров, океанолог П. П. Ширшов и радист Э. Т. Кренкель. Несмотря на то, что истории данного дрейфа посвящено множество трудов (включая мемуары самого И. Д. Папанина и Э. Т. Кренкеля) [9, 10, 11], личные заметки Е. К. Федорова долгое время оставались неизданными. Их последующая публикация позволила исследователям заглянуть за кулисы официальной хроники. Дневники Е. К. Федорова ценны именно тем, что они детально описывают внутреннюю атмосферу на льдине, показывая, как на практике сработал папанинский подход к подбору команды [9].

Тяжелейшие условия труда полярников подтверждают дневниковые записи Э. Т. Кренкеля. Согласно его источникам, личный состав работал на пределе возможностей: рабочий день начинался в шесть часов утра и продолжался до десяти вечера, прерываясь на обед лишь в 18:00. При этом П. П. Ширшов и Е. К. Федоров отдавали научным наблюдениям до шестнадцати часов в сутки, фактически жертвуя временем на отдых и сон.

Сам Э. Т. Кренкель был горд, что кормил коллектив духовной и материальной пищей, так как находился либо на радиостанции, либо на кухне, а наружные работы (присмотр за грузом, осмотр баз) лежал на И. Д. Папанине. Что касается питания, то Э. Т. Кренкель описывает достаточно разнообразное меню обеденного стола путешественников: на первое — супы: гороховый, перловый, борщ, свежие щи, свежая уха. На второе — каша, куриные и мясные котлеты, свежая свинина,

рыба, зеленый горошек, охотничьи сосиски. На третье — чай, кофе, какао, компот, кисель [11, с. 69].

Успех снабжения и обустройство быта стали возможными главным образом благодаря личным усилиям И. Д. Папанина. Прошедший через лишения трудного детства и дефицит базовых жизненных благ в юности, он обладал уникальным практическим опытом выживания и обостренным пониманием ценности человеческого ресурса. Именно поэтому он придавал особое значение бытовым вопросам: лично контролировал калорийность и разнообразие рациона питания, конструировал максимально теплые жилые палатки и брал на себя весь объем тяжелого физического труда. Такая снабженческая стратегия полностью освободила ученых от бытовой рутины и стала ключевым фактором сохранения здоровья и психологической стойкости коллектива в экстремальных условиях Севера.

В своем дневнике Иван Дмитриевич Папанин писал, что подготовка продуктов была поручена Институту инженеров общественного питания, который разработал для них систему сублимированных пищевых концентратов, но были и продукты, не подвергавшиеся никакой обработке, помимо сушки и прессования. Ассортимент продуктов состоял из сорока шести наименований, все упаковывалось в тридцать пять жестяных бидонов по сорок четыре килограмма каждый. В бидоны закладывались сливочное масло, паюсная икра, сало, корейка, плавленый сыр, рис, мука, компот, крахмал, сухари, сухой лук, шоколад, кофе и многое другое [9, с. 17]. Такой подход к питанию полностью исключил риски возникновения возможных заболеваний (в частности, цинги) и обеспечил непрерывность работы научно-исследовательского контингента в высоких широтах.

Одежда и обувь путешественников состояла из шелкового и шерстяного белья, шерстяных костюмов, носков, чулок из меха собаки, валенок с калошами, штанов, рубашек из оленьих шкур, шапок из меха россомахи, пуховых комбинезонов, кожаных сапог, кожаных пальто, брезентовых плащей. По словам И. Д. Папанина, они сами продумывали фасоны своей одежды, чтоб она была удобной и теплой. Кроме этого, имелись запасы одеколона, бритв для бритья, зубных щеток и прочих необходимых мелочей [9, с. 19]. Общий вес снаряжения составлял девять тонн. Следует заметить, что подобный грамотный подход был уникальным и резко отличался от общепринятых стандартов прежних экспедиций. Сам И. Д. Папанин знал их печальный опыт и категорически боялся его повторить.

Еще одним участником экспедиции должен был стать В. Ю. Визе, но врачебная комиссия не допустила его по причине заболевания сердца, между тем именно В. Ю. Визе имел за своими плечами печальный опыт во время экспедиции Г. Я. Седова к Северному полюсу. Из-за спешной закупки у архангельских купцов провианта экспедиция осталась с дефицитом недоброкачественных продуктов. Гнилая пища вызвала цингу, от которой умерли механик И. А. Зандерс и командир Г. Я. Седов. Ситуацию осложняло отсутствие зимней одежды. Например, И. А. Зандерс все два года провел в одном пиджаке, в котором его и похоронили на Земле Франца-Иосифа [12, с. 339].

Таким образом, экспедиция подтвердила жизнеспособность человека в экстремальных условиях Центральной Арктики, а также доказала надежность

советской техники, приборов и мобильного жилья, выдержавших полярные морозы. Возвращение четырех участников вызвало колоссальный общественный резонанс. Экспедиция завершилась без жертв, все полярники помимо высших государственных наград и званий Героев Советского Союза получили уникальное признание со стороны академического сообщества — Президиум Академии наук СССР присудил им докторские степени по географическим наукам на основе реальных заслуг и без написания диссертационных работ.

Кадровая ротация в руководстве Главсевморпути в 1939 г.: институциональные и политические аспекты

4 марта 1939 г. начальником Главного управления Северного морского пути (ГУСМП) при СНК был назначен И. Д. Папанин вместо академика О. Ю. Шмидта, который был переведен на другую работу в связи с трансформацией государственной арктической политики. От точечных географических открытий правительство переходило к индустриальному освоению Арктики в рамках индустриализации всей промышленности. Академический подход Отто Юльевича Шмидта больше не отвечал требованиям времени. Правительству требовался жесткий администратор для форсированного развития портовой инфраструктуры и модернизации ледокольного флота. Иван Дмитриевич после успешного завершения дрейфа Северного полюса-1 по всем критериям полностью соответствовал должности.

Под его началом Главсевморпуть превратился в мощный инструмент государственной арктической политики. За годы его управления суровое побережье Северного Ледовитого океана преобразилось: в строй вступали передовые ледоколы и транспортные суда, возводились высокотехнологичные порты, множилась сеть полярных станций и научных обсерваторий. Небо над Арктикой осваивалось новыми воздушными маршрутами, а недра советского Заполярья открывали свои богатства в ходе широкомасштабной геологической разведки, давшей импульс к интенсивному промышленному освоению новых полярных территорий.

В 1940 г. под руководством И. Д. Папанина была организована блестящая экспедиция по выводу из льдов Арктики ледокола «Георгий Седов», за которую он был вторично удостоен звания Героя СССР.

Заключение

Таким образом, в масштабных предвоенных достижениях Главсевморпути отчетливо прослеживается взаимосвязь между личностными качествами руководителя и результатами его государственной деятельности. Ранний период жизни на южных морских рубежах страны не просто закалил И. Д. Папанина, но и сформировал его профессиональные интересы, которые он реализовал в ходе первых арктических экспедиций. Ввод в строй мощных ледоколов, открытие новых авиатрасс и расширение сети полярных станций в предвоенные годы стали практическим воплощением организаторского таланта и характера исследователя, сумевшего подчинить государственным интересам освоение сложнейшего арктического региона.

Список литературы

1. Папанин И. Д. Лед и пламень. — 2-е изд. — М.: Политиздат, 1984. — 430 с.
2. Тихомиров Г. С. Герой Арктики Иван Папанин. — М.: Наука, 1984. — 192 с.
3. Дукальская М. В. Из истории освоения Земли Франца-Иосифа // Российские полярные исследования. 2014. № 3 (17). С. 41—45.
4. Лапина С. А. И. Д. Папанин и экспедиция «СП-1» в детской литературе: механизмы формирования героического канона // Русская Арктика. 2022. № 16. С. 4—15.
5. Емелина М. А. Советские полярные станции на Земле Франца-Иосифа в 1929—1941 гг. // Полярные чтения — 2014. Материалы международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 28—29 апреля 2014 г.). — СПб: Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 2015. — С. 110—121.
6. Сюзюмов Е. Иван Дмитриевич Папанин. Арктические дрейфующие станции — М.: Мысль, 1975. — 175 с.
7. 10 полярных дел Ивана Папанина // GoArctic.ru : экспертный центр по развитию Арктики. — 2019. — URL: goarctic.ru (дата обращения: 30.05.2026).
8. Члиянц Г. Из истории полярной связи: бухта Тихая и мыс Челюскин // Электросвязь. 2011. № 7. С. 11—13.
9. Папанин И. Д. Жизнь на льдине. Дневник. — М.: Мысль, 1972. — 310 с.
10. Федоров Е. К. Полярные дневники. — Л.: Ленинград Гидрометеиздат, 1979 — с. 312
11. Кренкель Э. Т. Четыре товарища: дневник — М.: Худож. лит., 1940. — 312 с.
12. Волгушева А. О. Владимир Юльевич Визе — ученый-полярник, художник, писатель, честный человек. // Гидрометеорология и экология. 2025. № 79. С.337—332.
13. Постановление Совета Народных Комиссаров. О назначении т. Папанина И. Д. Начальником Главного управления Северного Морского Пути при СНК СССР и т. н. Ширшова П. П. первым заместителем Начальника Главного управления Северного Морского Пути при СНК СССР. 4 марта 1939 г. № 264.
14. Филин П. А. Главсевморпуть в 1930-е гг.: от романтики к плановому хозяйству / П. А. Филин // Труды Арктического и антарктического научно-исследовательского института. — 2018. — Т. 360. — С. 45—58.

Информация об авторе

Волгушева Алла Олеговна, кандидат исторических наук, доцент, кафедра истории, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Volgusheva_irbis@mail.ru.

Information about authors

Volgusheva Alla Olegovna, Ph.D. Historical Sciences, Associate Professor, Department of History, Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II.

Статья поступила 31.05.2026

Принята в печать 24.08.2026

The article was received on 31.05.2026

The article was accepted on 24.08.2026

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 84

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Литературный редактор Л. В. Кипнес, канд. пед. наук, доцент
Технический редактор М. В. Иванова

Выход в свет 06.10.2026. Формат 70×100 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Электронно-сетевое издание. Усл. печ. л. 10,725. Заказ № 1525 .
Адрес издателя, редакции и типографии: РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет
