

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 81

Научно-теоретический журнал

Издается с октября 2005 года

Выходит 4 раза в год

ISSN 3034-4190

Санкт-Петербург
РГГМУ
2025

УДК 001(051.2)«540.1»
ББК 72я5

Гидрометеорология и экология. № 81. Научно-теоретический журнал. Санкт-Петербург : РГГМУ, 2025. 151 с.

Представлены статьи по наиболее актуальным современным проблемам изучения природной среды: изменениям климата в региональном и глобальном масштабах; мониторингу, моделированию и прогнозированию физических процессов в атмосфере, водах суши и морской среде; влиянию 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*
Леонтьев Д. В., канд. юрид. наук, проректор по развитию и научной работе РГГМУ — *зам. председателя 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); **Камболов 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; **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.; **Любанов В. А.**, д-р техн. наук, проф.; **Мохов И. И.**, д-р физ.-мат. наук, академик РАН; **Мушкет И. И.**, д-р юрид. наук, проф.; **Прощутинский 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; **Рябенко 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-ра 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), 2025

© Авторы публикаций, 2025

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

№ 81

A theoretical research journal

Published since October, 2005
4 issues a year

ISSN 3034-4190

St. Petersburg
RSHU
2025

UDC 001(051.2)«540.1»
LBC 72я5

Hydrometeorology and Ecology. No. 81. St. Petersburg : RSHU Publishers, 2025. 151 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*

Leont'ev D. V., PhD in Juridical Sciences, Vice-Rector for Development and Research of RSHU — *Vice-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; **Mokhov I. I.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Academician of the Russian Academy of Sciences; **Mushket I. I.**, Grand PhD in Juridical Sciences, Professor; **Proshutinskiy 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); **Shchukin 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 № ФЦ77-79574 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), 2025
© Authors of publications, 2025

ISSN 3034-4190

Содержание

Климатология

- М. Л. Арушанов.* О причинах экстремальных изменений климата планеты
Земля на вековых и тысячелетних временных масштабах 607

Метеорология

- А. В. Степанов, В. В. Дорофеев.* Влияние природных зон равнинной местности на временную изменчивость динамической наклонной полетной видимости при низкой облачности в типовых синоптических ситуациях циклона 623
- Д. В. Тимошенко, Г. В. Куповых.* Влияние аэрозольного загрязнения воздуха на суточные вариации электрического поля вблизи поверхности земли . . . 634

Океанология

- Л. А. Тимохов, И. Е. Фролов, В. А. Белязо, А. А. Дмитриев, О. А. Трошичев.*
Сопряженность долгопериодных колебаний ледовитости арктических морей и астрогеофизических факторов 644

Гидрология

- В. С. Вуглинский, В. А. Сушкова, Л. С. Курочкина.* Уровненный режим озера Балхаш и его изменения в условиях нестационарного климата 666

Экология

- С. В. Александров, Ю. А. Горбунова, Н. В. Двоеглазова.* Трансформация биогенного стока минерального азота фитопланктоном в эстуарии реки Преголи 680
- А. А. Ершова, Е. А. Голубева, Е. В. Антонов, Е. А. Сердюкова.*
Сравнительный анализ результатов учета морского мусора наземными и дистанционными (БПЛА) методами на побережье архипелага Новая Земля в 2023 г. 699

Экология. Обзор

- Я. Е. Бразовская, Д. М. Авдыш.* Применение метода PROMETHEE для комплексной оценки экологических факторов на транспорте. 718

Хроника

- РГГМУ — 95 лет 728
- А. О. Волгушева.* Отто Юльевич Шмидт — человек-символ. 734
- В. Л. Семенов-Тян-Шанский.* Вениамин Петрович Семенов-Тян-Шанский — уникальный исследователь с непростой судьбой 742

Contents

Climatology

- M. L. Arushanov.* Causes of extreme climate change on planet Earth
on Low-frequency time scales 607

Meteorology

- A. V. Stepanov, V. V. Dorofeev.* The influence of natural zones of flat terrain
on the temporal variability of flight visibility in low clouds 623
- D. V. Timoshenko, G. V. Kupovykh.* The effect of aerosol air pollution on diurnal
variations in the electric field near the earth's surface 634

Oceanology

- L. A. Timokhov, I. E. Frolov, V. A. Belyazov, A. A. Dmitriev, O. A. Troschichev.*
Conjugation of long-term fluctuations of Arctic Sea ice and astrogeophysical
factors 644

Hydrology

- V. S. Vuglinsky, V. A. Sushkova, L. S. Kurochkina.* Water level regime of lake
Balkhash and its changes in conditions of a non-stationary climate 666

Ecology

- S. V. Aleksandrov, Y. A. Gorbunova, N. V. Dvoeglazova.* Transformation
of nutrient runoff of mineral nitrogen by phytoplankton in the Pregolya
Estuary 680
- A. A. Ershova, E. A. Golubeva, E. V. Antonov, E. A. Serdyukova.* Comparison
of results of ground-based and remote (UAV) methods of marine debris
monitoring on the coast of the Novaya Zemlya archipelago in 2023. 699

Ecology. Review

- Y. E. Brazovskaya, D. M. Avdysh.* Application of the PROMETHEE method
for a comprehensive assessment of environmental factors in transport 718

- Chronicle** 728

Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 607—622.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(81):607—622.

КЛИМАТОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.583

doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-607-622

О причинах экстремальных изменений климата планеты Земля на вековых и тысячелетних временных масштабах

Михаил Львович Арушанов

Научно-исследовательский гидрометеорологический институт Ташкент, Узбекистан,

mikl-arushanov@rambler.ru

Аннотация. Дан обзор работ, посвящённых исследованию возможных причин катастрофических изменений климата на планете Земля. Главная причина таких изменений обусловлена воздействием внешнего фактора на солнечную систему в целом, т. е. галактического излучения повышенной интенсивности, воздействующего с определённой цикличностью и проявляющегося в изменении климатической системы планет. Выполнен анализ временных рядов реконструированной по соотношению изотопов кислорода $\delta^{18}\text{O}$ ледяных кернов температуры и диоксида углерода в Антарктиде и Гренландии за период 400×10^3 лет. С использованием спектрального и вейвлет-анализов установлено, что экстремальные изменения климата происходят с периодами кратными 12 000 лет и носят импульсный характер. На основе причинного анализа показано, что в палеоклиматическом масштабе изменение концентрации CO_2 происходит с запаздыванием ≈ 500 лет относительно температуры воздуха.

Ключевые слова: климатическая система, 12 000-летний цикл, температура воздуха, диоксид углерода, производство энтропии, галактические ударные волны.

Для цитирования: Арушанов М. Л. О причинах экстремальных изменений климата планеты Земля на вековых и тысячелетних временных масштабах // Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 607—622. doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-607-622.

CLIMATOLOGY

Original article

Causes of extreme climate change on planet Earth on Low-frequency time scales

Mikhail L. Arushanov

Scientific Research Hydrometeorological Institute Tashkent, Uzbekistan,

mikl-arushanov@rambler.ru

Summary. This paper reviews studies investigating the possible causes of catastrophic climate change on planet Earth. The authors of many studies, like the author of this article, believe that the primary cause

of such changes lies in the impact of an external factor on the solar system as a whole—increased galactic radiation, which acts in a certain cyclical manner and, as a result, manifests itself in changes in the planetary climate system.

A time series analysis of temperature and carbon dioxide data in Antarctica and Greenland, reconstructed from the oxygen isotope ratio $\delta^{18}\text{O}$ in ice cores, was performed over a period of 400×10^3 years. Using spectral and wavelet analyses, it was established that extreme climate changes occur with periods of multiples of 12,000 years and are impulsive in nature. A causal analysis has shown that, on a paleoclimatic scale, changes in CO_2 concentration occur with a lag of ≈ 500 years relative to air temperature dynamics. This lag period corresponds to the time of complete mixing of the upper (active) layer of the World Ocean.

Keywords: climate system, air temperature, carbon dioxide, entropy production, galactic shock waves, core displacement, 12,000-year cycle.

For citation: Arushanov Mikhail L. Causes of extreme climate change on planet Earth on Low-frequency time scales *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(81):(607—622). doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-607-622 (In Russ.).

Введение

Климатическая система — сложная система с обратными связями, находящаяся под воздействием внешних (космических) и внутренних факторов, включающая атмосферу, гидросферу, биосферу, криосферу и литосферу, а также ядро Земли. Взаимодействие этих сфер определяет климат Земли и его изменчивость. Проблема современных изменений климата поставила задачу поиска фундаментальных причин экстремальных изменений климата на вековых и геологических временных масштабах.

На рис. 1 приведена динамика катастрофических явлений на планете Земля [1], начиная с 1900 г. и по настоящее время. Количество многих катастрофических явлений на планете Земля, начиная с 1998 г., стало возрастать по экспоненте. Геологическая история планеты свидетельствует, что Земля уже неоднократно переживала разные фазы глобального изменения климата. Важно отметить, что аналогичные изменения в климатической системе происходили и на других планетах.

Х. Генрих по реконструированным данным донных отложений морей, озёр и рек восстановил резкие скачки температуры за последние 130 тыс лет («события Генриха») [2]. Каждому такому циклу соответствуют кратковременные периоды оледенения, которым предшествовали резкие потепления на планете на $8\text{—}10^\circ\text{C}$. Выполнив датировку «событий Генриха», С. Хемминг получила периодичность резких изменений температуры, в которой выделяются события 12 000-летнего цикла [3, 4].

Этот вывод подтверждается анализом периодичности таяния массивных ледников по углероду-14, выполненным Д. Вогтом [5]. По его расчётам период 12 068 лет проявляется и в солнечных циклах. Один солнечный цикл длится около 11,09 года, восемь таких интервалов, известных как цикл Гляйсберга [6], проявляющийся в вариациях интенсивности 11-летних циклов Швабе, имеют расчётную длительность 88,735 лет, а 136 циклов Гляйсберга дают число 12 068, которое следует считать циклом Вогта. Д. Вогт в работах [5, 7—9] показал, что период 12 068 лет экстремальных изменений климатических систем наблюдается также на планетах солнечной системы и связан, вероятно, с соответствующим периодом *синхронных* вспышек новых (но не сверхновых) звезд, невидимых с Земли.

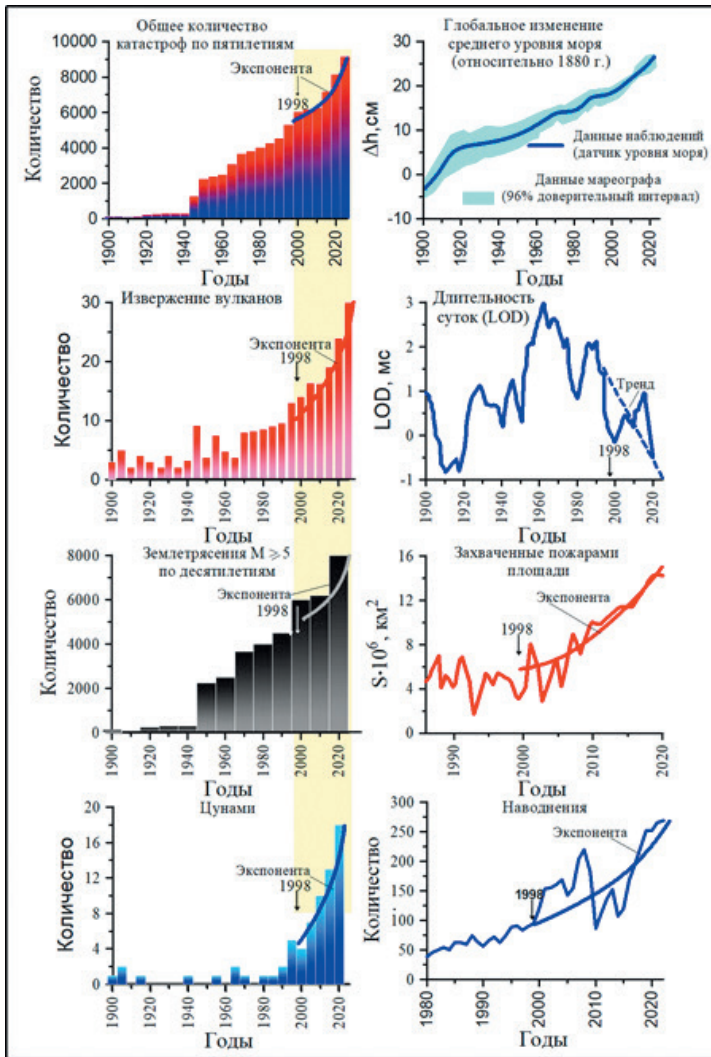


Рис 1. Динамика катастрофических явлений на планете Земля [1].

Fig. 2. Dynamics of catastrophic events on planet Earth [1].

Недавно по выполненным исследованиям на основе телескопа *Fermi Large Area Telescope* установлено, что многие классические новые звезды сопровождаются гигаэлектронвольтным γ -излучением, возникающим из-за сильных ударных волн [10—12].

Авторы в цикле работ [13—19], в отличие от подхода Д. Вогта, связывают возросшее число катастрофических явлений с пересечением планеты проекции галактического магнитного поля на плоскость эклиптики, влияющее на движение

заряженных частиц [15]. Делается упор на ускорение дрейфа магнитных полюсов, вызванного смещением ядра в 1998 г., ответственного за формирование магнитосферы Земли. Авторы ограничиваются рамками солнечной системы, уделяя основное внимание проявлению цикличности вариаций солнечной активности в цикличности геодинамических процессов, в частности землетрясений, и их прогнозу.

В пользу галактического фактора экстремального изменения климатической системы в настоящую эпоху выступают факты аналогичных изменений на планетах солнечной системы. Так, по данным работы [20] в настоящее время в эпицентре глобальных изменений находится Юпитер. По данным телескопа «Хаббл», «красные пятна» на Юпитере в настоящее время выступают над облаками. Это является индикатором повышения температуры Юпитера в этой области, что ранее не наблюдалось. Кроме того, участились вспышки аномально сильных молний и увеличилось количество извержений вулканов на спутнике Юпитера Ио.

На Венере, по данным орбитального аппарата «*Venus Express*», выявлено 37 новых вулканических структур [21], хотя планетологи считали, что геологическая активность на Венере завершилась как минимум 800 млн лет назад. Как и на Земле, на Венере растёт магматическая активность. Скорость ветров после 1998 г. увеличилась с 300 до 400 км/час.

На планете Марс, начиная с 1998 г., наблюдаются усиления процессов, связанных с пыльными бурями, оползнями, магнитной аномалией, ростом сейсмической активности, таянием льда, нагреванием планеты [22], т.е. наблюдаются аналогичные изменения в климатической системе, происходящие на Земле.

После 1996 г. произошли глобальные перестройки в атмосфере Нептуна. Это связано с проникновением в нижние слои атмосферы галактических космических лучей, которые оказывают влияние на образования штормов и ураганов [22]. Начался стремительный прогрев планеты Уран и, как следствие, на ранее спокойной планете бушуют мощные штормы [22].

Что же явилось причиной наблюдаемых изменений в климате планет Солнечной системы? Очевидно, что синхронные изменения на планетах Солнечной системы могут быть вызваны только внешним фактором, которым, по мнению Вогта, является воздействие галактического излучения. При этом такое воздействие, прежде всего, сказывается в смещении ядер планет (его скачке), зафиксированное в 1998 г. аппаратурой *DORIS*. В работе [23] показано, что влияние действия внешних факторов на Солнечную систему таково, что изменения климатических систем на планетах происходят синхронно. Солнце здесь не является исключением, а указанная синхронность проявляется в динамике солнечной активности.

Хотя в настоящее время достигнут большой прогресс в понимании изменений климата на основе физико-химических исследований атмосферных процессов и численного моделирования, фундаментальные причины их экстремальных изменений остаются под вопросом. Целью данной работы является подтверждение существования 12 000-летнего цикла экстремальных изменений климатической системы планет, в частности, планеты Земля, по данным временных рядов, восстановленных на основе изотопного анализа керна льда в Антарктиде и Гренландии температуры воздуха и концентрации CO_2 .

Данные и методы

В работе используются данные температуры приземного воздуха и диоксида углерода, реконструированные по соотношению изотопов кислорода O^{18}/O^{16} ледяных кернов в Гренландии (Гренландский проект ледяного керна (*North Greenland Ice Core Project – NGRIP*))² и Антарктиде [24—28]. Методы анализа динамики исследуемых характеристик основывались на использовании корреляционного, спектрального [29] и причинного [30, 31] анализов, вейвлет-преобразовании [32]. Причинный анализ был разработан относительно недавно (90-е гг. прошлого столетия) и нашёл довольно широкое применение в решении прикладных задач геофизики [31, 33—38] и в прикладных задачах квантовой механики [39—42]. Однако он пока не нашел широкого применения в решении прикладных задач метеорологии, поэтому остановимся на нём несколько подробнее.

Пусть $X(t)$ и $Y(t)$ — два исследуемых процесса, реализация которых представляются временными рядами с равными синхронными временными отсчётами $t = 1, 2, \dots, T$. При наличии причинной зависимости, необходимым условием которой является запаздывание, т.е. асимметричность событий, задача сводится к формализации этой асимметрии. Для этого рассматриваются шенноновские безусловные $H(X)$, $H(Y)$ и условные $H(X|Y)$, $H(Y|X)$ энтропии [43]:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^N P(X_i) \log_2 P(X_i), \quad H(Y) = -\sum_{j=1}^M P(Y_j) \log_2 P(Y_j), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} H(X|Y) &= -\sum_{j=1}^M P(Y_j) \sum_{i=1}^N P(X_i|Y_j) \log_2 P(X_i|Y_j), \quad H(Y|X) = \\ &= -\sum_{i=1}^N P(X_i) \sum_{j=1}^M P(Y_j|X_i) \log_2 P(Y_j|X_i), \end{aligned} \quad (2)$$

где $P(X_i)$, $P(Y_j)$ — безусловные вероятности i -го (j -го) уровней процессов X и Y соответственно; $P(X_i|Y_j)$, $P(Y_j|X_i)$ — соответствующие условные вероятности.

Тогда с учётом (1) и (2) условная α и безусловная β асимметрии запишутся в виде:

$$\alpha = \frac{H(Y)}{H(X)}, \quad 0 \leq \alpha \leq \infty, \quad \beta = \frac{H(Y|X)}{H(X|Y)}, \quad 0 \leq \beta \leq \infty. \quad (3)$$

Далее вводим функцию независимости i :

$$i_{Y|X} = \frac{H(Y|X)}{H(Y)}, \quad i_{X|Y} = \frac{H(X|Y)}{H(X)}, \quad 0 \leq i \leq 1. \quad (4)$$

¹ Содержание изотопа кислорода O^{18} выражается как отклонение отношения изотопов O^{18}/O^{16} в образце от стандартного соотношения, выраженное в промилле.

² Реализация проекта началась недалеко от центра Гренландии с бурения в 1999 г., которое было завершено в коренных породах в 2003 г.

Легко видеть, что выражения (4) определяют односторонние зависимости процессов. Действительно, при $i_{Y|X} = 1$ Y не зависит от X , при $i_{Y|X} = 0$ Y является однозначной функцией X . Равенству между независимостями может соответствовать предельный случай $i_{Y|X} = 1 \Leftrightarrow i_{X|Y} = 1$.

И, наконец, вводится функция причинности Υ :

$$\Upsilon = \frac{i_{Y|X}}{i_{X|Y}}, \quad 0 \leq \Upsilon \leq \infty. \quad (5)$$

Очевидный смысл функции причинности Υ вытекает из ее предельных значений:

- $\Upsilon = 0$ — предельно необратимый процесс $X \rightarrow Y$, Y является однозначной функцией X , но не наоборот;
- $\Upsilon = 1$ — отсутствие какой-либо причинной связи между X и Y ;
- $\Upsilon = \infty$ — предельно необратимый процесс $Y \rightarrow X$, X является однозначной функцией Y , но не наоборот.

Классификация любых типов взаимосвязи процессов X и Y наглядно представлена на энтропийной диаграмме в координатах α, β (рис. 2). Аналогично, анализируя предельные случаи и принимая во внимание обратимость информации

$$I = H(Y) - H(Y|X) = H(X) - H(X|Y),$$

получаем все возможные области взаимосвязи, отображённые на рис. 2:

1. Запрещённые области:

- область $\alpha < 1, \Upsilon \geq 1$;
- область $\alpha > 1, \Upsilon \leq 1$;
- область $\beta = 1$, за исключением линии пересечения с плоскостью $\alpha = 1$;
- плоскость $\alpha = 1$ за исключением линии пересечения с плоскостью $\beta = 1$ и линии пересечения с плоскостью $i_{Y|X}$;

- $\beta = 0$ за исключением отрезка оси $\alpha[0, 1]$ и оси $i_{Y|X}$;
- плоскость $\alpha = 0$ за исключением оси $i_{Y|X}$;
- плоскость $i_{Y|X} = 0$ за исключением линии $\Upsilon = 1$ и отрезка оси $\alpha[0, 1]$;
- плоскость $i_{Y|X} = 1$ за исключением линии $\Upsilon = 1$;
- плоскость $\Upsilon = 1$ за исключением оси $i_{Y|X}$, линии $i_{Y|X} = 1$ и линий $\alpha = 1, \beta = 1$.

2. Разрешённые области:

- область нормальной причинности $\Upsilon < 1, \alpha < 1, \beta < 1$;
- область обращённой причинности $\Upsilon > 1, \alpha > 1, \beta > 1$;
- линия $Y = \text{const}$ независимо от X ;
- линия однозначных функций $i_{Y|X} = 0, \beta = 0, 0 < \alpha < 1$. В этой области Y однозначно определяется X , но не наоборот, $H(Y|X) = 0$.

- линия независимости $i_{Y|X} = 1, \Upsilon = 1$;
- взаимно-однозначная точка $i_{Y|X} = 0, \alpha = \beta = 1$;

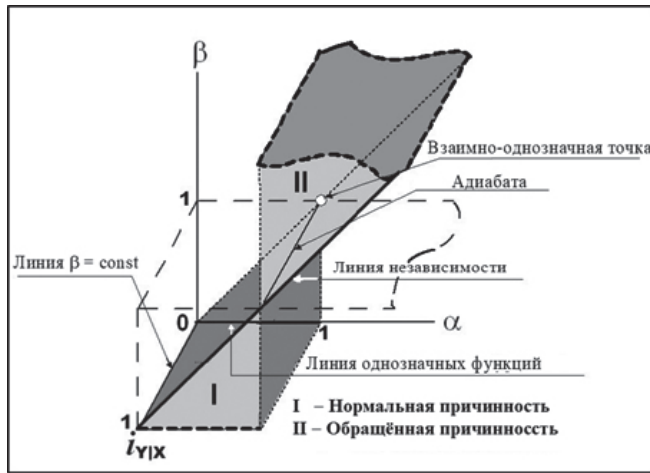


Рис. 2. Энтропийная диаграмма типов взаимосвязи процессов.

Fig. 2. Entropy diagram of types of process relationships.

• адиабата $\alpha = \beta = 1$, т.е. изоэнтропический процесс (процесс, происходящий при постоянной энтропии).

Определение: Процесс X является причиной, а процесс Y — следствием тогда и только тогда, когда их реализация дает значение функции причинности $Y < 1$. При $Y > 1$ имеет место обращенная причинность, при $Y = 1$ причинная связь между процессами X и Y отсутствует.

В работах [1, 44] автором данной статьи на основе теоремы И. Пригожина [45] о минимальном производстве энтропии неравновесной системы, находящейся в стационарном состоянии, доказанной с учетом соотношения Л. Онзагера [46], а также опираясь на работы М. Н. Изакова [47, 48], введена количественная характеристика климата — *производство энтропии*:

$$\delta(S) = \int_0^z \left[-\frac{1}{T} (\text{div} f_{\odot} + \text{div} f_T) + \frac{4}{3} \left(\frac{\text{div} f_{\odot}}{T_{\odot}} + \frac{\text{div} f_T}{T} \right) \right] dz, \quad (6)$$

где f_{\odot} , f_T — потоки солнечной и излученной радиаций, T_{\odot} , T — их температуры. В качестве единицы изменения состояния климатической системы введена единица «change» (ch): $1 \text{ ch} = 0,1 \text{ Вт/м}^2 \times \text{К}$.

Обсуждение результатов

Автором были выполнены расчеты энтропии климатической системы Земли за период 1659—2025 гг. На рис. 3 приведена динамика производства энтропии климатической системы планеты за этот период. Как видно из рисунка, в течение последних 366 лет в климатической системе планеты наблюдаются 7 переходных периодов различной продолжительности. Отличительная особенность первой

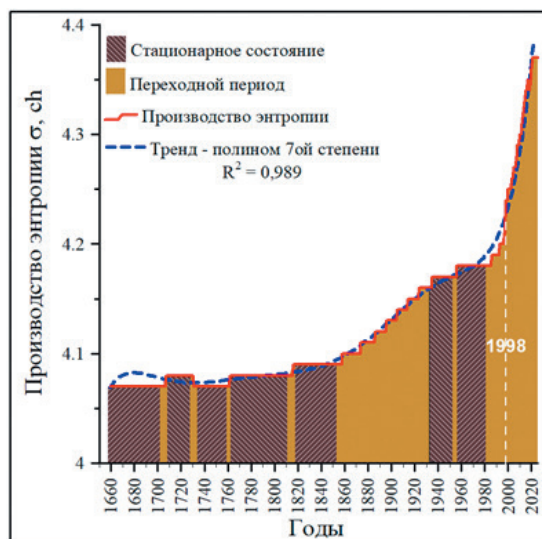


Рис. 3. Производство энтропии климатической системы за 366-летний период.

Примечание: 1998 г. — экспоненциальный рост производства энтропии.

Fig. 3. Entropy production of the climate system over a 366-year period.

Note: 1998 is the beginning of the exponential growth of the number of catastrophic events on the Planet.

половины периода (около 180 лет) состоит в том, что стационарные состояния более продолжительные, чем переходные. И наоборот, вторая половина характеризуется длительными переходными периодами и непродолжительными стационарными состояниями. Рост производства энтропии климатической системы, начиная с 1998 г., начал расти по экспоненте (рис. 3). В среднем продолжительность стационарных состояний составляет около 30 лет, что соответствует принятой в метеорологии длине базисного периода, по которому вычисляется норма метеорологической величины [49].

На основе динамики производства энтропии климатической системы, определяемой по формуле (6), была выполнена формализация понятия «Климат» для масштабов вековых и тысячелетних изменений.

Определение: «Климат — это открытая периодически меняющаяся термодинамическая система, сохраняющая состояние стационарности или близкое к нему на определенных интервалах времени, мерой изменчивости которой является производство энтропии».

Выполненный автором анализ временных рядов реконструированной температуры по соотношению изотопов кислорода O^{18} ледяных кернов позволил выявить в спектре колебаний температуры, построенном по реконструированным данным стотысячелетних и более временных рядов, колебания с периодом кратным 12 000 лет (рис. 4). В соответствии с работой Вогта [4], выделяются колебания с периодом 96, 24 тыс лет.

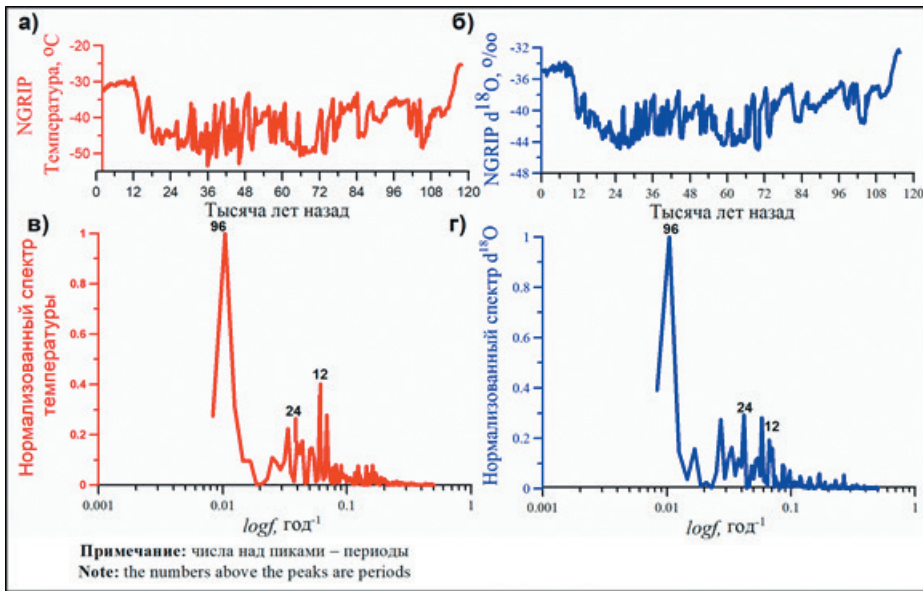


Рис. 4. Временной ход и спектры Фурье реконструированной в Гренландии температуры (а) и диоксида углерода (б).

Fig. 4. Time course and Fourier spectra of reconstructed temperature (a) and carbon dioxide (b) in Greenland.

Аналогичный результат даёт реконструированная по соотношению изотопов кислорода $\delta^{18}\text{O}$ ледяных кернов температура в Антарктиде на временном периоде 400×10^3 лет. Данный ряд был подвержен вейвлет-анализу (рис. 5). В амплитудной вейвлет-функции чётко прослеживаются устойчивые колебания на частоте, соответствующей периодам, кратным 12 000 лет. В спектре Фурье абсолютный максимум колебаний приходится на 96×10^3 лет, в то время как в вейвлет-спектре — на 84×10^3 лет. Это связано с заданными граничными значениями коэффициентов a , b в вейвлет-преобразовании [32].

Наличие сверхдлинных временных рядов температуры воздуха и концентрации CO_2 позволяет выполнить причинный анализ этих рядов в палеоклиматическом масштабе времени. На рис. 6 приведен временной ход реконструированных температуры и диоксида углерода в Гренландии и Антарктиде. Как следует из рис. 6, изменение концентрации CO_2 относительно изменения температуры воздуха происходит с запаздыванием примерно на 500 лет. Это запаздывание отчетливо выражено в их кросс-корреляционной функции как функции временного сдвига, в соответствии с которой максимум корреляции приходится на временной лаг $\Delta t \approx 500$ лет. Таким образом, в рассматриваемых масштабах времени изменение концентрации диоксида углерода происходит вслед за изменениями температуры воздуха, а не наоборот. Функция причинности (рис. 6 в), как функция временного сдвига, находится в области нормальной причинности с минимумом $\gamma_{\min} = 0,714$

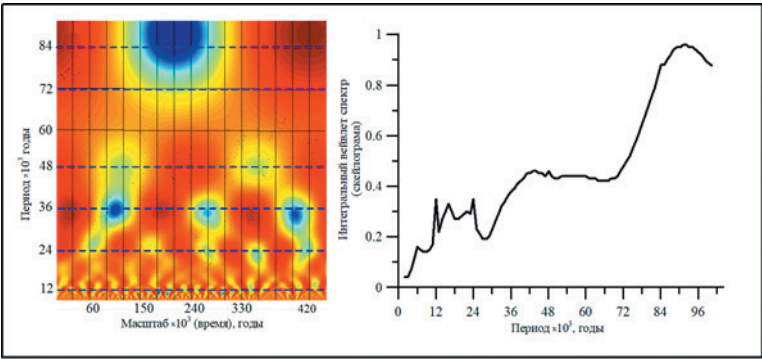


Рис. 5. Амплитудная вейвлет-функция (слева) и интегральный вейвлет спектр (скейлограмма — справа) температуры воздуха, восстановленные по изотопному анализу δO^{18} антарктического ледяного щита.

Примечание: синие пунктирные линии показывают устойчивость во времени максимума спектра на фиксированных частотах, кратных 12 000-летнему циклу колебаний температуры.

Fig. 5. The amplitude wavelet function (left) and the integral wavelet spectrum (scalegram — right) of air temperature, reconstructed from the isotopic analysis of δO^{18} of the Antarctic ice sheet.

Note: the blue dotted lines show the stability over time of the spectrum maximum at fixed frequencies, multiples of the 12,000-year cycle of temperature fluctuations.

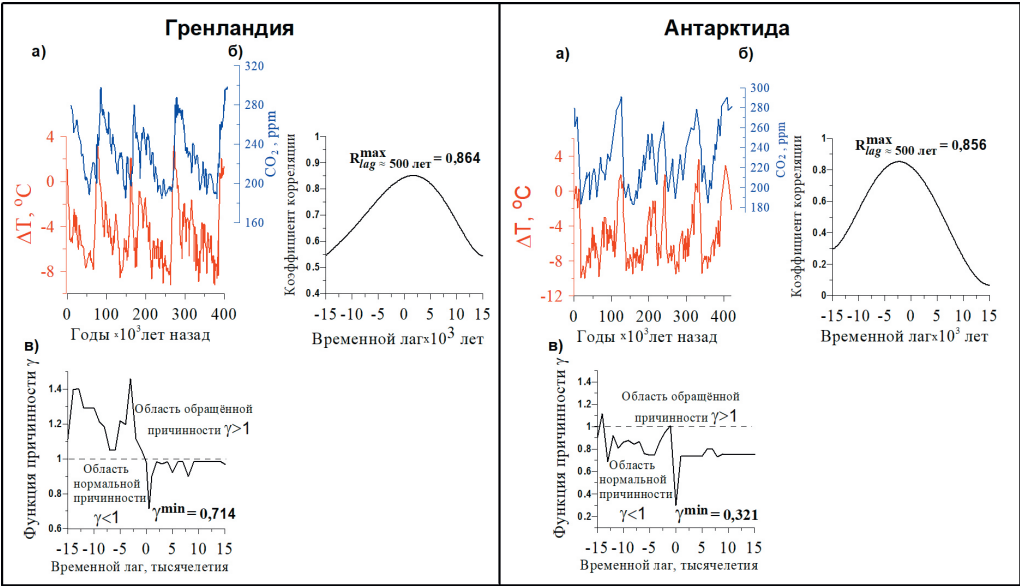


Рис. 6. Временной ход реконструированных температуры и диоксида углерода (а), их кросс-корреляционная (б) и функция причинности (в) как функции временного сдвига.

Fig. 6. Time course of reconstructed temperature and carbon dioxide (a), their cross-correlation (b) and causality function (c), as functions of the time shift.

для Гренландии и $\gamma_{\min} = 0,321$ для Антарктиды. Интересно отметить, что причинная связь между температурой воздуха и диоксидом углерода в Антарктиде более чем в два раза сильнее относительно таковой в Гренландии.

Что касается причинных связей между температурой и концентрацией CO_2 для короткопериодных (внутривековых) изменений климата, то этот вопрос требует специального обсуждения и выходит за рамки данной статьи.

Выводы

В результате исследования временных рядов реконструированной температуры в Антарктиде и Гренландии на основе спектрального и вейвлет-анализов были установлены 12 000-летние колебания климата и выявлены циклы, кратные 12×10^3 лет. Главенствующим генератором катастрофических климатических изменений на протяжении эволюции Земли выступает галактический фактор воздействия на солнечную систему с колебаниями на частотах, кратных периоду 12 000 лет. Астрофизикам и космологам предстоит ещё выяснить природу физической сущности этих циклов.

На планетах солнечной системы, в частности планете Земля, это воздействие, в первую очередь, проявляется в изменении физического состояния ядра планеты, проявляющегося в скачке и, как следствие, в изменении его электромагнитного поля, магнитного поля Земли, скорости вращения Земли (прецессия, длительность суток). Смещение ядра Земли вызывает активизацию магмы, вследствие чего повышается выделение геотермального тепла, что, возможно, является причиной таяния ледников «снизу» (западная часть Антарктиды). В совокупности все эти факторы проявляются в глобальном экстремальном изменении климатической системы планеты Земля.

Анализ временной серии реконструированных температуры и диоксида углерода в Гренландии и Антарктиде с использованием функции причинности позволил установить, что на палеоклиматическом масштабе изменение концентрации CO_2 относительно изменения температуры воздуха происходит с запаздыванием около 500 лет, которое близко к времени полного перемешивания верхнего (активного) слоя воды в Мировом океане [50].

Список литературы

1. Арушанов М. Л. Динамика климата. Космические факторы. Hamburg: Lambert Academic Publishing. 2023. 144 с.
2. Heinrich H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years // Quaternary Research. 1988. Vol. 29. No. 2. P. 142—152. DOI: 10.1016/0033-5894(88)90057-9.
3. Hemming S. R., Broecker W. S., Sharp W. D. et. al. Provenance of Heinrich layers in core V28-82, northeastern Atlantic: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of ice-rafted hornblende, Pb. isotopes in feldspar grains, and Nd–Sr–Pb isotopes in the fine // Earth and Planetary Science Letters. 1998. Vol. 164. No. 1—2. P. 317—333. DOI: 10.1016/S0012-821X(98)00224-6.
4. Hemming S. R., The relationship of Heinrich events and their European precursors over the past 60 ka BP: a multi-proxy ice-rafted debris provenance study in the North East Atlantic // Quaternary Science Reviews. 2007. Vol. 26. №7—8. P. 862—875. DOI: 10.1016/j.quascirev.2006.12.002.

5. Vogt D. On the real causes of climate change. Электронный ресурс: сайт. URL: [<https://www.youtube.com/>] (дата обращения: 07.05.2022).
6. Наговицын Ю. А. Глобальная активность Солнца на длительных временах // *Астрофизический бюллетень*. 2008. Том 63. № 1. С. 45—58.
7. Vogt D. B., Sultan G. Reality revealed : the theory of multidimensional reality. Сан-Хосе: Vector Associates. 1978. 460 p.
8. Vogt D. B. God's Day of Judgment: The Real Cause of Global Warming. Michigan: Vector Associates, 2007. 488 p.
9. Vogt D. B. The Theory of Multidimensional Reality. Michigan: Vector Associates. 2015. 104 p.
10. Li K., Metzger B. D., Chomiuk L. et al. A nova outburst powered by shocks // *Nature Astronomy*. 2017. No. 1. P. 697—702. DOI: 10.1038/s41550-017-0222-1.
11. Ackermann M., Hansen W., Tiepolo G. B. et al. Fermi establishes classical novae as a distinct class of gamma-ray sources // *Science*. 2014. No. 345. P. 554—558. DOI: 10.1126/science.1253947.
12. Cheung C. C. Jean P., Shore S. N. et al. Fermi-LAT gamma-ray detections of classical novae V1369 Centauri 2013 and V5668 Sagittarii 2015 // *Astrophysical Journal*. 2016. No. 826. P. 3—12. DOI: 0.3847/0004-637X/826/2/142.
13. Fischer H., Wahlen M., Smith J. et al. Ice core records of atmospheric CO₂ around the last three glacial terminations // *Science*. 1999. No. 283. P. 1712—1714.
14. Khalilov E. N. Global geological and environmental change: threatening the stable development civilization // *Proceedings of the International Congress «Natural Cataclysms and Global Problems of the Modern Civilization»*. Istanbul, 19—21 September, 2011. London, SWB. 2012. P. 13—23.
15. Khalilov E. N. GEOCHANGE: Problems of global changes of the geological environment, Vol. 1. SWB. London-Munich: 2010. P. 139—150.
16. Хаин В. Е., Халилов Э. Н. Цикличность геодинамических процессов и её возможная природа. М.: Научный мир. 2009. 521 с.
17. Хаин В. Е., Халилов Э. Н. Пространственно-временные закономерности сейсмической и вулканической активности. Burgas: SWB, 2008. 304 с.
18. Хаин В. Е. Взаимодействие атмосферы, биосферы и литосферы – важнейший процесс в развитии Земли // *Вестник РАН*. 2007. Том 77. №9. С. 784—810. DOI: 10.1134/S1028334X0705001X.
19. Халилов Э. Н. Гравитационные волны и геодинамика. Баку-Берлин-Москва: ЭЛМ-МЧНР / МАН. 2004. 331 с.
20. Wong M. H., Marcus P. S., Simon A. A. et al. Evolution of the Horizontal Winds in Jupiter's Great Red Spot From One Jovian Year of HST/WFC3 Maps // *Geophysical Research Letters*. 2021. No. 10. P. 3—13. DOI: e2021GL093982.
21. Herrick R., Hensley S. Surface changes observed on a Venusian volcano during the Magellan mission // *Science*. 2023. P. 1205—1208. DOI 10.1126/science.abm7735.
22. Изменения климата на планетах солнечной системы. Факты синхронного изменения климата на планетах Солнечной системы. Электронный ресурс: сайт. URL: [<https://aftershock.news/?q=node/1204870&full>] (дата обращения: 18.01.2022).
23. Barkin Yu. V. Explanation of some planetary natural phenomena // *Proceedings of the XVIII International Scientific Conference on Marine Geology*. 2009. No. 5. P. 215—218.
24. Neukom R., Barboza L. A., Erb M. P. et al. Consistent multidecadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era // *Nature Geoscience*. 2019. No. 12. P. 643—649. DOI: 10.1038/s41561-019-0400-0.
25. Jouzel J., Masson-Delmotte V., Cattani O. et al. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years // *Science*. 2007. No. 317. P. 793—796. DOI: 10.1126/science.1141038.
26. EPICA community members Eight glacial cycles from an Antarctic ice core // *Nature*. 2004. No. 429. P. 623—628.
27. Grootes P. M., Stuvier, J. W. White, S. J. et al. Comparison of oxygen isotope records from GISP2 and GRIP Greenland ice cores // *Nature*. 1993. No. 366. P. 552—554. DOI: 10.1038/366552a0.
28. Dansgaard W., Johnsen S. J., Clausen et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record // *Nature*. 1993. No. 364. P. 218—220. DOI: 10.1038/366552a0.
29. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Том. 1, 2. М.: Мир. 1971.

30. Арушанов М. Л., Коротаев С. М. Поток времени как физическое явление. Философские науки / Деп. ВИНТИ N7598-B89. 1989. 42 с.
31. Арушанов М. Л., Коротаев С. М. Причинный анализ и его применение для изучения физических процессов в атмосфере // Метеорология и гидрология. 1994. № 6. С. 15—22.
32. Арушанов М. Л. Практические вопросы использования вейвлет-преобразования в метеорологии. Ташкент: НИГМИ. 2015. 50 с.
33. Арушанов М. Л., Горячев А. М. Эффекты причинной механики в метеорологии. Ташкент: НИГМИ. 2003. 102 с.
34. Арушанов М. Л. О необходимости учета эффектов причинной механики в гидродинамических моделях прогноза и климата // Доклады АН РУ. 2002. №6. С. 28—29.
35. Коротаев С. М., Киктенко Е. О. Причинный анализ квантовых запутанных состояний. Ч. 1 // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2010. Сер. 38. № 3. С. 35—55.
36. Коротаев С. М. О возможности причинного анализа геофизических процессов // Геомагнетизм и аэрномия. 1992. Т. 32. С. 27—33.
37. Коротаев С. М., Шабелянский С. В., Сердюк В. О. Обобщенный причинный анализ и его применение для изучения электромагнитного поля в море // Известия РАН. Физика Земли. 1992. № 6. С. 77—86.
38. Коротаев С. М., Хачай О. А., Шабелянский С. В. Причинный анализ процесса горизонтальной информационной диффузии электромагнитного поля в океане // Геомагнетизм и аэрномия. 1993. Т. 33. С. 128—133.
39. Коротаев С. М., Киктенко Е. О. Причинный анализ квантовых запутанных состояний. Ч. 2 // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2010. Сер. 39. № 3. С. 29—47.
40. Kiktenko E. O., Korotaev S. M. Causal analysis of a symmetric entangled states under decoherence // Phys. Lett. A., 2012. Vol. 6—7. P. 820—823. DOI: 10.1016/j.physleta.2012.08.028.
41. Коротаев С. М., Морозов А. Н. Нелокальность диссипативных процессов – причинность и время. М.: Физматлит. 2018. 216 с.
42. Киктенко Е. О., Коротаев С. М., Федоров А. К., Юрченко С. О. Причинный анализ запутанных состояний в томографическом представлении квантовой механики // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2012. №5 (5). С. 75—85.
43. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М: Изд. Иностран. лит. 2002. 827 с.
44. Арушанов М. Л. Естественные причины современного изменения климата планеты. Hamburg: Lambert Academic Publishing. 2012. 175 с.
45. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. М: Иностран. лит. 1960. 156 с.
46. Onsager L. Reciprocal relations in irreversible processes // Phys. Rev. 1931. Vol. 37. P. 405—426.
47. Изаков М. Н. Самоорганизация и информация на планетах и в экосистемах // Успехи физических наук. 1997. Т. 167. № 10. С. 1087—1094. DOI: //doi.org/10.3367/UFNr.0167.199710e.1087.
48. Изаков М. Н. О возможности измерения со спутников притока радиационной негэнтропии на Землю для экологических исследований // Исследование Земли из космоса. 1991. №4. С. 3—15.
49. Хромов С. П., Петросянц М. А. Метеорология и климатология. М.: МГУ. 2006. 567 с.
50. Сорохтин О. Г. Эволюция климатов Земли. Электронный ресурс: сайт. URL: [https://fiz.1sept.ru/article.php?ID=200700907]. (дата обращения: 16.12.2024).

References

1. Arushanov M. L. *Dinamika klimata. Kosmicheskie factory = Climate dynamics. Cosmic factors*. Hamburg: Lambert Academic Publishing. 2013: 144 p. (In Russ.).
2. Heinrich H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quaternary Research*. 1988; 29(2): 142—152. DOI: 10.1016/0033-5894(88)90057-9.
3. Hemming S. R, Broecker W. S, Sharp W. D. et. al. Provenance of Heinrich layers in core V28-82, northeastern Atlantic: 40Ar/39Ar ages of ice-rafted hornblende, Pb. isotopes in feldspar grains, and Nd–Sr–Pb isotopes in the fine *Earth and Planetary Science Letters*. 1998; 164 (1—2): 317—333. DOI: 10.1016/S0012-821X(98)00224-6.

4. Hemming S. R., The relationship of Heinrich events and their European precursors over the past 60 ka BP: a multi-proxy ice-rafted debris provenance study in the North East Atlantic. *Quaternary Science Reviews*. 2007; (26): 862—875. DOI: 10.1016/j.quascirev.2006.12.002.
5. Vogt D. On the real causes of climate change. site. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=M2qOy-8Mwwac.] (access date: 12.11.2022). (In Russ.).
6. Nagovitsyn Yu. A. Global activity of the Sun over long periods of time. *Astrofizicheskiy byulleten = Astrophysical Bulletin*. 2008; 63(1): (45—48). (In Russ.).
7. Vogt D. B., Sultan G. Reality revealed: the theory of multidimensional reality. San Jose. Vector Associates. 1978: 460 p.
8. Vogt D. B. God's Day of Judgment: The Real Cause of Global Warming. Michigan. Vector Associates. 2007: 488 p.
9. Vogt D. B. The Theory of Multidimensional Reality. Michigan. Vector Associates. 2015: 104 p.
10. Li K., Metzger B. D., Chomiuk L. et. al. A nova outburst powered by shocks. *Nature Astronomy*. 2017; (1): 697—702. DOI: 10.1038/s41550-017-0222-1.
11. Ackermann M., Hansen W., Tiepolo G. B. et al. Fermi establishes classical novae as a distinct class of gamma-ray sources. *Science*. 2014; (345): 554—558. DOI: 0.3847/0004-637X/826/2/142.
12. Cheung C. C., Jean P., Shore S. N., Stawarz L. et al. Fermi-LAT gamma-ray detections of classical novae V1369 Centauri 2013 and V5668 Sagittarii 2015. *Journal Astrophysical*. 2016; (826): 3—12. DOI: 0.3847/0004-637X/826/2/142.
13. Fischer H., Wahlen M., Smith J., Mastroianni D., Deck B. Ice core records of atmospheric CO₂ around the last three glacial terminations. *Journal Science*. 1999; (283): 1712—1714.
14. Khalilov E. N. Global geological and environmental change: threatening the stable development civilization. Proceedings of the International Congress «Natural Cataclysms and Global Problems of the Modern Civilization». Istanbul, 19-21 September, 2011. London, SWB: 2012; 13—23.
15. Khalilov E. N. *GEOCHANGE: Problems of global changes of the geological environment*, (1). SWB, London-Munich. 2010; 139—150.
16. Khain V. E., Khalilov E. N. *Ciklichnost geodinamicheskikh processov i ee vozmo; naya Priroda = Cyclicity of geodynamic processes and its possible nature*. Moskva.: Nauchny mir. 2009: 521 p. (In Russ.).
17. Khain V. E., Khalilov E. N. *Prostranstvenno-vremennye zakonovtyjcnb seysmicheskoy i vulkanicheskoy aktivnosti = Spatio-temporal patterns of seismic and volcanic activity*. Burgas: SWB, 2008: 304 p. (In Russ.).
18. Khain V. E. The interaction of the atmosphere, biosphere and lithosphere is the most important process in the development of the Earth. *Vestnik RAN = Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2007; 77(9): (784—810).
19. Khalilov E. N. *Gravitacionnye volny i geodinamika = Gravity waves and geodynamics*. Baku-Berlin-Moskva: ELM. MCHP/MAH. 2004: 331 p.
20. Wong M. H., Marcus P. S., Simon A. A. et al. Evolution of the Horizontal Winds in Jupiter's Great Red Spot From One Jovian Year of HST/WFC3 Maps. *Journal Geophysical Research Letters*. 2021; (10): 1—10. DOI: e2021GL093982.
21. Herrick R., Hensley S. Surface changes observed on a Venusian volcano during the Magellan mission. *Science*. 2023; 1205—1208. DOI: 10.1126/science.abm7735.
22. Climate changes on the planets of the solar system. Facts of synchronous climate change on the planets of the solar system. site. URL: [https://aftershock.news/?q=node/1204870&full]. (access date: 10.04.2022). (In Russ.).
23. Barkin Yu. V. Explanation of some planetary natural phenomena. Proceedings of the XVIII International Scientific Conference on Marine Geology. 2009; (5): 215—218.
24. Neukom R., Barboza L. A., Erb M. P. et. al. Consistent multidecadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era. *Journal Nature Geoscience*. 2019; (12): 643—649. DOI: 10.1038/s41561-019-0400-0.
25. Jouzel J., Masson-Delmotte V., Cattani O. et al. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years. *Journal Science*. 2007; (317): 793—796. DOI: 10.1126/science.1141038.
26. EPICA community members Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Journal Nature*. 2004; (429): 623—628. DOI: 10.1038/nature02596.
27. Grootes P. M., Stuiver, J. W. White, S. J. et al. Comparison of oxygen isotope records from GISP2 and GRIP Greenland ice cores. *Journal Nature*. 1993; (366): 552—554. DOI: 10.1038/366552a0.

28. Dansgaard W., Johnsen S. J., Clausen et. al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Journal Nature*. 1993; (364): (218—220).
29. Jenkins G., Watts D. *Spektralnyi analiz i ego prilozheniya* = *Spectral analysis and its applications*. Moskva: Mir. 1971; Vol.1, 2. (In Russ.).
30. Arushanov M. L., Korotaev S. M. *Potok vremeni kak fizicheskoe yavlenie* = *The flow of time as a physical phenomenon*. Filosofskie nauki. VINITI. 1989; (7598-B89): 42 p. (In Russ.).
31. Arushanov M. L., Korotaev S. M. Causal analysis and its application to the study of physical processes in the atmosphere. *Meteorologiya i gidrologiya* = *Journal Meteorology and hydrology*. 1994; (6): (15—22). (In Russ.).
32. Arushanov M. L. *Prakticheskie voprosy ispolzovaniya viyvlet preobrazovaniya v meteorologii* = *Practical issues of using wavelet transform in meteorology*. Tashkent: NIGMI. 2015: 50 p. (In Russ.).
33. Arushanov M. L., Goryachev A. M. *Effekty prichinnoy mehaniki v meteorologii* = *Effects of causal mechanics in meteorology*. Tashkent: NIGMI. 2003: 102 p. (In Russ.).
34. Arushanov M. L. On the need to take into account the effects of causal mechanics in hydrodynamic models of forecasting and climate. *Doklady Akademii nauk RU* = *Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan*. 2002; (6): (28—29). (In Russ.).
35. Korotaev S. M., Kiktenko E. O. Causal Analysis of Quantum Entangled States. Chast 1. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. «Estestvennye nauki»* = *Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series: Natural Sciences*. 2010; (3): (35—55). (In Russ.).
36. Korotaev S. M. On the possibility of causal analysis of geophysical processes. *Geomagnetizm i aeronomiya* = *Geomagnetism and aeronomy*. 1992; (32): (27—33). (In Russ.).
37. Korotaev S. M., Shabelyansky S. V., Serdyuk V. O. Generalized causal analysis and its application to the study of the electromagnetic field in the sea. *Izv. RAN. Fizika Zemli* = *Izvestia RAS. Physics of the Earth*. 1992; (6): (77—86). (In Russ.).
38. Korotaev S. M., Khachay O. A., Shabelyansky S. V. Causal analysis of the process of horizontal information diffusion of the electromagnetic field in the ocean. *Geomagnetizm i aeronomiya* = *Geomagnetism and aeronomy*. 1993; (33): (128—133). (In Russ.).
39. Korotaev S. M., Kiktenko E. O. Causal Analysis of Quantum Entangled States. Chast 2. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. «Estestvennye nauki»* = *Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series: Natural Sciences*. 2010; (3): (29—47). (In Russ.).
40. Kiktenko E. O., Korotaev S. M. Causal analysis of a symmetric entangled states under decoherence. *Journal Phys. Lett. A*. 2012; (6—7): (820—823). DOI: 10.1016/j.physleta.2012.08.028.
41. Korotaev S. M., Morozov A. N. *Nelokalnost dissipaivnyh proceov — prichinost i vre-mya* = *Nonlocality of dissipative processes — causality and time*. Moskva: Fizmatlit. 2018: 216 p. (In Russ.).
42. Kiktenko E. O., Korotaev S. M., Fedorov A. K., Yurchenko S. O. Causal analysis of entangled states in the tomographic representation of quantum mechanics. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. «Estestvennye nauki»* = *Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series: Natural Sciences*. 2012; (5): 75—85. (In Russ.).
43. Shannon K. *Raboty po eorii informacii i kiberneiki* = *Works on information theory and cybernetics*. Moskva: Inostr. Lit. 2002: 827 p. (In Russ.).
44. Arushanov M. L. *Estestvennye prichiny izmeneniya sovremennogo klimata planet* = *Natural causes of modern climate change on the planet*. Hamburg: Lambert Academic Publishing. 2012: 175 p. (In Russ.).
45. Prigogine I. *Vvedenie v termodinamiku neobratimyh processov* = *Introduction to the thermodynamics of irreversible processes*. Moskva: Inostr. Literatura. 1960: 156 p. (In Russ.).
46. Onsager L. Reciprocal relations in irreversible processes. *Journal Physical Review*. 1931; (37): 405—426.
47. Izakov M. N. Self-organization and information on planets and in ecosystems. *Uspehi Fizicheskikh Nauk* = *Advances in Physical Sciences*. 1997; 167(10): (1087—1094). DOI: doi.org/10.3367/UF-Nr.0167.199710e.1087. (In Russ.).
48. Izakov M. N. On the possibility of measuring the influx of radiative negentropy to the Earth from satellites for environmental studies. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* = *Exploration of Earth from space*. 1991; (4): 3—15. (In Russ.).
49. Khromov S. P., Petrosyants M. A. *Meteorologiya i klimatologiya* = *Meteorology and Climatology*. Moskva.: MGU, 2006: 567 p. (In Russ.).

50. Sorokhtin O. G. *Evolyuciya klimatov Zemli = Evolution of Earth's climates*. Istitut okeanologii RAN im. P. P. Shirshova. site. URL: [<https://fiz.1sept.ru/article.php?ID=200700907.11.02.20.09.4>.] (access date: 10.03.2020). (In Russ.).

Информация об авторе

Арушанов Михаил Львович, доктор географических наук, профессор, научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Ташкент, mikl-arushanov@rambler.ru

Information about author

Arushanov Mikhail L., Doctor of Geographical Sciences, Professor, research Hydrometeorological Institute, Tashkent.

Статья поступила 08.07.2025

Принята к печати после доработки 16.11.2025

The article was received on 08.07.2025

The article was accepted after revision on 16.11.2025

Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 623—633.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(81):623—633.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.591.6:[551.432.8+551.515.1+551.576.2]

doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-623-633

Влияние природных зон равнинной местности на временную изменчивость динамической наклонной полетной видимости при низкой облачности в типовых синоптических ситуациях циклона

Алексей Владимирович Степанов, Виктор Васильевич Дорофеев

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж,
Россия, step_al@mail.ru

Аннотация. В работе рассматриваются условия повышения качества метеорологического обеспечения полетов авиации общего назначения на местных воздушных линиях, а также выполнение авиационных работ путем оценки влияния природных зон в типовых синоптических ситуациях циклона на временную изменчивость динамической наклонной полетной видимости. Показано, что при прогнозировании значений динамической полетной видимости необходимо учитывать ее естественную временную изменчивость, на которую влияют природные зоны равнинной местности и типовые синоптические ситуации циклона.

Ключевые слова: динамическая полетная видимость, природные зоны равнинной местности, временная изменчивость.

Для цитирования: Степанов А. В., Дорофеев В. В. Влияние природных зон равнинной местности на временную изменчивость динамической наклонной полетной видимости при низкой облачности в типовых синоптических ситуациях циклона масштабах // Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 623—633. doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-623-633.

METEOROLOGY

Original article

The influence of natural zones of flat terrain on the temporal variability of flight visibility in low clouds

Alexey V. Stepanov, Victor V. Dorofeev

Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin
Air Force Academy, Voronezh, Russia, step_al@mail.ru

Summary. The temporal characteristics of the variability of altitude, low clouds and horizontal visibility for various natural areas of the Russian Federation are the main factor influencing the temporal variability

© Степанов А. В., Дорофеев В. В., 2025

of dynamic inclined flight visibility. When providing meteorological support for general aviation flights on local air lines and performing aviation operations in conditions of low clouds and limited visibility, it is necessary to assess the possibility of deterioration of dynamic inclined flight visibility in various natural areas as a critically important factor affecting flight safety. At the same time, it is necessary to take into account the contradiction between the values of the temporal characteristics of the variability of horizontal visibility and dynamic inclined flight visibility in different parts of the cyclone under low clouds. This is possible by studying the temporal characteristics of the variability of altitude, low clouds and horizontal visibility over various natural areas in typical synoptic situations of a cyclone and their effect on the natural temporal variability of dynamic inclined flight visibility, which will allow them to estimate their minimum values and inform flight personnel about possible deterioration of meteorological conditions on local air lines and the performance of aviation work.

The purpose of the publication is to improve the quality of meteorological support for general aviation flights on local air lines and the performance of aviation operations by assessing the impact of natural zones in typical synoptic situations of a cyclone on the temporary variability of dynamic inclined flight visibility based on 30-minute measurements of the height of the lower cloud boundary and horizontal visibility at airfields in flat terrain. The results of the study showed that when predicting the values of dynamic inclined flight visibility, it is necessary to take into account its natural temporal variability, which is influenced by the natural zones of flat terrain in typical synoptic situations of a cyclone. At the same time, the natural temporal variability of dynamic inclined flight visibility is greater than the natural temporal variability of the height of the lower cloud boundary and horizontal visibility for all natural zones.

Keywords: dynamic inclined flight visibility, natural zones of flat terrain, temporal variability.

For citation: Stepanov A. V., Dorofeev V. V. The influence of natural zones of flat terrain on the temporal variability of flight visibility in low clouds *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(81):(623—633). doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-623-633. (In Russ.).

Введение

Анализ авиационных происшествий и инцидентов, произошедших в авиации общего назначения (АОН), показал, что 75 % из них произошли в условиях равнинной и холмистой местности, а 62 % от общего числа — из-за ограниченной полетной видимости [1, 2]. При метеорологическом обеспечении полетов на малых и предельно малых высотах в прогнозах погоды указывается горизонтальная видимость у поверхности земли, а не полетная видимость из кабины воздушного судна (ВС), которая используется для оценки визуальных полетов авиации [1—4], но не прогнозируется метеоспециалистами. Это обусловлено тем, что полетная видимость является динамической наклонной полетной видимостью (ДНПВ), зависящей от путевой скорости (W) и высоты полета ($H_{\text{пол}}$) ВС, изменяющихся во времени за счет естественной временной изменчивости высоты нижней границы облачности (ВНГО) и горизонтальной видимости у поверхности земли (S_0).

Поскольку большинство траекторий полета проходит над равнинной и холмистой местностью, где смена природных зон наблюдается чаще, чем над водной поверхностью, соответственно чаще меняются условия образования низкой облачности и видимости, поэтому при метеоповещении пилотов надо учитывать местность, над которой они пролетают.

Природные зоны равнинной местности [5, 6] являются постоянным фактором, влияющим на видимость. Тип синоптической ситуации является изменяющимся фактором. При этом в типовых синоптических ситуациях Zn ВНГО и S_0 различаются, поэтому ДНПВ в одной природной зоне будет зависеть от типовых синоптических ситуаций Zn . В качестве исходных данных для оценки ДНПВ

были использованы данные тридцатиминутных измерений значений ВНГО и S_0 с учетом коэффициента относительной видимости D для различных природных зон в районе аэродрома как воздушного пространства для организации выполнения аэродромных полетов.

При метеорологическом обеспечении полетов АОН на местных воздушных линиях (МВЛ) и выполнении авиационных работ (АР) в условиях низкой облачности и ограниченной видимости необходимо оценивать возможность ухудшения ДНПВ в различных природных зонах и типовых синоптических ситуациях циклона (Zn) как критически важного фактора, влияющего на безопасность полетов.

Термин ДНПВ предложен авторами. Метеоспециалисты измеряют, определяют и прогнозируют только S_0 , которая является статической характеристикой [7], а летному составу необходима информация о наклонной полетной видимости объектов (ориентиров) на земной поверхности, которая является динамической, зависящей от W , $H_{\text{пол}}$, и обеспечивает адекватную оценку возможности выполнения визуальных полетов под низкими облаками [2, 5, 6].

При этом необходимо учитывать противоречие между значениями временных характеристик изменчивости S_0 и ДНПВ в различных частях Zn под низкими облаками. Противоречие между значениями временных характеристик изменчивости горизонтальной видимости и ДНПВ в различных частях Zn заключается в невозможности их отождествления, т.к. ДНПВ определяется одновременным сочетанием ВНГО и S_0 , при различных W и $H_{\text{пол}}$ как основных влияющих факторов и зависит от распределения горизонтальной видимости с высотой под низкими облаками [2, 8].

Решение противоречия возможно на основе исследования временных характеристик изменчивости ВНГО и S_0 для различных природных зон в различных типовых синоптических ситуациях Zn и их влияния на естественную временную изменчивость ДНПВ, что позволит оценивать их средние, минимальные и максимальные значения и информировать летный состав о возможных ухудшениях метеорологических условий на МВЛ и при выполнении АР.

Диспетчеры воздушного движения передают пилотам предупреждения о возможном ухудшении условий полета по ухудшениям значений ВНГО и/или ДНПВ ниже минимальных, к которым пилот имеет допуск. Пилоты анализируют полученную информацию и принимают решения о продолжении полета, изменении маршрута или его прекращении, исходя из текущей и ожидаемой метеорологической обстановки.

В случае резкого ухудшения значений ДНПВ пилоты получают сообщения от диспетчеров и принимают решение на изменение высоты, путевой скорости или маршрута полета. Регулярные инструментальные измерения ВНГО и МДВ на аэродромах, где выполняются полеты, проводятся через 30 минут, поэтому целесообразно использовать эти данные для оценивания естественной временной изменчивости в типовых синоптических ситуациях Zn для краткосрочного прогноза погоды при метеорологическом обеспечении полетов на МВЛ и выполнении АР [2, 7].

Целью публикации является повышение качества метеорологического обеспечения полетов АОН на МВЛ и выполнении АР путем оценки влияния природных зон на временную изменчивость ДНПВ по данным тридцатиминутных измерений ВНГО и S_0 на аэродромах равнинной местности.

Методика исследования

Влияние природных зон на естественную временную изменчивость ВНГО, S_0 и ДНПВ определяется по статистическим характеристикам: среднему значению ВНГО (S_0 , ДНПВ) (ВНГО, S_0 , ДНПВ), среднеквадратическому отклонению (σ), коэффициенту относительной изменчивости (c_v) в различных частях Zn . Согласно [9, 10], $c_v \leq 0,1$ — изменчивость слабая; $0,1 < c_v \leq 0,2$ — изменчивость средняя; $c_v > 0,2$ — изменчивость сильная.

В качестве примера в табл. 1 представлены значения характеристик естественной временной изменчивости ВНГО в различных частях Zn в светлое время суток переходного периода года (весной или осенью) для природных зон смешанных и широколиственных лесов в дымке.

Таблица 1

Значение характеристик естественной временной изменчивости ВНГО в различных частях Zn для природных зон смешанных и широколиственных лесов
The significance of the characteristics of the natural temporal variability of the lower cloud boundary in different parts of the Zn for the natural zones of mixed and broad-leaved forests

Части Zn	Характеристики изменчивости	Время, мин						
		0	30	60	90	120	150	180
Тыл Zn	ВНГО, м	281	295	300	272	260	254	246
	σ , м	56	62	63	60	59	61	64
	c_v	0,20	0,21	0,21	0,22	0,23	0,24	0,26
Передняя часть Zn	ВНГО, м	243	249	258	251	246	245	244
	σ , м	27	30	36	38	37	39	41
	c_v	0,11	0,12	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17
Теплый сектор Zn	ВНГО, м	216	226	205	176	187	163	156
	σ , м	13	16	12	16	15	16	17
	c_v	0,07	0,07	0,06	0,09	0,08	0,10	0,11
Центр Zn	ВНГО, м	171	176	179	199	172	167	160
	σ , м	6	11	13	12	14	15	16
	c_v	0,05	0,06	0,07	0,06	0,08	0,09	0,10

Анализ табл. 1 показывает, что слабая естественная временная изменчивость ВНГО наблюдается в центре и теплом секторе Zn , средняя — в передней части Zn и сильная — в тылу Zn , начиная с 30 минуты в природных зонах смешанных и широколиственных лесов.

В табл. 2 представлены значения характеристик естественной временной изменчивости ВНГО в различных частях Zn в светлое время суток переходного периода года (весной или осенью) для природных зон степей в дымке.

Таблица 2

Значение характеристик естественной временной изменчивости ВНГО
в различных частях Zn для природных зон степей

The significance of the characteristics of the natural temporal variability
of the lower cloud boundary in different parts of the Zn for the natural zones of the steppes

Части Zn	Характеристики изменчивости	Время, мин						
		0	30	60	90	120	150	180
Тыл Zn	ВНГО, м	297	302	306	312	323	332	335
	σ , м	50	54	58	62	67	73	77
	c_v	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23
Передняя часть Zn	ВНГО, м	254	258	263	269	276	282	286
	σ , м	23	28	32	35	36	39	43
	c_v	0,09	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15
Теплый сектор Zn	ВНГО, м	231	235	242	248	254	261	266
	σ , м	9	9	12	15	15	21	24
	c_v	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,08	0,09
Центр Zn	ВНГО, м	183	186	189	192	202	207	212
	σ , м	5	7	9	10	12	14	17
	c_v	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08

В табл. 3 представлены значения характеристик естественной временной изменчивости S_0 в различных частях Zn переходного периода года в природных зонах смешанных и широколиственных лесов в дымке.

Таблица 3

Значение характеристик естественной временной изменчивости S_0 в различных частях Zn
для природных зон смешанных и широколиственных лесов

The significance of the characteristics of the natural temporal variability of the horizontal range
of visibility in different parts of the Zn for the natural zones of mixed and broadleaf forests

Части Zn	Характеристики изменчивости	Время, мин						
		0	30	60	90	120	150	180
Тыл Zn	$\overline{S_0}$, м	3984	4457	4921	3752	3578	3285	3114
	σ , м	717	847	984	788	787	756	747
	c_v	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24
Передняя часть Zn	$\overline{S_0}$, м	3134	3345	4610	4231	3915	3651	3422
	σ , м	376	435	645	592	587	548	548
	c_v	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16
Теплый сектор Zn	$\overline{S_0}$, м	3162	3545	2888	2996	3115	2887	2873
	σ , м	189	248	144	270	249	289	316
	c_v	0,06	0,07	0,05	0,09	0,08	0,10	0,11
Центр Zn	$\overline{S_0}$, м	2802	2992	3174	3496	3073	2902	2834
	σ , м	112	150	222	210	245	232	255
	c_v	0,04	0,05	0,07	0,06	0,08	0,08	0,09

Как видно из табл. 3, слабая естественная временная изменчивость S_0 наблюдается в центре и теплом секторе Zn , средняя — в передней части Zn и сильная — в тылу Zn , начиная с 90 минуты для природных зон смешанных и широколиственных лесов.

В табл. 4 представлены значения характеристик естественной временной изменчивости S_0 в различных частях Zn для природных зон степей в дымке.

Таблица 4

Значение характеристик временной изменчивости S_0 в различных частях Zn для природных зон степей

The significance of the characteristics of the temporal variability of the horizontal range of visibility in different parts of Zn for the natural zones of the steppes

Части Zn	Характеристики изменчивости	Время, мин						
		0	30	60	90	120	150	180
Тыл Zn	$\overline{S_0}$, м	4102	4230	4534	4783	4826	4963	5102
	σ , м	656	719	816	908	965	1042	1122
	c_v	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22
Передняя часть Zn	$\overline{S_0}$, м	3642	3845	3957	4177	4343	4576	4684
	σ , м	364	423	474	543	608	641	703
	c_v	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15
Теплый сектор Zn	$\overline{S_0}$, м	2895	3145	3342	3575	3756	3885	3943
	σ , м	145	189	201	250	300	349	394
	c_v	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
Центр Zn	$\overline{S_0}$, м	2772	2856	3074	3275	3358	3545	3647
	σ , м	83	114	154	197	235	248	292
	c_v	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08

Из анализа табл. 4 следует, что слабая естественная временная изменчивость S_0 наблюдается в центре и теплом секторе Zn , средняя — в передней части Zn и сильная — в тылу Zn начиная с 150 минуты для природных зон степей.

Результаты исследований

Модель ДНПВ построена авторами самостоятельно при $ВНГО \leq 150$ м, $150 < ВНГО \leq 200$ м, $200 < ВНГО \leq 400$ м на основе теории негоризонтальной видимости. Горизонтальная дальность видимости реального объекта (S_p) на любом реальном фоне определяется уравнением:

$$S_0 = \frac{1}{\mu} \ln \left(\frac{K}{\varepsilon} \right), \tag{1}$$

где K — яркостный контраст между объектом (ориентиром) и фоном; ε — порог контрастной чувствительности глаза; μ — показатель ослабления [2].

При этом, исходя из [5, 6], для практической реализации расчетов с учетом природных зон применяется коэффициент относительной видимости D :

$$D = \frac{\ln \frac{K}{\varepsilon}}{\ln \frac{1}{\varepsilon}}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1) получаем:

$$S_0 = \frac{1}{\mu} \ln \left(\frac{1}{\varepsilon} \right) \cdot D. \quad (3)$$

При расчете ДНПВ в формуле (3) вместо μ необходимо применять $\bar{\mu}_{0H_{\text{пол}}}$ — средний показатель ослабления, который определяется соотношением:

$$\bar{\mu}_{0H_{\text{пол}}} = \frac{\ln \frac{1}{\varepsilon}}{H_{\text{пол}}} \int_0^{H_{\text{пол}}} \frac{dh}{S_{H_{\text{пол}}}}, \quad (4)$$

где:

$$S_{H_{\text{пол}}} = A \cdot H_{\text{пол}}^2 + B \cdot H_{\text{пол}} + S_0. \quad (5)$$

Коэффициенты A и B определяются в зависимости от распределения горизонтальной видимости с высотой под низкими облаками:

- для $\text{ВНГО} \leq 150$ м:

$$S_{H_{\text{пол}}} = \frac{0,24S_0 + 1,5S_{mH}}{\text{ВНГО}^2} \cdot H_{\text{пол}}^2 - \frac{1,24S_0 + 0,5S_{mH}}{\text{ВНГО}} \cdot H_{\text{пол}} + S_0, \quad (6)$$

- для $150 < \text{ВНГО} \leq 200$ м:

$$S_{H_{\text{пол}}} = \frac{4S_{mH} - 0,84S_0}{\text{ВНГО}^2} \cdot H_{\text{пол}}^2 - \frac{3S_{mH} + 0,16S_0}{\text{ВНГО}} \cdot H_{\text{пол}} + S_0, \quad (7)$$

- для $200 < \text{ВНГО} \leq 400$ м:

$$S_{H_{\text{пол}}} = S_0. \quad (8)$$

Используя выражение для определения $\bar{\mu}_{0H_{\text{пол}}}$ (формула 4), заменив S_p на $S_{\text{ДНПВ}} =$

$= \frac{S_0}{\cos \theta}$, с учетом явлений погоды ($L_{\text{явл}}$), получаем:

$$S_{\text{ДНПВ}} = L_{\text{явл}} \frac{D \cdot H_{\text{пол}}}{\cos \theta \cdot \int_0^{H_{\text{пол}}} \frac{dh}{S_{H_{\text{пол}}}}}, \quad (9)$$

где $L_{\text{явл}}$ — коэффициент, учитывающий влияние явлений погоды ($L_{\text{дымка}} = 1$, $L_{\text{дождь}} = 0,91$, $L_{\text{снег}} = 0,84$, $L_{\text{морось}} = 0,8$) [2]; $S_{H_{\text{пол}}}$ — горизонтальная видимость на высоте полета ($H_{\text{пол}}$), м; θ — угол визирования в градусах реальных объектов

(ориентиров) на земной поверхности, зависящий от аэронавигационных параметров ВС.

Учет аэронавигационных элементов полета ВС [11] выполняется по путевой скорости (W), зависящей от θ :

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta. \quad (10)$$

При этом:

$$\Delta\theta = 57,3 \frac{W \cdot t}{H_{\text{пол}}} \sin \theta_0 \sqrt{1 - \cos^2 \theta_0 \cdot \cos^2 \alpha}. \quad (11)$$

где W — путевая скорость полета ВС, м/с; $H_{\text{пол}}$ — высота полета ВС, м; t — время аккомодации зрения пилота ВС, с; θ_0 — первоначальный угол визирования без учета путевой скорости полета ВС, °; α — курсовой угол наблюдения объектов (ориентиров) на земной поверхности, °.

В качестве исходных данных для модели использовались средние значения ВНГО и S_0 , полученные в табл. 1—4 по данным 30-минутных метеорологических приборных измерений в пункте вылета для $H_{\text{пол}}$: 50—150 м и для $W = 300$ км/ч. Зона Zn как типовая синоптическая ситуация учитывается значениями ВНГО и S_0 для различных явлений погоды $L_{\text{явл}}$.

В качестве примера значения характеристик временной изменчивости ДНПВ для различных природных зон в тылу Zn представлены в табл. 5—6.

Таблица 5

Значения характеристик временной изменчивости ДНПВ при $H_{\text{пол}}$: 50—150 м и $W = 300$ км/ч для различных природных зон в тылу Zn ($L_{\text{дымка}} = 1$, $D = 0,8$)

The values of the characteristics of the temporal variability of the dynamic flight visibility for flight heights are: 50—150 m and flight speeds 300 km/h for natural zones in the rear of Zn ($L_{\text{дымка}} = 1$, $D = 0,8$)

Тыл Zn	$H_{\text{пол}}$, м	длина						
		0	30	60	90	120	150	180
природные зоны смешанных и широколиственных лесов								
$\overline{\text{ДНПВ}}$, м	50—150	3650	4150	4600	3450	3300	3000	2850
σ , м		694	830	966	759	759	930	941
c_v		0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,31	0,33
природные зоны степей								
$\overline{\text{ДНПВ}}$, м		3800	3950	4200	4450	4500	4650	4750
σ , м		646	711	798	890	945	1023	998
c_v		0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,21

Из табл. 5 видно, что в тылу Zn естественная временная изменчивость ДНПВ в природных зонах смешанных и широколиственных лесов изменяется от средней до сильной с 60 минуты при любых W и $H_{\text{пол}}$ ($L_{\text{дымка}} = 1$, $D = 0,8$), а для зон степей изменчивость ДНПВ изменяется от средней до сильной с 120 минуты при любых W и $H_{\text{пол}}$.

В табл. 6 приводятся оценки временной изменчивости ДНПВ при $H_{\text{пол}}$: 50—150 м и $W = 300$ км/ч для различных природных зон в тылу Zn ($D = 0,2$).

Таблица 6

Значения характеристик временной изменчивости ДНПВ при $H_{\text{пол}}: 50—150$ м и $W = 300$ км/ч для различных природных зон в тылу Zn ($D = 0,2$)

The values of the characteristics of the temporal variability of the dynamic flight visibility for flight heights are: 50—150 m and flight speeds = 300 km/h for natural zones in the rear of Zn ($L_{\text{дымка}} = 1, D = 0,2$)

Тыл Zn	$H_{\text{пол}}, \text{ м}$	0	30	60	90	120	150	180
		природные зоны смешанных и широколиственных лесов						
$\overline{\text{ДНПВ}}, \text{ м}$	50—150	900	1050	1150	900	800	750	700
$\sigma, \text{ м}$		187	221	257	205	205	255	255
c_v		0,19	0,20	0,21	0,23	0,24	0,33	0,35
природные зоны степей								
$\overline{\text{ДНПВ}}, \text{ м}$		950	1000	1050	1150	1150	1200	1250
$\sigma, \text{ м}$		150	200	215	225	250	250	275
c_v		0,16	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,22

Анализ табл. 6 показывает, что в тылу Zn естественная временная изменчивость ДНПВ изменяется от средней до сильной с 60 минуты при любых W и $H_{\text{пол}}$ для природных зон смешанных и широколиственных лесов ($L_{\text{дымка}} = 1, D = 0,2$) и от средней до сильной со 120 минуты для зон степей.

На рис. 1 представлена зависимость естественной временной изменчивости ДНПВ в тылу Zn для природных зон смешанных, широколиственных лесов и степей ($L_{\text{дымка}} = 1, D = 0,8$), который наглядно демонстрирует полученные результаты естественной временной изменчивости ДНПВ в тылу Zn для различных

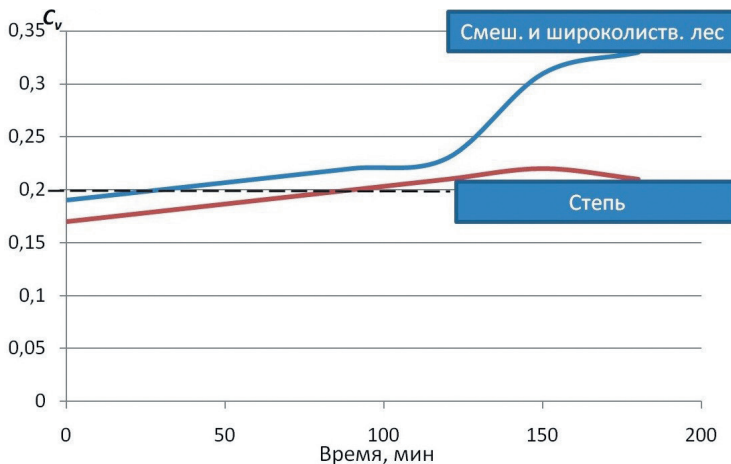


Рис. 1. Зависимость естественной временной изменчивости ДНПВ в тылу Zn для природных зон смешанных, широколиственных лесов и степей ($L_{\text{дымка}} = 1, D = 0,8$).

Fig. 1. Dependence of natural temporal variability of DNPV in the rear of Zn for natural zones of mixed, broad-leaved forests and steppes ($L_{\text{haze}} = 1, D = 0.8$).

природных зон. В зонах смешанных и широколиственных лесов изменчивость ДНПВ существенно выше.

Заключение

При прогнозировании значений ДНПВ необходимо учитывать ее естественную временную изменчивость, на которую влияют природные зоны равнинной местности. При этом сильная изменчивость c_v для ВНГО и S_0 для природных зон смешанных и широколиственных лесов в тылу Z_n наступают на 90 минут раньше, чем для природных зон степей. Сильная изменчивость c_v ДНПВ для природных зон смешанных и широколиственных лесов в тылу Z_n наступают на 60 минут раньше, чем для природных зон степей. Естественная временная изменчивость ДНПВ больше, чем естественная временная изменчивость ВНГО и S_0 для всех природных зон. Высокая изменчивость ДНПВ представляет опасность для авиации из-за больших колебаний, особенно в сторону минимальных значений, т.к. пилот может попасть в метеорологические условия полетов, к которым он не подготовлен. Результаты расчетов будут использоваться в автоматизированных рабочих местах авиационного метеоролога при метеорологическом обеспечении полетов на МВЛ и выполнении АР.

Список литературы

1. Богаткин О. Г. Основы авиационной метеорологии. СПб.: РГТМУ, 2009. 339 с.
2. Дорофеев В. В., Бакланов И. О., Жильчук И. А. и др. Полетная видимость. Монография. Воронеж: ЦНТИ, 2013. 250 с.
3. Sillmann J., Thorarinsdottir T., Keenlyside N. et al. Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities // *Weather and Climate Extremes*. 2017. Vol. 18. P. 65—74. doi: 10.1016/j.wace.2017.10.003.
4. Morss R. E., Demuth J. L., Lazrus H. et al. Hazardous Weather Prediction and Communication in the Modern Information Environment // *Bulletin of the American Meteorological Society* 98. 2017. Vol. 12. P. 2653—2674. doi: 10.1175/BAMS-D-16-0058.1.
5. Степанов А. В. Оценка влияния физико-географических условий равнинной местности на полетную видимость. Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. 2024. Том. 24. Вып. 4. С. 269—273. doi: 10.18500/1819-7663-2024-24-4-269-273.
6. Степанов А. В. Авиационная климатическая метеорологическая информация для планирования полетов авиации общего назначения // *Гидрометеорология и образование*. 2025. № 1. С. 23—30.
7. Guide to meteorological instrument and observing practices / WMO. 1984. Vol. 6. 600 p. doi: 10.25607/OBP-432.
8. Horvath H. Atmospheric Visibility. *Atmospheric Environment*. 1981. Vol. 15. P. 11—15.
9. Венцель Е. С. Теория вероятностей: учебник для вузов. М.: КноРус, 2010. 658 с.
10. Wilks D. Statistical methods in the atmospheric sciences. Academic Press. 2006. 648 p.
11. Жаренков Л. А., Матвеев Ю. А., Ремянников Е. П. Воздушная навигация в различных условиях полетов. М.: Воениздат, 1985. 175 с.

References

1. Bogatkin O. G. *Osnovy aviatsionnoy meteorologii = Fundamentals of Aviation Meteorology*. St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University. 2009: 339 p. (In Russ.).
2. Dorofeev V. V., Baklanov I. O., Zhil'chuk I. A. et al. *Poletnaya vidimost'. Monografiya = Flight visibility. The monograph*. Voronezh: Center for Scientific and Technical Information. 2013: 250 p. (In Russ.).

3. Sillmann J., Thorarinsdottir T., Keenlyside N. et al. Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities. *Weather and Climate Extremes*. 2017; (18): 65—74 doi: 10.1016/j.wace.2017.10.003.
4. Morss R. E., Demuth J. L., Lazrus H. et al. Hazardous Weather Prediction and Communication in the Modern Information Environment. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2017; 98(12): 2653—2674. doi: 10.1175/BAMS-D-16-0058.1.
5. Stepanov A. V. Assessment of the influence of physical and geographical conditions of a flat area on flight visibility. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Nauki o Zemle = Proceedings of the Saratov University. A new series. Earth Sciences Series*. 2024; (24): (269—273). doi: 10.18500/1819-7663-2024-24-4-269-273. (In Russ.).
6. Stepanov A. V. Aviation climatic meteorological information for general aviation flight planning. *Gi-drometeorologiya i obrazovanie = Hydrometeorology and Education*. 2025; (1):(23—30).(In Russ.).
7. Guide to meteorological instrument and observing practices. *WMO*. 1984; (6):600 p. doi: 10.25607/OBP-432.
8. Horvath H. Atmospheric Visibility. *Atmospheric Environment*. 1981; (15): 11—15.
9. Wenzel E. S. *Teoriya veroyatnostey: uchebnik dlya vtuzov = Probability Theory: a textbook for higher education institutions*. M.: Knorus, 2010: 658 p. (In Russ.).
10. Wilks D. Statistical methods in the atmospheric sciences. *Academic Press*. 2006: 648 p.
11. Zharenkov L. A., Matveev Y. A., Remyannikov E. P. *Vozdushnaya navigatsiya v razlichnykh usloviyakh poletov = Air navigation in various flight conditions*. M.: Voenizdat. 1985: 175 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Степанов Алексей Владимирович, кандидат географических наук, ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж), докторант, step_al@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6371-8551>.

Дорофеев Виктор Васильевич, доктор географических наук, профессор ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж), профессор, dorofeevatu@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-8283-0796>.

Information about authors

Stepanov Alexey Vladimirovich, Candidate of Geographical Sciences, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia, doctoral student, step_al@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6371-8551>.

Dorofeev Victor Vasilyevich, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia, professor, dorofeevatu@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-8283-0796>.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 01.06.2025

Принята к печати после доработки 27.10.2025

The article was received on 01.06.2025

The article was accepted after revision on 27.10.2025

Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 634—643.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(81):634—643.

Научная статья

УДК 551.510.42:551.594

doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-634-643

Влияние аэрозольного загрязнения воздуха на суточные вариации электрического поля вблизи поверхности земли

***Дмитрий Владимирович Тимошенко,
Геннадий Владимирович Куповых***

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия, dmitrytim@sfedu.ru

Аннотация. В работе приводятся результаты математического моделирования суточных вариаций напряженности электрического поля в условиях наличия аэрозольного загрязнения. Рассматривается приземный слой, в котором происходит совместное действие нестационарного турбулентного переноса (локальный турбулентный токовый генератор) и глобального грозового генератора. Проводятся сопоставительные расчеты значений электродного эффекта, плотности тока проводимости и турбулентного тока при различных значениях концентрации аэрозоля. Установлено влияние концентрации аэрозоля на время наступления суточных экстремумов напряженности электрического поля и их амплитудные значения. Показано, что аэрозольное загрязнение воздуха является значимым фактором, влияющим на электрическое состояние приземного слоя атмосферы.

Ключевые слова: аэрозоль, приземный слой, электродный эффект, напряжённость электрического поля, проводимость, электрический ток.

Для цитирования: Тимошенко Д. В., Куповых Г. В. Влияние аэрозольного загрязнения воздуха на суточные вариации электрического поля вблизи поверхности земли // Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 634—643. doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-634-643.

Original article

The effect of aerosol air pollution on diurnal variations in the electric field near the earth's surface

Dmitry V. Timoshenko, Gennady V. Kupovykh

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia, dmitrytim@sfedu.ru

Summary. The paper presents the results of mathematical modeling of the electrical characteristics of the turbulent surface layer of the atmosphere, in particular, the daily variations in electric field strength in the presence of aerosol pollution. The surface layer is considered, in which the combined action of an unsteady turbulent transport (a local turbulent current generator) and a global thunderstorm generator occurs. The method for calculating the electrical characteristics of the surface layer is based on the spatial and temporal distribution of the electric field strength obtained from solving the total current equation for the surface layer of the atmosphere. This distribution contains the electrical conductivity of the air as one of the parameters. This allows us to consider the effect of aerosol concentration on the electrical characteristics of

the atmosphere through a change in the electrical conductivity of the air, for which the dependence of the latter on the aerosol concentration is used.

The issue of determining the scale of the electrode layer in a clean atmosphere and in the presence of aerosol contamination is investigated. Comparative calculations of the values of the electrode effect, the conductivity current density, and the turbulent current are performed at different aerosol concentrations. The effect of aerosol concentration on the time of onset of diurnal extremes of electric field strength and their amplitude values has been established. In general, it is shown that aerosol air pollution is a significant factor shaping the electrical state of the surface layer of the atmosphere.

The obtained results should be taken into account when identifying global disturbances in the electric field against the background of local variability in the characteristics of the surface electrode layer.

Keywords: aerosol, surface layer, atmosphere, electrode effect, turbulence, electric field strength, conductivity, electric current

For citation: Timoshenko D. V., Kupovykh G. V. The effect of aerosol air pollution on diurnal variations in the electric field near the earth's surface *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(81):(634—643). doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-634-643. (In Russ.).

Введение

Формирование пространственно-временной структуры электрического поля в приземном электродном слое происходит под воздействием глобальных токовых источников, в частности грозового генератора, и локальных метеорологических факторов. Антропогенное воздействие, проявляющееся, прежде всего, в появлении аэрозольного загрязнения приземного воздуха, также воздействует на его электрические характеристики, уменьшая значения электрической проводимости воздуха [1—8].

Теоретические исследования суточной динамики электрического поля в чистой атмосфере проводились в работах [9—15], центральной идеей которых было последовательное включение в математическую модель приземного электродного слоя глобальных и локальных факторов. В рамках данной работы распределение аэрозоля в пределах электродного слоя принимается равномерным и не зависящим от времени [1]. Суточные вариации интенсивности турбулентного переноса рассматриваются по локальному времени в пределах электродного слоя. Концентрация аэрозоля и интенсивность турбулентного переноса принимаются в качестве локальных факторов.

Получены смещения во времени экстремумов суточной вариации напряженности электрического поля в приземном слое при независимом действии грозового и турбулентного генераторов. Выражения для суточного хода напряженности электрического поля в обоих случаях содержали электрическую проводимость в качестве одного из параметров.

В работе [15], основываясь на полученных в [14] зависимостях электрической проводимости от концентрации аэрозольных частиц, построена суточная вариация электрического поля вблизи поверхности земли. Как показали исследования, в условиях высокой концентрации аэрозоля наблюдалось ослабление эффектов временного смещения экстремумов в суточном ходе напряженности электрического поля и уменьшение их амплитудных значений.

Целью данной работы является исследование влияния концентрации аэрозольных частиц на суточную динамику приземного электрического поля под воздействием совместного действия глобального и локального токовых генераторов.

Суточная динамика электрического поля в турбулентном приземном слое при наличии аэрозоля

В работе [12] исследовалось пространственно-временное распределение электрического поля в приземном слое с учетом одновременного действия глобальной унитарной вариации плотности электрического тока и локальных метеопараметров, представленных временной зависимостью коэффициента турбулентного переноса в условиях чистой атмосферы. Пространственно-временное распределение электрического поля (E) было получено в результате решения начально-краевой задачи для уравнения полного тока:

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} - \varepsilon_0 D(t) \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \lambda E = j(t), \quad (1)$$

$$E|_{t=0} = E_0 e^{-\frac{z}{L}}, \quad E|_{z=z_0} = E_0, \quad \left. \frac{\partial E}{\partial z} \right|_{z=L} = 0, \quad (2)$$

где предполагается, что полный ток (j) и интенсивность турбулентного переноса (D) одновременно имеют нестационарный характер:

$$j(t) = j_0 (1 - 0,2 \sin \omega t), \quad (3)$$

$$D(t) = D_0 (1 + 0,05 \sin \omega(t + 3)) \quad (4)$$

распределение электрического поля:

$$E(z) = \sum_{k=1}^{\infty} E_0 e^{\frac{-(k+3)\varepsilon_0 D_0}{L^2} t} \sin(\omega(t-3)) \left(\frac{z}{z_0} \right)^{3k} + \frac{j_0}{\lambda}. \quad (5)$$

Здесь λ — электрическая проводимость воздуха; $z_0 = 2,5 \times 10^{-3}$ м — параметр шероховатости земной поверхности; L — характерный масштаб электродного слоя; E_0 — напряженность электрического поля у поверхности земли, t — время по Гринвичу (ВСВ), ε_0 — электрическая постоянная.

Отметим, что соотношение (1) получено в условиях чистой атмосферы и содержит величину масштаба L турбулентного электродного слоя. При этом методики расчета масштаба электродного слоя в чистой атмосфере и при наличии аэрозоля отличаются [11, 12]:

Для чистой атмосферы:

$$L_1 = \sqrt{D_0 \tau_1}. \quad (4)$$

В условиях аэрозольного загрязнения:

$$L_2 = \sqrt{D_0 \tau_1 \tau_2 / \sqrt{(\tau_1^2 + 4\tau_2^2)}}, \quad (5)$$

где $\tau_1 = (q\alpha)^{-1/2}$ — время жизни ионов проводимости с учетом взаимной рекомбинации, $\tau_2 = 1/BN$ — время жизни ионов за счет их присоединения к аэрозольным частицам. Характерные масштабы электродного слоя представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характерные масштабы электродного слоя
Characteristic scales of the electrode layer

$D_0, \text{м}^2/\text{с}$	$L_1, \text{м}$	$N, \text{м}^{-3}$	$L_2, \text{м}$
0,05	3,9	10^{10}	3,3
0,1	5,6	10^{10}	4,5
0,05	3,9	10^{11}	2,7
0,1	5,6	10^{11}	2,5

Согласно табл. 1, увеличение концентрации (N) аэрозольных частиц ведет к уменьшению масштаба электродного слоя в сравнении с условиями чистой атмосферы. Влияние аэрозольных примесей на распределение электрического поля будем учитывать с помощью входящего в уравнение (1) параметра электрической проводимости воздуха. С этой целью воспользуемся следующей зависимостью электрической проводимости от концентрации аэрозольных частиц в турбулентном электродном слое при условии постоянного коэффициента турбулентной диффузии, полученного в [11]:

$$\lambda = \frac{eq}{BN} \left(b_1 (1 - \exp k_{11} (z - z_0)) + b_2 (1 - \exp k_{21} (z - z_0)) \right), \quad (6)$$

$$k_{11} = \frac{b_1 E_0 - \sqrt{4D_0 BN + (b_1 E_0)^2}}{2D_0}, \quad k_{21} = \frac{-b_2 E_0 - \sqrt{4D_0 BN + (b_2 E_0)^2}}{2D_0}.$$

Здесь q — скорость ионизации воздуха; $B = 2\eta_1\eta_2/(\eta_1 + 2\eta_2)$ — параметр, характеризующий воссоединение аэроионов с аэрозольными частицами, $\eta_1 = 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$, $\eta_2 = 4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$.

Формула (6) справедлива для аэрозольных частиц размера 0,001—0,4 мкм (ядра Айткена), оказывающих наибольшее влияние на электрические характеристики приземного слоя [7, 8].

На рис. 1 представлены графики суточной вариации напряженности электрического поля приземного слоя в условиях аэрозольного загрязнения ($E_0 = -100 \text{ В/м}$). Анализ графиков на рис. 1 показывает, что присутствие аэрозоля влияет на время проявления суточных экстремумов напряженности электрического поля по сравнению с чистой атмосферой: с ростом концентрации аэрозоля происходит сдвиг утреннего минимума (с 04.00 до 05.30 ВСВ); дневной максимум также смещается в более позднее время (с 10.30 к 11.30 ВСВ); для вечернего максимума смещение происходит в более раннее время (с 22.30 к 20.00 ВСВ).

Кроме того, с увеличением концентрации аэрозоля с 10^{10} м^{-3} до 10^{11} м^{-3} наблюдается снижение величины напряженности электрического поля в течение суток, диапазон уменьшения составляет от 20 до 30 %.

В условиях сильного электрического поля ($E_0 = -500 \text{ В/м}$) также происходит смещение суточных экстремумов напряженности электрического поля (рис. 2): утренний минимум с 03.00 до 05.00 ВСВ; дневной максимум с 09.00 до 11.00 ВСВ;

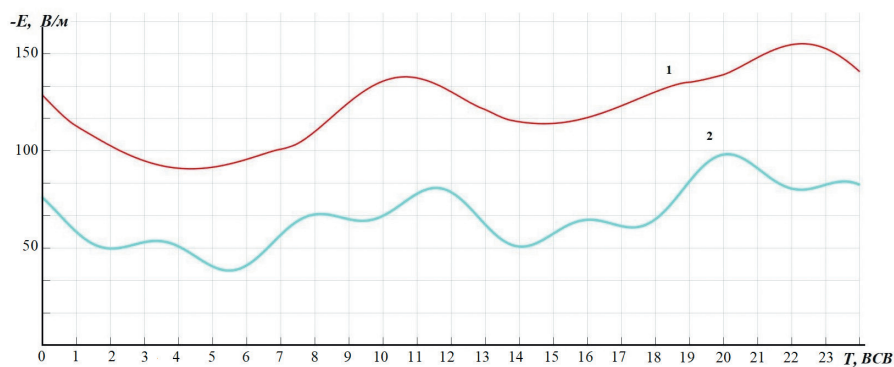


Рис. 1. Суточный ход электрического поля 1 — $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$;
2 — $N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$, $D_0 = 0,05 \text{ м}^2/\text{с}$, $E_0 = -100 \text{ В/м}$, высота 1 м.

Fig. 1. Daily course of the electric field 1 — $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$;
2 — $N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$, $D_0 = 0,05 \text{ м}^2/\text{с}$, $E_0 = -100 \text{ В/м}$, high 1 m.

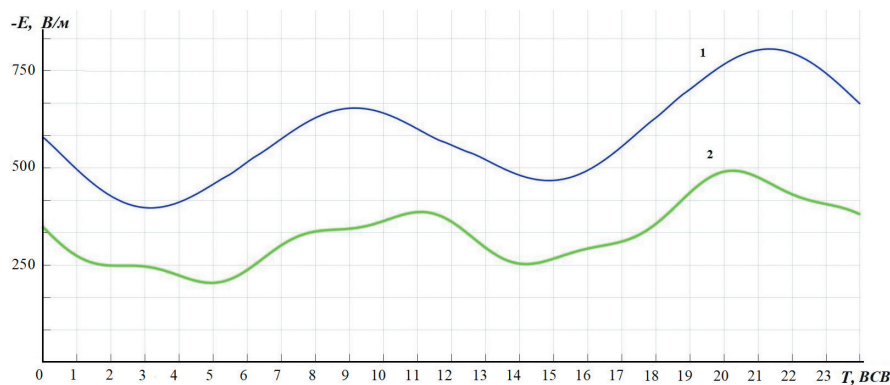


Рис. 2. Суточный ход электрического поля 1 — $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$;
2 — $N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$, $D_0 = 0,05 \text{ м}^2/\text{с}$, $E_0 = -500 \text{ В/м}$, высота 1 м.

Fig. 1. Daily course of the electric field 1 — $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$;
2 — $N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$, $D_0 = 0,05 \text{ м}^2/\text{с}$, $E_0 = -500 \text{ В/м}$, high 1 m.

вечерний максимум также смещается на более раннее время (с 21.30 до 20.00 BCB). Как и в предыдущем случае ($E_0 = -100 \text{ В/м}$) с ростом концентрации аэрозоля с 10^{10} м^{-3} до 10^{11} м^{-3} происходит уменьшение значений напряженности электрического поля в течение суток до 30 %. На кривой 1 рис. 2 ($N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$) дневной максимум является более выраженным, чем в более слабом электрическом поле.

Отметим, что временные сдвиги экстремумов суточной вариации электрического поля в чистой атмосфере являлись результатом увеличения интенсивности турбулентного переноса [6—7]. Однако смещение экстремумов носило односторонний характер: в сторону более позднего времени. Можно высказать

предположение, что в условиях аэрозольного загрязнения рассогласование положения экстремумов во времени связано с суперпозицией суточного хода интенсивности турбулентного переноса, максимум которого приходится на полдень по местному времени, и унитарной вариацией электрического поля.

Структура приземного электродного слоя при наличии аэрозоля

Проведенная оценка влияния концентрации аэрозоля на суточный ход напряженности электрического поля дает основание изучить влияние аэрозоля на характеристики приземного электродного слоя. В работе [9] исследована электрическая структура турбулентного приземного слоя в условиях чистой атмосферы, проведены оценки величины электродного эффекта (отношение напряженности электрического поля вблизи поверхности земли к значению на верхней границе электродного слоя, E_0 / E_∞), значений тока проводимости и турбулентного тока.

Для оценки параметров электродного слоя используем соотношение (5), а также само уравнение (1), учитывая физический смысл входящих в него слагаемых, соответствующих: $j_T = \varepsilon_0 D(t, z) \partial^2 E / \partial z^2$ — турбулентному току; $j_{np} = \lambda(z) E$ — току проводимости. Таким образом, зная распределение напряженности электрического поля (1), путем подстановки в соответствующее выражение можно рассчитать конкретную электрическую характеристику приземного слоя. Отметим, что в ходе проведения описанных расчетов необходимо учитывать масштаб электродного слоя, который для чистой атмосферы определяется соотношением (4), а в условиях аэрозольного загрязнения — соотношением (5).

В табл. 2 приведены результаты моделирования суточной динамики параметров электродного слоя на высоте 2 м для случая чистой атмосферы (столбцы «б/а») и при наличии аэрозоля концентрацией 10^{10} м^{-3} . Расчеты производились для трехчасовых интервалов.

Таблица 2

Параметры приземного электродного слоя в чистой атмосфере (б/а) и при наличии аэрозоля (а) с концентрацией $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$

Parameters of the surface electrode layer in a clean atmosphere (w/a) and in the presence of aerosol (a) with concentration $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$

$E_0 = -100 \text{ В/м}, D_0 = 0,05 \text{ м}^2/\text{с}$						
Часы	E_0/E_∞		$j_{np}, \text{ пА/м}^2$		$j_T, \text{ пА/м}^2$	
	б/а	а	б/а	а	б/а	а
0	1,93	1,69	3,88	3,22	2,54	2,26
3	1,91	1,68	3,82	3,17	2,32	2,06
6	1,78	1,56	3,55	2,94	2,23	1,98
9	1,89	1,66	3,43	2,84	1,77	1,57
12	1,97	1,73	3,43	2,84	1,35	1,20
15	2,36	2,07	3,21	2,66	2,25	2,00
18	2,57	2,26	4,34	3,60	2,73	2,42
21	2,49	2,19	5,12	4,24	3,39	3,01

Данные табл. 2 показывают снижение значений электрических характеристик приземного слоя в условиях загрязненной атмосферы по сравнению с чистой: для величины электродного эффекта (E_0 / E_∞) в диапазоне 12—15 %%; для плотности тока проводимости диапазон снижения составляет 15—20 %%; для плотности турбулентного тока — менее 10 %%. Данный результат можно объяснить тем, что величина электрической проводимости непосредственно не входит в выражение для плотности турбулентного тока, а лишь в выражение для второй производной напряженности электрического поля.

В табл. 3 приводятся результаты моделирования суточной динамики электрических параметров электродного слоя в условиях возросшей концентрации аэрозоля (10^{11} м^{-3}). Сравнение с соответствующими значениями в чистой атмосфере показывает, что уменьшение величины электродного эффекта в данном случае выражено более заметно и составляет порядка 25 % от значений в чистой атмосфере. Такой же диапазон снижения наблюдается у величины плотности тока проводимости (до 25 %). Значения плотности турбулентного тока уменьшаются в данном случае в диапазоне 12—15 %%, что говорит о меньшем влиянии концентрации аэрозоля на интенсивность турбулентного тока.

Таблица 3

Параметры приземного электродного слоя в чистой атмосфере (б/а) и при наличии аэрозоля (а) с концентрацией $N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$
Parameters of the surface electrode layer in a clean atmosphere (w/a) and in the presence of aerosol (a) with concentration $N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$

$E_0 = -100 \text{ В/м}, D_0 = 0,05 \text{ м}^2/\text{с}, N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$						
BCB, ч	E_0 / E_∞		$j_{np}, \text{ пА/м}^2$		$j_T, \text{ пА/м}^2$	
	б/а	а	б/а	а	б/а	а
0	1,77	1,32	3,96	2,97	2,32	2,00
3	1,75	1,31	3,21	2,40	1,97	1,73
6	1,72	1,29	2,79	2,09	1,65	1,45
9	1,93	1,44	2,39	1,79	1,49	1,31
12	1,69	1,26	2,87	2,15	1,36	1,19
15	1,63	1,22	4,46	3,34	2,69	2,36
18	1,55	1,19	5,71	4,28	2,61	2,29
21	1,34	1,18	6,83	5,12	3,51	2,91

Сравнение значений электрических характеристик из табл. 2 и табл. 3 при наличии аэрозоля показывает, что с увеличением концентрации аэрозоля с 10^{10} м^{-3} до 10^{11} м^{-3} происходит уменьшение величины электродного эффекта в среднем от 20 до 60 %%; для плотности тока проводимости диапазон уменьшения значений составляет от 10 до 20 %%; для плотности турбулентного тока — от 7 до 10 %% соответственно.

Таким образом, вычислительный эксперимент показывает, что наряду с суточной вариацией напряженности электрического поля, наличие в приземной

атмосфере аэрозольных примесей оказывает заметное влияние на динамику электрических характеристик приземного слоя.

Заключение

Результаты математического моделирования показали, что наличие в приземном слое аэрозольных частиц уменьшает значения электрической проводимости воздуха. Как следствие этого — уменьшается толщина электродного слоя и значения его параметров.

Влияние аэрозольного загрязнения воздуха на суточный ход напряжённости электрического поля у поверхности земли выражается в смещении по времени появления утреннего минимума, а также дневного и вечернего максимумов. Характер смещения при этом отличается: для утреннего и дневного экстремумов время наступления меняется на более позднее, а для вечернего максимума — соответственно на более раннее. Также отмечается уменьшение как амплитудных, так и среднесуточных значений напряжённости электрического поля с увеличением концентрации аэрозоля.

Полученные результаты следует учитывать при выделении глобальных возмущений электрического поля на фоне локальной изменчивости характеристик приземного электродного слоя.

Список литературы

1. Морозов В. Н. Атмосферное электричество. Атмосфера / Справочник (справочные данные, модели). Л.: Гидрометеиздат. 1991. С. 394—408.
2. Брикар Дж. Влияние радиоактивности и загрязнений на элементы атмосферного электричества / Проблемы электричества атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1969. С. 68—105.
3. Шварц Я. М. Электропроводность воздуха и аэрозоль Труды ГГО // 1980. Вып. 401. С. 136—140.
4. Аджиев А. Х., Куповых Г. В. Измерения электрического поля атмосферы в высокогорных условиях Приэльбрусья // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. № 6. С. 710—715. doi: 10.7868/S0002351515060024.
5. Зайнетдинов Б. Г. Результаты наблюдений за электрическими характеристиками приземного слоя атмосферы в полярном регионе. // Труды ГГО. 2018. Вып. 588. С. 47—61.
6. Зайнетдинов Б. Г., Морозов В. Н., Занюков В. В. Влияние аэрозольных частиц в приземном слое воздуха на элементы глобальной электрической цепи в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2024. № 5. С. 409—414. doi: 10.15372/AOO20241021.
7. Морозов В. Н., Палей А. А., Писанко Ю. В. и др. Экспериментальные и теоретические исследования влияния аэрозольных частиц субмикронного аэрозоля на электричество приземного слоя // Труды ГГО. 2018. № 590. С. 27—47.
8. Морозов В. Н., Палей А. А., Писанко Ю. В. Роль ионизации в образовании и эволюции субмикронных аэрозольных частиц // Оптика атмосферы и океана. 2020. № 5. С. 368—382. doi: 10.15372/AOO20207983.
9. Морозов В. Н. Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учетом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ. СПб.: РГТМУ. 2011. 254 с.
10. Куповых Г. В., Морозов В. Н., Шварц Я. М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Монография. Таганрог. Изд-во ТРТУ, 1998. 123 с.
11. Белоусова О. В., Куповых Г. В., Клово А. Г. и др. Результаты моделирования электродинамической структуры турбулентного приземного слоя // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 4(228). С. 245—253. doi: 10.18522/1026-2237-2022-2-57-63.

12. Тимошенко Д. В., Куповых Г. В., Кудринская Т. В. Динамика суточного хода электрического поля в турбулентном приземном слое вследствие действия локальных факторов // *Оптика атмосферы и океана*. 2024. №11. С. 321—339. doi: 10.15372/AOO20241110.
13. Аджиев А. Х., Куповых Г. В., Тимошенко Д. В. и др. Суточные вариации электрического поля в приземном слое атмосферы // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2021. № 4. С. 452—461. doi: 10.31857/S0002351521040027.
14. Куповых Г. В., Тимошенко Д. В., Клово А. Г. и др. Влияние электродного эффекта на суточные вариации электрического поля атмосферы в приземном слое // *Оптика атмосферы и океана*. 2023 № 10. С. 834—838. doi: 10.15372/AOO20231007.
15. Тимошенко Д. В., Куповых Г. В. Исследования пространственно-временной изменчивости электрической структуры турбулентного приземного слоя // *Труды ГГО*. 2024. Вып. 613. С. 156—168.

References

1. Morozov V. N. *Atmosfernoe elektrichestvo = Atmospheric Electricity*. Atmosphere. Handbook (reference data, models). Leningrad: Hydrometeoizdat, 1991: (394—408). (In Russ).
2. Brikar J. *Vlianie radioaktivnosti I zagriaznenij na elementi atmosferного elektrichestva = The influence of radioactivity and contamination on atmospheric electricity elements*. Problems of Atmospheric Electricity. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1969: (68—105). (In Russ).
3. Schwartz J. M. Electrical conductivity of air and aerosol. *Trudy GGO = Proc. MGO*. 1980; (401): (136—140). (In Russ).
4. Adzhiev A. Kh., Kupovykh G. V. Measurements of the atmospheric electric field in the highlands of Elbrus. *Izvestia RAN. Fizika atmosfery i okeana = News of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and the ocean*. 2015; (6): (710—715). doi: 10.7868/S0002351515060024. (In Russ).
5. Zainetdinov B. G. The results of observations of the electrical characteristics of the surface layer of the atmosphere in the polar region. *Trudy GGO = Proc. MGO*. 2018; (588): (47—61). (In Russ).
6. Zainetdinov B. G., Morozov V. N., Zanyukov V. V. Influence of aerosol particles in the near-ground air layer on elements of the global electrical circuit in the atmosphere. *Optica atmosfery i okeana = Optics of the atmosphere and the ocean*. 2024; (5): (409—414). doi: 10.15372/AOO20241021. (In Russ).
7. Morozov V. N., Paley A. A., Pisanko Yu. V., et al. Experimental and theoretical studies of the influence of submicron aerosol particles on the electricity of the surface layer. *Trudy GGO = Proc. MGO*. 2018; (590): (27—47). (In Russ).
8. Morozov V. N., Paley A. A., and Pisanko Yu. V. The role of ionization in the formation and evolution of submicron aerosol particles. *Optica atmosfery i okeana = Optics of the atmosphere and the ocean*. 2020; (5): (368—382). doi: 10.15372/AOO20207983. (In Russ).
9. Morozov V. N. *Matematicheskoe modelirovanie atmosferно-elektricheskikh processov s uchetom vliyaniya aerosolnih chastic i radioaktivnih veshstv = Mathematical modeling of atmospheric electrical processes taking into account the influence of aerosol particles and radioactive substances*. St. Petersburg: Publishing house of RGGMU, 2011: 254 p. (In Russ).
10. Kupovykh G. V., Morozov V. N., Schwartz J. M. *Teoria elektrodного effecta v atmosphere = Theory of the electrode effect in the atmosphere*. Taganrog: Publishing house of TRTU. 1998: 123 p. (In Russ).
11. Belousova O. V., Kupovykh G. V., Klovo A. G. et al. Results of Modeling the Electrodynamics Structure of the Turbulent Surface Layer. *Izvestiya UFU. Tehnicheskie nauki = SFU News. Technical Sciences*. 2020; (4): (245—253). doi:10.18522/1026-2237-2022-2-57-63. (In Russ).
12. Timoshenko D. V., Kupovykh G. V., Kudrinskaya T. V. Dynamics of the daily course of the electric field in a turbulent surface layer due to the action of local factors. *Optica atmosfery i okeana = Optics of the atmosphere and the ocean*. 2024; (11): (321—339). doi: 10.15372/AOO20241110. (In Russ).
13. Adzhiev A. Kh., Kupovykh G. V., Timoshenko D. V. et al. Diurnal variations of the electric field in the surface layer of the atmosphere. *Izvestia RAN. Fizika atmosfery i okeana = News of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and the ocean*. 2021; (4): (452—461). doi: 10.31857/S0002351521040027. (In Russ).
14. Kupovykh G. V., Timoshenko D. V., Klovo A. G., et al. Influence of the electrode effect on diurnal variations of the atmospheric electric field in the surface layer. *Optica atmosfery i okeana = Optics of the atmosphere and the ocean*. 2023; (10): (834—838). doi: 10.15372/AOO20231007. (In Russ).

15. Timoshenko D. V., Kupovykh G. V. Studies of the spatiotemporal variability of the electrical structure of the turbulent surface layer. *Trudy GGO = Proc. MGO*. 2024; (613): (156—168). (In Russ).

Информация об авторах

Тимошенко Дмитрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет, доцент, dmitrytim@sfn.edu.ru.

Куповых Геннадий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физико-математических основ инженерного образования, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет, профессор, kupovykh@sfn.edu.ru.

Information about authors

Dmitry Vladimirovich Timoshenko PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor Department of Physical and Mathematical Foundations of Engineering Education, Institute of Computer Technology and Information Security, Southern Federal University, Associate Professor.

Gennady Vladimirovich Kupovykh Doctor of science in Physics and Mathematics, Professor, chairman of the Department of Physical and Mathematical Foundations of Engineering Education, Institute of Computer Technology and Information Security, Southern Federal University, Professor.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 07.07.2025

Принята к печати после доработки 16.11.2025

The article was received on 07.07.2025

The article was accepted after revision on 16.11.2025

Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 644—665.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(81):644—665.

ОКЕАНОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.467:[52+550.3](985)

doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-644-665

Сопряженность долгопериодных колебаний ледовитости арктических морей и астрогеофизических факторов

**Леонид Александрович Тимохов, Иван Евгеньевич Фролов,
Валерий Александрович Белязо, Александр Алексеевич Дмитриев,
Олег Александрович Трошичев**

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ltim@aari.ru

Аннотация. Для длительных временных рядов (1901—2016 гг.) установлена высокая корреляция между астрогеофизическими параметрами (координаты полюса и наклон земной оси Земли, продолжительность суток, солнечная активность, расстояние между Землей и Солнцем) и долгопериодными колебаниями средней трехлетней скользящей августовской ледовитостью западных и восточных морей Арктики. Полученные статистические уравнения описывают 72 % и 60 % общей дисперсии ледовитости западных и восточных морей соответственно. Дополнительное подключение в анализ различных гидрометеорологических факторов повышает точность воспроизведения долгопериодных изменений ледовитости на 11—25 %. Рассчитаны оценки вклада астрогеофизических и гидрометеорологических параметров в общую дисперсию ледовитости.

Ключевые слова: Арктические моря, долгопериодные колебания площади льдов, астрогеофизические характеристики, гидрометеорологические индексы, статистические модели.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке НИРТ Росгидромета 5.1 «Развитие моделей, методов и технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты (криосферы), процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными сооружениями для Арктики и технологий гидрометеорологического обеспечения потребителей».

Для цитирования: Тимохов Л. А., Фролов И. Е., Белязо В. А., Дмитриев А. А., Трошичев О. А. Сопряженность долгопериодных колебаний ледовитости арктических морей и астрогеофизических факторов // Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 644—665. doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-644-665.

Original article

Conjugation of long-term fluctuations of Arctic Sea ice and astrogeophysical factors

**Leonid A. Timokhov, Ivan E. Frolov, Valeri A. Belyazo,
Aleksandr A. Dmitriev, Oleg A. Troschichev**

Arctic and Antarctic Research Institute, ltim@aari.ru

Summary. On long-term rows 1901—2016 the conjugacy between astrogeophysical parameters (the coordinates of the pole and parameters of the Earth's nutation, the length of the day, solar activity and the distance between the Earth and the Sun in the winter and summer half-year) and long-period fluctuations of the average three-year sliding August ice cover of the western (total correlation coefficient $R = 0,85$) and eastern ($R = 0,78$) seas of the Arctic has been established. The obtained statistical equations for the Arctic seas' ice cover describe 72 % of the total dispersion of the western Arctic seas' ice cover and 60 % of the total dispersion of the eastern seas' ice cover. A physical interpretation of the possible direct or indirect influence of astrogeophysical factors is proposed. An additional connection to the analysis of hydrometeorological factors (air temperature, atmospheric circulation indices AO, NAO, PNA, the index of the thermal state of the North Atlantic AMO) increases the accuracy of reproducing long-term changes in ice cover by 11—25 %. Estimates of the contribution of astrogeophysical and hydrometeorological parameters to the overall dispersion of ice coverage are obtained: western 60 % and 40 % and eastern 47 % and 53 % of the Arctic seas, respectively. Predictions of the ice cover for three years and ten years ahead according to the obtained equations with independent astrogeophysical and hydrometeorological predictors demonstrate satisfactory agreement of the predicted values and the actual data of the ice cover. The performed study confirms the close correlation of long-period fluctuations in the Arctic seas with astronomical factors. The author's research is the development of a statistical approach to modeling long—period fluctuations in the Arctic seas, the key point of which was the inclusion of astrogeophysical parameters in predictors along with traditional hydrometeorological indices.

Keywords: Arctic seas, long-term ice area fluctuations, astrogeophysical characteristics, hydrometeorological indices, statistical models.

Acknowledgments: This work was carried out with the support of SRTW Roshydromet 5.1. «Development of models, methods and technologies for monitoring and predicting the state of the atmosphere, ocean, marine ice cover, glaciers and permafrost (cryosphere), ice interaction processes with natural objects and engineering structures for the Arctic and Technology of Hydrometeorological Consumer Support».

For citation: Timokhov L. A., Frolov I. E., Belyazo V. A., Dmitriev A. A., Troschichev O. A. Conjugation of long-term fluctuations of Arctic Sea ice and astrogeophysical factors *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(81):(644—665). doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-644-665. (In Russ.).

Введение

Ледяной покров является важной компонентой Северного Ледовитого океана (СЛО) и играет ключевую роль в арктической климатической системе, регулируя взаимодействие атмосферы с океаном в полярной области [1]. Судходство и добыча полезных ископаемых, береговая инфраструктура в Арктике имеют свою специфику, и долгосрочный прогноз ледовых условий арктических морей является важной задачей для обеспечения хозяйственной деятельности в суровых условиях Арктики.

Современное потепление Арктики отмечается как минимум двумя важными климатическими событиями — значительным увеличением температуры воздуха и аномальным уменьшением площади арктических льдов в летний период [1]. Экстремальное уменьшение площади ледяного покрова в начале текущего столетия, сопровождавшееся аномальными колебаниями термохалинной структуры [2] и быстрыми изменения климата в Арктике [3], показало, что изменения оказались быстрее, чем это представляли климатические модели.

Современные климатические модели прогнозируют дальнейшее уменьшение площади ледяного покрова в летний период. Так, в статье [4], где приведены результаты расчетов по модели RCP8.5 NEMO, показано, что к 2030—2039 гг. концентрация льдов в навигационный период может значительно уменьшиться, открыв полярный маршрут из Европы в Азию через Северный полюс. В то же время в монографии [1] на основе анализа фактических межгодовых изменений площади льдов и эмпирической модели было установлено, что в XXI в. ожидается сохранение колебательного (а не однонаправленного) фона изменений площади льдов в арктических морях. Согласно этому прогнозу, в 2020—2040 гг., вероятно, произойдет увеличение площади льдов с максимумом около 2030 г. в восточных арктических морях и около 2035 г. — в западных морях. Это свидетельствует о том, что в настоящее время нет однозначного ответа на вопрос, по какому сценарию будут развиваться изменения площади ледяного покрова в Северном Ледовитом океане, поэтому исследования причин и генезиса долговременных и климатических изменений площади ледяного покрова и методы их описания продолжают оставаться актуальной задачей.

Синоптические и сезонные изменения состояния морского ледяного покрова во времени и пространстве определяются, прежде всего, тепловыми и динамическими процессами в системе атмосфера — ледяной покров — океан. В настоящее время краткосрочные и среднесрочные прогнозы ледовитости на основе гидродинамических и физико-статистических моделей разработаны и используются в оперативной деятельности [1].

Долговременные изменения ледовитости арктических морей масштабов межгодовых и климатических колебаний, в отличие от короткопериодных процессов, приобретают другие черты, в которых находит отражение интегральное (за год, десятилетие) воздействие внутренних гидрометеорологических процессов на ледяной покров и влияние обратных связей на атмосферные и океанографические процессы. Кроме того, многие исследователи отмечают влияние на долговременные процессы внешних факторов: приливных и нутационных сил, вращения Земли, солнечной активности и космических лучей. Так, И. В. Максимов [5] указывал на присутствие в ледовитости Баренцева моря 6—7-летней цикличности, которая вызвана нутационными причинами: наложением вынужденных колебаний оси вращения Земли (12 месяцев) и свободных колебаний («полюсный прилив», 14 месяцев). З. М. Гудкович, Э. И. Саруханян, Н. П. Смирнов [6] установили присутствие цикла «полюсного прилива» в атмосфере высоких широт и колебаниях ледовитости арктических морей. И. В. Максимов обратил также внимание на влияние девятнадцатилетнего деклинационного прилива на океан

и ледовитость [5]. Б. А. Слепцов-Шевлевич и А. М. Бояринов в монографии [7] отметили связь климатических изменений среднегодовой площади льдов в Приатлантической Арктике с долговременными изменениями среднегодовой угловой скорости вращения Земли и с возмущенностью геомагнитного поля Земли. В монографии А. А. Дмитриева, В. А. Белязо, Ю. П. Гудошникова [8] отмечается роль орбитальных движений планет Солнечной системы в формировании планетарной климатической изменчивости атмосферных процессов полярных регионов и, как следствие, в цикличности изменений ледовитости.

Связь ледовитости арктических морей с солнечной активностью, прежде всего, с одиннадцатилетним циклом числа Вольфа, рассматривалась в работах [5, 9, 10—14]. В. П. Карклин [10] и А. Г. Егоров [14] полагают, что вариации солнечной активности проявляются в изменениях полей атмосферного давления и циркуляции атмосферы, от которых зависят аномалии других гидрометеорологических элементов, включая ледяной покров. На важную роль двадцатидвухлетнего цикла солнечной активности в межгодовых изменениях ледовитости арктических морей обратил внимание Б. А. Слепцов-Шевлевич [13, 15]. Этот цикл возникает при обращении знака магнитных полей на Солнце при переходе от одного одиннадцатилетнего цикла солнечной активности к другому. Циклы ледовитости 50—60 лет связывают с долговременными колебаниями солнечной активности. В работе [16] на длительных рядах чисел Вольфа установлено, что цикл Глейсберга состоит из двух мод колебаний: периодичностей 50—80 лет и 90—140 лет. Авторы работы [17] полагают, что шестидесятилетний цикл является результатом меняющейся диссиметрии центра масс Солнечной системы под влиянием Юпитера, Сатурна и Урана [8].

Исследуя тенденции изменения площади льдов в Северном полушарии, В. М. Федоров [18] показал, что основной причиной их изменения являются колебания инсоляции Солнца. В колебаниях поступления солнечной радиации к Земле автор выделяет два механизма. Первый связан с изменением солнечной активности Солнца, в качестве показателя которого чаще всего используют числа Вольфа, а второй механизм связан с изменением расстояния между Землей и Солнцем, наклоном оси вращения Земли и др., которые вызывают изменения в инсоляции Солнца, приходящей на внешнюю границу атмосферы [18].

Из приведенного обзора следует, что исследователями установлен ряд отдельных внешних воздействий, являющихся, по их мнению, вероятными причинами межгодовых и климатических изменений площади льдов в Арктике. Но каково их совместное влияние на ледовитость? Астрогеофизические воздействия составляют две доминирующие группы гравитационной и радиационной природы. В результате астрогеофизическое влияние является комплексным механизмом, в котором участвуют силы и потоки различной физической природы, причем действие их непрерывно по всему спектру колебаний.

Цель настоящей статьи состоит в исследовании связи колебаний ледовитости западных и восточных арктических морей с комплексом переменных как астрогеофизических, так и гидрометеорологических факторов, а также в построении статистических моделей августовской ледовитости западных и восточных морей

Арктики с комплексом астрогеофизических и гидрометеорологических факторов и в выявлении вклада указанных переменных в общую дисперсию ледовитости.

Данные и методы

Объектом исследования являются арктические моря от Гренландского на западе Арктики до Чукотского моря на востоке. По ледовому режиму арктические моря разделяют на две отличающиеся группы [1]. Западные моря (Гренландское, Баренцево и Карское) и их ледовитость (L_w) находятся под значительным влиянием Атлантики. Часть акватории первых двух морей остается свободной ото льда даже в зимнее время, поэтому межгодовая изменчивость их ледовитости отмечается во все сезоны года. Восточные моря (Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское) находятся на сибирском шельфе, их акватория большую часть года покрыта сплоченными льдами, и площадь ледяного покрова морей (L_e) в значительной степени находится под влиянием процессов тихоокеанского сектора Арктики.

Для исследования долговременных изменений площади ледяного покрова необходимы длительные ряды наблюдений. В работах [19—25] авторами были собраны и систематизированы временные ряды ледовитости различной продолжительности, как отдельных арктических морей, так и регионов. Значения ледовитости определялись по имеющимся судовым, авиационным наблюдениям за положением кромки льда и спутниковым наблюдениям. Дополнительно авторами выполнялась реконструкция ледовитости по литературным источникам и выполнялись расчеты по эмпирическим формулам. В монографиях [1, 25] кратко описывается история накопления информации о ледяном покрове арктических морей.

В настоящей работе были использованы наиболее длительные временные ряды (1900—2019 гг.) ледовитости морей в августе за 119 лет. До 1933 г. ледовитость вычислялась авторами [23] с помощью эмпирических связей ледовитости с локальной температурой воздуха, направлением и скоростью ветра и учитывались отдельные исторические сведения о распространении льдов. Как указано в монографии [1], связь расчетных данных с реконструированными по литературным источникам данными характеризуется коэффициентом корреляции равным 0,72, т.е. ошибки реконструкции составляли порядка половины дисперсии ледовитости. Для периода с 1933 по 1946 г. величины ледовитости рассчитывались по данным немногочисленных морских и авиационных экспедиций, но в отдельных случаях выполнялась реконструкция, при этом ошибки расчета рядов ледовитости составляла около 10—30 % дисперсии ледовитости [23, 24]. После 1947 г. точность расчетов значительно выросла, ошибки реконструкции рядов ледовитости уменьшились до 5—10 % дисперсии, поскольку использовались данные авиационных экспедиций, наблюдения на морских судах, а с 1980 г. основным источником данных стали спутниковые наблюдения, точность которых полностью отвечает практическим потребностям. За период с 2004 по 2019 г. величины ледовитости были рассчитаны с использованием базы ледовых данных ААНИИ [26].

В качестве астрогеофизических переменных в работе используются следующие характеристики:

- среднегодовые значения координат полюса Земли (dX и dY);
- параметры наклона оси Земли (долготный $d\psi$ и угловой $d\varepsilon$ индексы);
- среднегодовая продолжительность суток (индекс lod , length of day).

Эти параметры были рассчитаны по данным сайта <ftp://ftp.nga.mil/pub2/gps/eopp/uuuueopp/EOPPyddd.TXT>. Выбранные нами величины $d\psi$ и $d\varepsilon$ представляют собой поправки к углам наклона оси вращения Земли ψ_{1980} и ε_{1980} , вычисленным по модели прецессии-нутаии МАС1980, чтобы получить наблюдаемые величины ψ , ε .

Колебания солнечной радиации вследствие изменения расстояния Земля—Солнце представлены индексами dDs и dDw , которые являются нормированными отклонениями расстояния от Земли до Солнца в летний и зимний периоды соответственно, вычислены по данным <https://soft-ok.net/226-astroprocessor-zet-9-lite.html>.

Для характеристики изменения физической активности Солнца (индекс SA) использовано среднегодовое значение чисел Вольфа, которое выбрано по данным https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/SN_m_tot_V2.0.txt.

Структура межгодовых и долгопериодных колебаний ледовитости и астрогеофизических характеристик

Межгодовые изменения макромасштабных характеристик — суммарных площадей льдов западных и восточных морей в августе, соответственно Lw и Le , характеризуются полициклическостью. Так, по оценкам авторов [1], на фоне отрицательных линейных трендов (климатическое уменьшение площади льдов в августе) отмечаются квазипериодические колебания различной частоты, обобщенно представленные в табл. 1.

Таблица 1

Вклад основных частот в дисперсию изменчивости суммарных площадей распространения льда в августе в западных (Гренландском, Баренцевом и Карском) и восточных (Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском) морях в % (сокращенный вариант из [1])

Contribution of the main frequencies to the dispersion of variability of the total area of ice spread in August in the western (Greenland, Barents and Kara) and eastern (Laptev, East Siberian and Chukchi) seas in % (abridged version from [1])

Регионы Арктики	Линейный тренд, %	Вклад основных циклов в дисперсию площади морского льда, %				
		Частота, 1/год (циклы, годы)				
		0,01—0,03 (50—60)	0,04—0,06 (20)	0,08—0,11 (9—12)	0,12—0,15 (7—8)	> 0,17 (2—5,5)
Западный	24	17,5	13	6,5	7	32
Восточный	3	7	5	12,5	13,5	59

Примечание: в качестве характеристики линейного тренда принимается его коэффициент детерминации.

Комментируя табл. 1, укажем, что, по мнению авторов работы [1], короткопериодные циклы 2—5,5 лет формируются преимущественно под влиянием атмосферных процессов. Взаимодействие составляющих системы «океан — ледяной покров — атмосфера» может вызвать автоколебательные процессы, и, по разным оценкам, предполагаемые периоды автоколебаний могут составлять 4—8, 20—30 лет и др. (обзор публикаций смотри в [1]).

Циклы 7—8 лет близки к полюсному приливу, вызванному нутационными причинами. Однако В. М. Федоров [18] отмечает также присутствие восмилетней вариации в изменениях инсоляции, приходящей на внешнюю границу атмосферы. Ритмы с периодом 9—12 лет обычно относят к влиянию так называемого одиннадцатилетнего цикла изменения солнечной активности, характеризваемой числом солнечных пятен (числом Вольфа). По И. В. Максимова [5], двадцатилетняя цикличность ледовитости является следствием девятнадцатилетнего деклинационного прилива. Но в вариациях приходящей солнечной радиации, связанной с изменением наклоном оси вращения Земли, расстояния между Землей и Солнцем и др., В. М. Федоров [18] также выделил девятнадцатилетнюю цикличность.

Периоды вынужденной вариации оси вращения Земли вследствие изменения расстояния между Землей и Солнцем, Землей и Луной, наклона орбиты Луны к эклиптике включают циклы 18,6 лет, 9,3 года, 1 год и более короткие [27]. По теории Швейдера [11], свободная нутация вызывает переменную силу деформации на поверхности Земли, которая формирует в океане вынужденную четырнадцатимесячную волну «полюсного прилива» с максимальной амплитудой в районе 45° северной и южной широт и равной нулю на экваторе и полюсах, причем высота уровня вдоль широты не меняется. В реальном океане «полюсный прилив» представляет собой результат совместного воздействия как свободных, так и вынужденных колебаний, а сложение вынужденной годовой волны и свободного четырнадцатимесячного Чандлеровского цикла порождает шести—семилетнее биение в уровне океана. По оценке И. В. Максимова [5], горизонтальная составляющая силы деформации при свободных и вынужденных колебаниях оси вращения Земли в 17 раз меньше горизонтальной составляющей приливообразующей силы Луны. Но действие сил деформации нутационной природы на полуцикле в 100—200 продолжительнее действия короткопериодной приливообразующей силы Луны. Эффект воздействия на океан горизонтальной составляющей силы деформации деклинационного долгопериодного прилива, по оценке И. В. Максимова [5], сравним с воздействием «полюсного прилива».

Для анализа статистических связей в работе использованы средние трехлетние скользящие значения ледовитости и астрогеофизических индексов за период с 1901 г. по 2017 г. С помощью кросс-корреляционного анализа были вычислены значимые парные коэффициенты корреляции ледовитости арктических морей с астрогеофизическими индексами (табл. 2) и временные лаги (в годах) опережения астрогеофизического индекса (знак «минус»).

Коэффициенты корреляции ледовитости с большинством астрогеофизических индексов превосходят величину $R = 0,50$, что является достаточно тесной статистической связью для характеристик долгопериодных процессов. Малые

парные коэффициенты корреляции обнаруживаются между ледовитостью и солнечной активностью SA. Ледовитость восточных морей слабо коррелирует с индексом магнитной активности Кр и продолжительностью суток lod, характеризующей скорость вращения Земли.

Таблица 2

Значимые парные коэффициенты корреляции R ледовитости арктических морей с астрогеофизическими индексами

Significant paired correlation coefficients R of the ice cover of the Arctic seas with astrophysical indices

	dX	dY	dψ	dε	SA	Кр	lod	dDs	dDw
Lw	-0,70(0) -0,68(-1)	-0,80(0)	0,75(0)	0,72(0)	-0,27(-1)	-0,50(-2) -0,49(-3)	0,54(-1)	0,62(0) 0,61(-1)	-0,63(0) -0,63(-1)
Le	-0,64(0) -0,64(-1)	-0,51(0) -0,51(-1)	0,58(0)	0,55(0)	0,15(-5)	-0,19(0)	0,21(-6)	0,58(-1) 0,58(-2)	-0,56(-1) -0,56(-2)

Примечание: В скобках указаны временные лаги в годах, при этом «минус» означает опережение астрогеофизического индекса, а «ноль» — синхронность ледовитости и индекса.

На рис. 1 для примера приведены нормированные временные графики площади льдов в августе западных и восточных морей и отдельных астрогеофизических характеристик. Нетрудно видеть, что колебания ледовитости и астрогеофизических параметров неплохо согласуются, причем изменения астрогеофизических

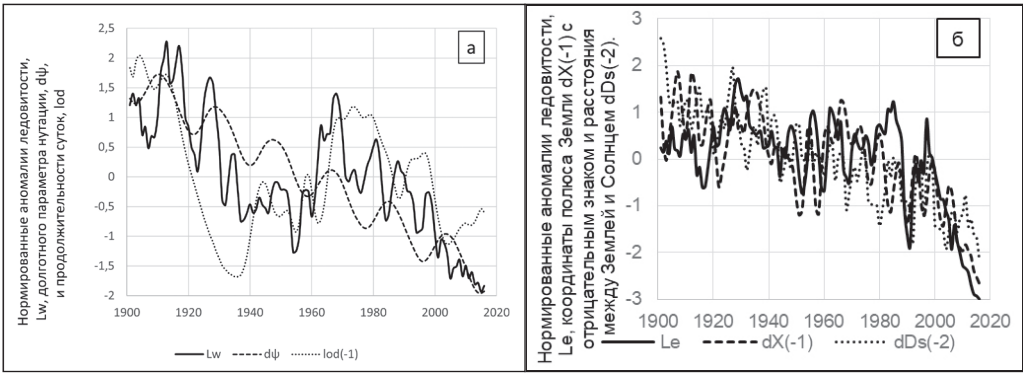


Рис. 1. Временные серии аномалий трехлетних, скользящих нормированных на средне-квадратическое отклонение ледовитости Lw, Le в западном секторе (а) и восточном секторе Арктики (б), а также астрогеофизических характеристик: долготного параметра наклона оси Земли, dψ; продолжительности суток, lod; координаты полюса Земли, dX(-1) с отрицательным знаком, и аномалии расстояния между Землей и Солнцем, dDs(-2).

Fig. 1. Time series of three-year moving anomalies normalized to the standard deviation of ice coverage Lw, Le in the western sector (a) and the eastern sector of the Arctic (b), as well as astrophysical characteristics: the longitudinal parameter of nutation, dψ; the length of the day, lod; anomalies coordinate of the Earth's pole, dX (-1) with a negative sign, and anomalies of the distance between the Earth and the Sun, dDs (-2).

индексов преимущественно опережают изменения ледовитости или изменяются синхронно. Эти результаты служат определенным основанием полагать, что существует связь между длительными колебаниями ледовитости и астрогеофизическими факторами, и отмечать ведущую роль астрогеофизических факторов в долговременных изменениях суммарной ледовитости арктических морей.

Поскольку ледовитость арктических морей подвержена влиянию множества факторов, то реальная роль каждого индекса может быть установлена только в результате экстракции его вклада из суммарного влияния нескольких факторов, поэтому нами была поставлена задача получить уравнение связи ледовитости с множеством астрогеофизических факторов, а затем получить оценки вклада каждого фактора в изменчивость ледовитости при комплексном их влиянии.

Анализ статистической связи долговременных изменений ледовитости с астрогеофизическими параметрами

Для получения статистических уравнений долговременных изменений ледовитости арктических морей в августе для периода с 1901 г. по 2016 г. в качестве предикторов использовались средние трехлетние скользящие значения следующих астрогеофизических параметров: dX , dY , $d\psi$, $d\epsilon$, SA , lod , dDs , dDw . В рабочую базу параметры вошли с различным временным лагом и составили массив из 40 переменных длительностью 116 членов каждая переменная. Построение статистических уравнений выполнялось методом мультирегрессионного анализа по программе «Статистика» [28] путем исключения переменных [29]. Сначала строилась полная модель с использованием всех предикторов. Затем из нее исключались наименее значимые предикторы по критерию p -level. Далее процедура продолжалась до получения наиболее статистически значимых переменных. В результате были получены уравнения долгопериодных изменений трехлетних скользящих значений августовской ледовитости арктических морей западной Lw и восточной Le частей Арктики от астрогеофизических переменных (модельные значения ледовитости обозначены символами $Lw1$ и $Le1$):

$$Lw1 = 21504,7 * d\epsilon(0) + 95,4 * lod(-1) - 0,9 * SA(-4) + 738,9, \quad (1)$$

$$Le1 = -2929,01 * dX(-1) + 198,98 * dDs(-2) + 0,76 * SA(-5) + 313,83. \quad (2)$$

В результате испытания всех астрогеофизических переменных в уравнения (1), (2) вошли следующие предикторы: $d\epsilon$ — угловой параметр наклона оси Земли; lod — продолжительностью суток; SA — солнечная активность (числа Вольфа); dX — вариации X — координаты полюса Земли; dDs — нормированные отклонения расстояния от Земли до Солнца в летний период. В уравнениях временные лаги в годах указаны в скобках при предикторах.

Основные статистические показатели приведены в табл. 3, из которой видно, что линейные коэффициенты детерминации (0,72 и 0,60) больше или около критического значения 0,5—0,6 [29]; критерий Фишера больше критического значения ($F > 5F_{кр}$) [29]; вероятность ошибки расчета (p -level) для всех коэффициентов регрессии меньше заданного уровня значимости (0,01). Это означает, что

уравнения (1) и (2) адекватны (значимы), т.е. рассчитанные по уравнениям значения соответствуют исходным данным ледовитости.

Таблица 3

Статистические параметры регрессионных моделей (1) и (2)
Statistical parameters of regression models (1) and (2)

Lw1; $R = 0,85$; $R^2 = 0,72$; $F(3,116) = 94,4$; $F_{кр} = 4,0$					Le1; $R = 0,78$; $R^2 = 0,60$; $F(3,116) = 58,4$; $F_{кр} = 4,0$				
	Уравнение 1	ρ	$p\text{-level}$	Вклад, %		Уравнение 2	r	$p\text{-level}$	Вклад, %
1	dε (0)	0,63	0,000	52	1	dX(−1)	−0,60	0,000	49
2	lod(−1)	0,36	0,000	17	2	dDs(−2)	0,23	0,005	7
3	SA(−4)	−0,15	0,004	3	3	SA(−5)	0,17	0,005	4

Примечание: R — множественный коэффициент линейной корреляции; R^2 — коэффициент детерминации; F — критерий Фишера; $F_{кр}$ — табличное значение критерия Фишера; ρ — частный коэффициент корреляции; $p\text{-level}$ — уровень значимости. В пятой и восьмой колонках указан вклад предиктора в общую дисперсию ледовитости в процентах.

Важным условием корректности статистических моделей (1) и (2) является независимость (некоррелированность) предикторов между собой. В табл. 4 приведены значения взаимных коэффициентов корреляции предикторов. Как видно из таблицы, коэффициенты корреляции между переменными в правых частях уравнений (1) и (2) изменяются от 0,08 до 0,63, что свидетельствует о практической независимости предикторов, так как значения коэффициентов корреляции меньше коэффициента корреляции 0,7, считающегося границей при определении коллинеарности [29], поэтому практическое отсутствие коллинеарности предикторов свидетельствует о корректности статистических уравнений (1) и (2).

Таблица 4

Корреляционная матрица предикторов, вошедших в уравнения (1) и (2)
Correlation matrix of predictors included in equations (1) and (2)

Уравнение 1, Lw1				Уравнение 2, Le1			
Lw1	dε(0)	lod(-1)	SA(-4)	Le1	dX(-1)	dDs(-2)	SA(-5)
dε(0)	1,00	0,26	-0,13	dX(-1)	1,00	-0,65	0,09
lod(-1)	0,26	1,00	-0,20	dDs(-2)	-0,65	1,00	-0,08
SA(-4)	-0,13	-0,20	1,00	SA(-5)	0,09	-0,08	1,00

Таким образом, полученные множественные коэффициенты линейной корреляции ($R = 0,85$ и $R = 0,78$) ледовитости морей западной и восточной частей Арктики с астрогеофизическими факторами являются несомненно значимыми для долгопериодных процессов. Линейный коэффициент детерминации, который отражает вклад предикторов в общую дисперсию многолетних колебаний площади льдов, показывает, что астрогеофизические факторы определяют 72 % общей дисперсии ледовитости западных арктических морей и 60 % общей дисперсии ледовитости восточных морей.

Приведенные в пятой и восьмой колонках в табл. 3 вклады предикторов, показывают, что на долговременную изменчивость ледовитости морей наибольшее

влияние оказывают нутационные эффекты, представленные угловым параметром наклона оси вращения Земли $d\epsilon(0)$ для западных морей и координатой $dX(-1)$ полюса Земли с опережением в один год для восточных морей. Отметим, что в спектре флуктуаций индекса $d\epsilon(0)$ преобладает двадцатилетний цикл, а в спектре координаты полюса Земли $X(0)$ доминируют шести—семилетнее биение, а также цикл с периодом 30 лет.

Следующий вклад в общую дисперсию ледовитости западных морей вносят вариации скорости вращения Земли (17 %), моделируемое индексом $lod(-1)$, и изменения расстояния между Землей и Солнцем в летний период $Ds(-2)$ для восточных морей (9 %). Заметим, что в спектре среднегодового индекса lod на ряде 1900—2017 гг. не выделяются значимые циклы, но аппроксимация ряда lod полиномом шестой степени указывает на присутствие квазицикличности 60—80 лет. В изменчивости аномалии расстояния между Землей и Солнцем Ds наблюдаются значимые цикличности (4 года и 12 лет) с несколько меньшей амплитудой. Роль солнечной активности $SA(-4)$, представленная числами Вольфа, невелика и равна 3 % и 6 % соответственно для западных и восточных морей. В спектре флуктуаций среднегодовой солнечной активности SA используемого нами ряда длиной 118 лет выделяется доминирующая цикличность 10—11 лет.

Схематично механизм влияния предикторов на ледовитость представляется следующим образом. При положительных аномалиях параметра наклона оси вращения Земли $d\epsilon(0)$ увеличивается поток солнечной радиации на внешнюю границу атмосферы в широтной зоне 60—90°; уменьшается температурный контраст север—юг, ослабляется меридиональный перенос, понижается температура воздуха [18] и увеличивается площадь льдов в западных морях, как это и следует из уравнения (1). При положительном значении вариации координаты dX наклон уровня океана направлен от широты 45° в сторону Северного полюса, а поток имеет преимущественно северо-восточное направление, уменьшая площадь льдов в восточных морях (уравнение (2)). При отрицательных значениях аномалий $d\epsilon(0)$ и X наблюдается обратный эффект.

Влияние изменения скорости вращения Земли (индекс lod) на ледовитость западных морей осуществляется, по Б. А. Слепцову-Шевлевицу и А. М. Бояринову [7], следующим образом. При положительном значении индекса lod (увеличение индекса lod — замедление вращения Земли) на полюсах наблюдается вспучивание поверхности океана, а на экваторе — проседание, поэтому в соответствии с уравнением (1) уровень океана вследствие замедления вращения Земли уменьшается от полюса к экватору, в результате чего возникший геострофический поток водных масс направлен на юго-запад, увеличивая ледовитость в западных морях. При уменьшении индекса lod (ускорение вращения Земли) возникает обратный эффект.

Возможный механизм влияния предиктора $dDs(-2)$ на ледовитость восточных арктических морей заключается в том, что при положительном значении аномалии расстояния между Землей и Солнцем (Земля удаляется от Солнца) уменьшается приход солнечной радиации на внешнюю границу атмосферы Земли, что отражается в понижении температуры воздуха, и способствует увеличению ледовитости. Отрицательное значение индекса $dDs(-2)$ (уменьшение расстояния

между Землей и Солнцем) демонстрирует увеличение прихода солнечной радиации на внешнюю границу атмосферы, вследствие чего повышается температура воздуха и уменьшается площадь распространения льдов, что и следует из уравнений (1) и (2).

Более сложной является интерпретация механизма влияния интенсивности солнечной радиации SA (вариации чисел Вольфа) с опережением четыре и пять лет на ледовитость. По мнению многих ученых (см. обзор в [1]), влияние интенсивности солнечной радиации на океан и ледяной покров является не прямым, а через атмосферную циркуляцию. Так, А. Г. Егоров [14] показал, что в течение 16—23 циклов центр наибольших барических аномалий перемещается в пространстве северной полярной области между Северной Америкой и Евразией по некоторой полюсной оси, проходящей через точки геомагнитного и географического полюса. Результатом этого является солнечно обусловленное регулирование режима воздушных переносов над акваторией северо-евразийского мелководья и многолетние изменения в повторяемости формирования ледовой оппозиции между западными и восточными арктическими морями России. Вероятно, поэтому предиктор SA в уравнения для западных и восточных морей вошел с разным знаком.

Более слабая корреляция между многолетними колебания ледовитости восточных морей с астрогеофизическими факторами может быть связана с недостаточно удовлетворительной реконструкцией временного ряда ледовитости с 1900 г. по 1932 г. или с неучетом дополнительных астрогеофизических факторов. Однако довольно высокие коэффициенты корреляции (0,85 и 0,78) для августовской ледовитости западных и восточных морей Арктики, соответственно, значительное превышение критерия Фишера над табличным значением, указывают на тесную сопряженность долгопериодных колебаний ледовитости арктических морей и астрогеофизических параметров.

Анализ статистических связей ледовитости арктических морей с астрогеофизическими и гидрометеорологическими параметрами

Рассмотрим роль астрогеофизических и гидрометеорологических факторов в их совместном влиянии на долговременные колебания ледовитости арктических морей. В качестве гидрометеорологических параметров с учетом результатов публикаций [31, 32] были использованы следующие индексы: Арктическое колебание (Arctic Oscillation, AO); Североатлантическое колебание (North Atlantic Oscillation, NAO); атлантическое мультидекадное колебание (Atlantic multidecadal oscillation, AMO); Тихоокеанско-североамериканское колебание (Pacific North American oscillation, PNA). По данным сайта <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>, рассчитывались средние индексы для периодов от месяца i до месяца j , x_{ij} , с временным сдвигом в годах n , $x_{ij}(-n)$, где знак минус означает опережение предиктором ледовитость на n лет.

Данные о среднегодовой температуре воздуха (T_a) в Арктике севернее широты 60° были взяты из работы [32], дополненные расчетами для последнего десятилетия. Отметим, что в статье [33] были использованы другие длинные ряды

среднегодовой температуре воздуха для анализа и получения статистических моделей долговременных колебаний температуры воздуха в Арктике. Чтобы уменьшить влияние пульсаций гидрометеорологических воздействий с временным масштабом меньше трех лет, ряды предикторов были подвергнуты трехлетнему скользящему осреднению. Методом мультирегрессионного анализа были получены следующие уравнения долгопериодных изменений трехлетних скользящих значений августовской ледовитости арктических морей западной Lw2 и восточной Le2 частей Арктики, как функции астрогеофизических и гидрометеорологических переменных:

$$\text{Lw2} = 15100,97 * d\epsilon(0) + 58,84 * \text{lod}(-1) - 0,7 * \text{SA}(-4) - 252,52 * \text{PNA}_{\text{IV-IX}}(-1) - 562,35 * \text{AMO}(-5) + 12483,46 \quad (3)$$

$$\text{Le2} = -2052,0 * dX(-1) + 0,96 * \text{SA}(-5) - 152,4 * \text{AO}_{\text{X-III}}(0) - 157,9 * \text{PNA}_{\text{IV-IX}}(-1) - 544,9 * \text{AMO}(-8) + 12213,2. \quad (4)$$

В результате испытания всех переменных и исключения наименее значимых предикторов в уравнения (3), (4) вошли следующие астрогеофизические и гидрометеорологические предикторы с временными лагами, указанными в уравнениях в скобках: $d\epsilon$, lod , SA , dX , AMO , AO , PNA .

Основные статистические характеристики регрессионных моделей (3) и (4) приведены в табл. 5. Как следует из табл. 5, уровни значимости $p\text{-level}$ для всех предикторов получились равными и меньшими 0,01 за исключением индекса $\text{PNA}_{\text{IV-IX}}(-1)$ в уравнении (4) ($p\text{-level} = 0,018$); общие линейные коэффициенты корреляции довольно большие; коэффициенты детерминации (0,81 и 0,71) больше критического значения 0,5–0,6 [29]; для критериев Фишера выполняется неравенство ($F > 5F_{\text{кр}}$) [29]. Таким образом, приведенные в табл. 5 параметры статистических уравнений (3–4) свидетельствуют об адекватности (значимости) полученных моделей и расчеты по уравнениям соответствуют исходным данным ледовитости.

Таблица 5

Статистические параметры регрессионных моделей (3) и (4).

Обозначения указаны в табл. 4

Statistical parameters of regression models (3) and (4). The notations are given in Table 4

Lw2; $R = 0,90$; $R^2 = 0,81$; $F(5,110) = 89,4$; $F_{\text{кр}} = 3,2$					Le2; $R = 0,845$; $R^2 = 0,71$; $F(5,110) = 52,7$; $F_{\text{кр}} = 3,2$				
	Уравнение 3	ρ	$p\text{-level}$	Вклад, %		Уравнение 4	ρ	$p\text{-level}$	Вклад, %
1	$d\epsilon(0)$	0,44	0,000	37	1	$dX(-1)$	–0,36	0,000	14
2	$\text{lod}(-1)$	0,22	0,000	9	2	$\text{SA}(-5)$	0,25	0,000	7
3	$\text{SA}(-4)$	–0,12	0,008	3	3	$\text{AO}_{\text{X-III}}(0)$	–0,33	0,000	12
4	$\text{PNA}_{\text{IV-IX}}(-1)$	–0,13	0,003	3	4	$\text{PNA}_{\text{IV-IX}}(-1)$	–0,12	0,019	2
5	$\text{AMO}(-5)$	–0,39	0,000	29	5	$\text{AMO}(-8)$	–0,57	0,000	36

Сравнивая структуру уравнений (1), (2) и (3), (4) отмечаем, что в них вошли одни и те же астрогеофизические предикторы, за исключением индекса dDs . Гидрометеорологический индекс $\text{PNA}_{\text{IV-IX}}(-1)$ вошел в оба уравнения (3), (4), индекс

AO_{x-III} оказался значимым для ледовитости восточных морей. Из оценок вклада предикторов видим, что ледовитость Запада Арктики в большей степени определяется колебаниями угловой компоненты наклона оси вращения Земли (37 %) и поступлением теплых атлантических вод АМО(–5) (29 %). При этом вклад астрогеофизических факторов $d\epsilon(0)$, $lod(-1)$, $SA(-4)$ в общую дисперсию долгопериодных изменений ледовитости западных морей в полтора раза больше, чем гидрометеорологических факторов АМО(–5), $PNA_{IV-IXI}(-1)$.

Вклад гидрометеорологических факторов в дисперсию ледовитости восточных морей (50 %, табл. 5) в 2,4 раза больше вклада астрогеофизических (21 %, табл. 5). Вероятной причиной такого различия является удаленность от Северной Атлантики, определенная закрытость восточного сектора Арктики от Тихого океана, большая подверженность влиянию атмосферной циркуляции, а также неудовлетворительная реконструкция временного ряда ледовитости с 1900 г. по 1932 г. Обратим внимание на изменение роли астрогеофизических факторов при расширении числа переменных. Общий вклад астрогеофизических факторов в дисперсию ледовитости западных морей после дополнительного включения в анализ гидрометеорологических факторов сократился с 72 % (табл. 4) до 49 % (табл. 5), а для восточных морей — с 60 % (табл. 4) до 21 % (табл. 5). Можно предположить, что часть гидрометеорологических факторов зависит от астрогеофизических параметров, уменьшив прямой вклад астрогеофизических факторов. Однако этот вопрос требует дополнительного изучения.

Рассмотрим роль каждого гидрометеорологического фактора в формировании долгопериодных колебаний ледовитости, принимая во внимание знаки, с которыми индексы входят в уравнения. Теплые атлантические воды (индекс АМО(–5)) непосредственно влияют на ледовитость западной части Арктики, а временной лаг в пять лет представляет средний промежуток времени распространения атлантических вод от Северной Атлантики до западных морей [1]. Влияние атлантических вод на ледовитость восточного сектора Арктики опосредовано. Индекс АМО(–8) отражает состояние фронтальной зоны между водами атлантического и тихоокеанского происхождения, а временной лаг в восемь лет равен средней продолжительности адвекции атлантических вод от Северной Атлантики до хребтов Ломоносова-Менделеева. Положительная аномалия индекса АМО(–8) означает, что фронтальная зона трансполярного дрейфа смещена на восток, антициклонический круговорот воды и льдов занимает более южное положение, поэтому в северных частях восточных арктических морей преобладает вынос льдов в Арктический бассейн, что уменьшает ледовитость морей. При отрицательной аномалии АМО(–8) наблюдается обратная ситуация.

Положительное значение индекса PNA описывает ситуацию ветровых потоков с юга-запада на северо-восток над западными арктическими морями, которые вызывают уменьшение ледовитости этих морей. Циклонический режим атмосферной циркуляции (индекс АО положительный) сопровождается уменьшением площади льдов в восточных арктических морях. При антициклоническом режиме (индекс АО отрицательный) расширяется антициклонический круговорот поверхностных вод и льдов в Амерзийском суббассейне, на северных границах

восточных морей формируется заток льдов из Арктического бассейна, что сопровождается увеличением ледовитости этих морей [1]. Интерпретация вклада астрогеофизических членов описана выше.

По уравнениям (1)—(4) были выполнены диагностические расчеты ледовитости морей с использованием базовых предикторов для периода с 1901 г. по 2016 г. Также были выполнены расчеты ледовитости для периода с 2017 г. по 2019 г. с использованием независимого материала, т.е. предикторов, которые не вошли в рабочую базу при построении уравнений. На рис. 2 а и рис. 2 б приведены временные кривые фактических и расчетных значений ледовитости. Из рисунков видно, что изменчивость трехлетней скользящей средней величины площади льдов западных морей в августе хорошо воспроизводится моделями. При этом изменения наклона оси вращения Земли и скорости вращения Земли играют важную роль в макромасштабной долговременной изменчивости ледовитости в западной (приатлантической) части Арктики. Менее успешно воспроизводятся колебания ледовитости восточных арктических морей.

На рис. 2 а и рис. 2 б также приведены результаты предвычисления ледовитости с помощью уравнений (3) и (4) по независимым предикторам. Среднеквадратическая величина расхождения между фактическими и предвычисленными данными для трех лет (2016—2018 гг.) составила для западных морей 12 % и восточных 18 % от среднеквадратического отклонения вариаций ледовитости за период с 1901 г. по 2018 г. и, соответственно, 3,6 и 5,6 % от общей амплитуды изменения

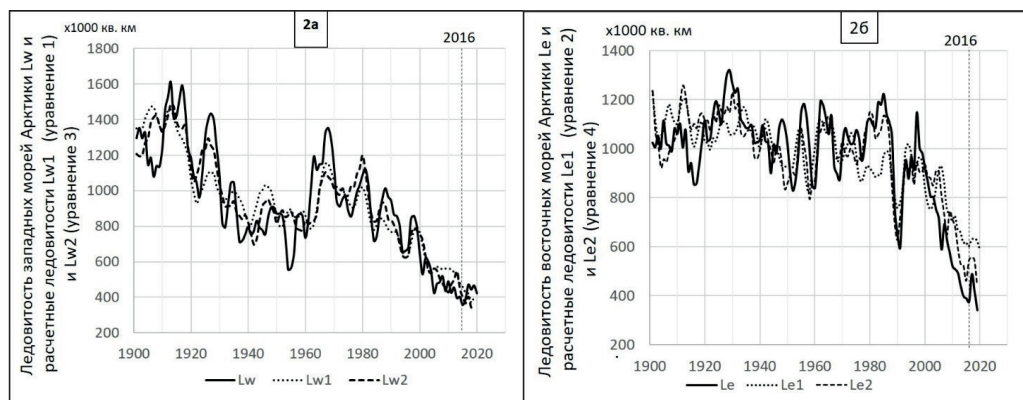


Рис. 2. Фактические и рассчитанные площади льдов в августе: (а) в западных морях L_w , L_{w1} , L_{w2} и (б) в восточных морях L_e , L_{e1} , L_{e2} Арктики для периода с 1901 г. по 2015 г., ограниченного на рисунках вертикальной штрихпунктирной линией.

Расчеты ледовитости для периода с 2017 г. по 2020 г. по независимым значениям предикторов приведены справа от штрихпунктирной линии.

Fig. 2. Actual and calculated ice areas in August:

(a) in the western seas L_w , L_{w1} , L_{w2} and (b) in the eastern seas L_e , L_{e1} , Arctic L_{e2} for the period 1901—2015, limited in the drawings by a vertical bar line.

Ice calculations for 2016—2018 for independent predictor values are given to the right of the dotted line.

ледовитости в 1901—2015 гг. Такая достаточно высокая точность предвычисления многолетней изменчивости площади льдов арктических морей получена впервые.

Анализ устойчивости статистических уравнений связи ледовитости с астрогеофизическими и гидрометеорологическими параметрами

Полученные статистические критерии уравнений (1)—(4) свидетельствуют об адекватности полученных моделей и расчеты по уравнениям соответствуют исходным данным ледовитости. Следовательно, разработанные модели подтверждают наличие сопряженности долгопериодных колебаний ледовитости арктических морей и астрогеофизических факторов, как независимо, так и в комплексе с гидрометеорологическими факторами.

С точки зрения использования статистической модели для прогнозирования ледовитости, критерия статистической адекватности недостаточно. В работе [29] указывается, что прогностическая адекватность достигается при увеличении $F_{кр}$ минимум в 4—5 раз, и это условие выполняется для моделей (1—4). Но дополнительным критерием возможности использования модели для прогноза является сохранение структуры статистического уравнения при изменении длины выборки, а также оценка надежности модели путем проверки ее точности по независимой выборке, поэтому были выполнены расчеты на измененной длине ряда (1933—2010 гг.). В результате применения мультирегрессионного анализа методом исключения используемых предикторов (астрогеофизических и гидрометеорологических) были получены следующие уравнения:

$$Lw2_{(1933-2010)} = 11262,6 * d\varepsilon(0) + 100,09 * lod(0) - 0,59 * SA(-4) - 2042,7 * X(0) - 223,1 * PNA_{IV-IX}(-1) - 301,73 * AMO(-5) + 7057,0; \quad (5)$$

$$Le2_{(1933-2010)} = -1287,8 * dX(-1) + 0,77 * SA(-5) + 332,2 * Ds(2) - 105,5 * AO_{X-III}(0) - 288,2 * PNA_{IV-IX}(-1) - 745,1 * AMO(-8) + 15331,6. \quad (6)$$

Как видим, в уравнения (5) и (6) вошли те же предикторы, что и в уравнения (3) и (4), но добавились переменная $X(0)$ в уравнении (5) для западных морей и $Ds(2)$ в уравнении (6) для восточных морей. Таким образом, при изменении длины выборки структура уравнений в общем сохранилась, что свидетельствует об устойчивости моделей, по крайней мере, на временных диапазонах 1901—2016 гг. и 1933—2010 гг.

Из оценок качества построенных моделей (табл. 6) следует, что ее стандартная ошибка для зависимых предикторов (S_1) меньше среднего квадратичного отклонения $\sigma_{\Delta L}$ предиктантов ($Lw2_{(1933-2010)}$ и $Le2_{(1933-2010)}$). При этом коэффициент детерминации R^2 больше 0,5—0,6 [29]; модели адекватны по критерию Фишера ($F > 5F_{кр}$); показатель качества модели $S_1/\sigma_{\Delta L}$ меньше требуемого предела 0,8. Следовательно, критерии качества моделей показывают, что полученные уравнения (5) и (6) являются статистически значимыми. И поскольку средняя квадратичная ошибка расчета S_2 меньше среднего квадратичного отклонения предиктора $\sigma_{\Delta L}$, принимаемого за предельную ошибку в сверхдолгосрочных прогнозах [29] (отношение $S_2/\sigma_{\Delta L}$ значительно меньше 0,8), то статистические модели характеризуются достоверностью.

Таблица 6

Статистические параметры регрессионных моделей (5) и (6). В таблице обозначены:
 S_1, S_2 — средняя квадратичная ошибка расчетов по зависимым (индекс 1) и независимым (индекс 2) предикторам; $\sigma_{\Delta L}$ — среднее квадратичное отклонение предиктантов ($Lw2_{(1933-2010)}$ и $Le2_{(1933-2010)}$)

Statistical parameters of regression models (5) and (6). The table shows:
 S_1, S_2 — the root mean square error of the test calculations for dependent (index 1) and independent (index 2) predictors; $\sigma_{\Delta L}$ — the root mean square deviation of the predictors ($Lw2_{(1933-2010)}$ and $Le2_{(1933-2010)}$)

	$Lw2_{(1933-2010)}$	$Le2_{(1933-2010)}$
Общий коэффициент корреляции, R	0,82	0,86
Коэффициент детерминации, R^2	0,68	0,75
Критерий Фишера, F	$F(5,74) = 31,2$	$F(5,74) = 43,6$
Табличное значение критерия Фишера, $F_{кр}$	2,3	2,3
Показатель качества модели, $S_1/\sigma_{\Delta L}$	0,54	0,35
Эффективность расчета по независимым предикторам, $S_2/\sigma_{\Delta L}$	0,43	0,37

По уравнениям (5) и (6) были произведены расчеты ледовитости на независимом ряде предикторов 2011—2020 гг. (на рис. 3 результаты расчета приведены

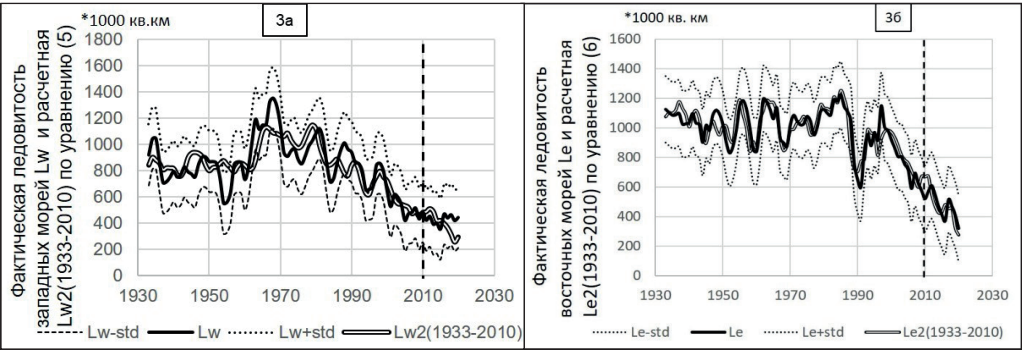


Рис. 3. Фактические Lw, Le (толстые черные линии) и рассчитанные $Lw2_{(1933-2010)}, Le2_{(1933-2010)}$ (тонкие двойные линии) площади льдов в августе в западных (а) и в восточных (б) морях Арктики для периода с 1933 г. по 2010 г., ограниченного на рисунках вертикальной штриховой линией. Пунктирными линиями нанесены значения ледовитости минус и плюс стандартное отклонение ($Lw-std, Le-std$ и $Lw+std, Le+std$).

Расчеты ледовитости для периода с 2011 г. по 2020 г. по независимым значениям предикторов приведены справа от вертикальной штриховой линии.

Fig. 3. Actual Lw, Le (thick black lines) and calculated $Lw2_{(1933-2010)}, Le2_{(1933-2010)}$ (thin double lines) ice areas in August in the western (a) and eastern (b) Arctic seas for the period 1933—2010, limited in the figures by a vertical dashed line. The dotted lines show the values of the arctic ice areas minus and plus the standard deviation ($Lw-std, Le-std$ and $Lw+std, Le+std$).

Calculations of ice cover for 2011—2020 based on independent predictor values are shown to the right of the vertical dashed line.

справа от вертикальной штриховой линии) и выполнены оценки точности расчета ледовитости, которые приведены в последней строке табл. 6. Результаты показывают удовлетворительную эффективность расчетов, свидетельствуют об адекватности (значимости) полученных моделей, о соответствии расчетов исходным данным ледовитости и подтверждают достоверность статистических моделей. Выполненное исследование может служить хорошим основанием для развития методов сверхдолгосрочного расчета и прогноза ледовитости путем построения статистических и физико-статистических моделей.

Заключение

Выполненный анализ установил тесную сопряженность между долгопериодными колебаниями ледовитости арктических морей и выбранными астрогеофизическими параметрами. Использование в качестве предикторов только астрогеофизических характеристик позволяет получить статистические уравнения многолетних изменений площади льдов в августе и описать 71 % и 51 % общей дисперсии изменчивости ледовитости соответственно западных и восточных морей Арктики.

Дополнительное подключение в анализ гидрометеорологических факторов повышает точность воспроизведения долгопериодных изменений ледовитости на 11—25 %. Получены оценки вклада астрогеофизических и гидрометеорологических параметров в общую дисперсию ледовитости западных и восточных морей Арктики, которые равны для западных морей 49 % и 32 % и для восточных 33 % и 38 %. Но если отнести влияние Атлантики (индекс АМО) к внешним факторам, то вклады внешних (включая астрогеофизические) и гидрометеорологических параметров в общую дисперсию ледовитости западных и восточных морей Арктики изменяются и равны для западных морей 78 % и 3 % и для восточных 69 % и 2 %, соответственно.

Расчет ледовитости на три и десять лет вперед по полученным уравнениям с независимыми астрогеофизическими и гидрометеорологическими предикторами демонстрируют удовлетворительно согласие предвычисленных величин и фактических данных ледовитости. Этот результат свидетельствует об успешном моделировании многолетних колебаний ледовитости.

Авторское исследование является развитием статистического подхода к моделированию долговременных колебаний ледовитости морей Арктики, ключевым моментом которого стало включение в предикторы астрогеофизических параметров наряду с традиционными гидрометеорологическими индексами. Этот подход является новой парадигмой методологии комплексного описания многолетних колебаний ледовитости, и может служить хорошим основанием для развития методов сверхдолгосрочного расчета и прогноза не только летней ледовитости арктических морей, но и других характеристик климатического состояния Арктики.

Литература

1. Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П. и др. Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова Евразийского шельфа / СПб: Наука. 2007. 135 с.

2. Timokhov L., Ashik I., Kirillov S. et al. Extreme Changes of the Arctic Ocean during and after IPY2007/2008 // *Polarforschug*. 2012. V. 81. No. 2. P. 85—102.
3. Алексеев Г. В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундамент. и прикладная климатология*. 2015. №1. С. 11—26.
4. Aksenov Y., Popova E. E., Yool A. et al. On the future navigability of Arctic sea routes: High-resolution projections of the Arctic Ocean and sea ice // *Marine Policy*, 10.1016/j.marpol.2015.12.027.
5. Максимов И. В. Геофизические силы и воды океана. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 447 с.
6. Гудкович З. М., Саруханян Э. И., Смирнов Н. П. «Полюсный прилив» в атмосфере высоких широт и колебания ледовитости арктических морей // *Доклады АН*. 1970. Т. 190, № 3. С. 954—957.
7. Слепцов-Шевлевич Б. А., Бояринов А. М. Солнечный ветер, вращение Земли и климат. Санкт-Петербург: 2002. 159 с.
8. Дмитриев А. А., Белязо В. А., Гудошников Ю. П. Ритмические колебания земных природных процессов и их гравитационная обусловленность. СПб: Издательство Политехнического университета. 2011. 231 с.
9. Визе В. Ю. Колебания солнечной активности и ледовитости полярных морей / Доклады юбилейной сессии Арктического института. Л., изд-во Главсевморпути, 1945. 7 с.
10. Карклин В. П. 22-летний цикл солнечной активности и поле атмосферного давления умеренных и высоких широт северного полушария // *Известия ВГО*, 1973, № 3, С. 275—280.
11. Карклин В. П., Ковалев Е. Г. Влияние солнечной активности на формирование крупных аномалий ледовитости арктических морей // *Труды ААНИИ*. 1994. Т. 432. С. 28—35.
12. Санцевич Т. И. К методике долгосрочных гидрометеорологических прогнозов для Арктики // *Труды ААНИИ*. 1970. Т. 292. С. 49—86.
13. Слепцов-Шевлевич Б. А. Геофизические основы морских гидрологических прогнозов. М.: В/О “Мортехинформреклам”. 1991. 103 с.
14. Егоров А. Г. Солнечный цикл и два режима многолетнего изменения приземного давления в высоких и умеренных широтах северного полушария Земли в зимний период // *Доклады Академии Наук*. 2007. Т. 414. № 3. С. 402—407.
15. Слепцов-Шевлевич Б. А., Захаров В. Ф. Проявление солнечной активности в многолетних колебаниях ледовитости в приатлантической Арктике // *Известия Русского геогр. о-ва*. 1996. Т. 128. Вып.2. С. 55—58.
16. Ogurtsov M. G., Nagovitsyn Yu. A., Kocharov G. E. and Jungner H. Long period cycles of the sun's activity recorded in direct solar data and proxies // *Solar Physics* 2002. 211: 371—394,
17. Гудкович З. М., Карклин В. П., Фролов И. Е. Внутривековые изменения климата, площади ледяного покрова, Евразийских арктических морей и их возможные причины // *Метеорология и гидрология*. 2005. №6. С. 5—14.
18. Федоров В. М. Солнечная радиация и климат Земли. М.: ФИЗМАТГИЗ, 2018. 232 с.
19. Лесгафт Э. Льды Северного Ледовитого океана и морской путь из Европы в Сибирь. СПб., 1913.
20. Визе В. Ю. Основы долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. Труды ААНИИ. Т. 190. М.: Изд-во Главсевморпути. 1944б. 274 с.
21. Захаров В. Ф. Малинин В. Н. Морские льды и климат. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 92 с.
22. Vinje T. Fram strait ice fluxes and atmospheric circulation: 1950—2000 // *J. Climate*. 2001. No.14. P. 3508—3517.
23. Карклин В. П., Юлин А. В., Карелин И. Д., Иванов В. В. Климатические колебания ледовитости арктических морей сибирского шельфа // *Тр. ААНИИ*. 2001. Т. 443. С. 5—11.
24. Лебедев А. А., Миронов Е. У. Реконструкция ледовых условий в Северной Атлантики и прилегающих морях в годы Второй Мировой войны // *Труды ААНИИ*. 2001. Т. 443. С. 30—37.
25. Йоханнесен О. М., Александров В. Ю., Фролов И. Е. и др. Научные исследования в Арктике. Т. 3. Дистанционное зондирование морских льдов на Северном морском пути: изучение и применение. СПб.: Наука, 2007. 512 с.
26. Единая система информации об обстановке в Мировом океане. URL: <http://www.aari.ru/projects/ESIMO/index.php> (дата обращения 24.06.2019).
27. Медведев И. П., Куликов Е. А., Рабинович А. Б., Лапшин В. Б. Чандлеровские биения и полюсный прилив в Северном и Балтийском морях // *Гелиогеофизические исследования*. 2018. Вып. 18. С. 9—17.

28. Электронный ресурс <http://statistica.ru/theory>
29. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик (на примере Северо-Европейского бассейна). Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2003, 129 с.
30. Тимохов Л. А., Бородачев В. Е., Бородачев И. В. и др. Роль гидрометеорологических факторов и солнечной активности в межгодовых изменениях площади льдов Восточно-Сибирского моря // Лёд и Снег. 2019. 59(2). С. 222—233.
31. Тимохов Л. А., Вязигина Н. А., Миронов Е. У., Попов А. В. Особенности сезонной и межгодовой изменчивости ледяного покрова Гренландского моря // Лёд и Снег. 2018. 58(1). 127—134.
32. Bekryaev R. V., Polyakov I. V., Alexeev V. A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern arctic warming // J. Climate. 2010. 23(14): 3888—3906.
33. Тимохов Л. А., Малинин В. Н., Иванов В. В. Связь долговременных изменений температуры воздуха в Арктике с колебаниями гидрометеорологических и астрогеофизических факторов // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 451—473.

References

1. Frolov I. E., Goodkovich Z. M., Karklin V. P. et al. *Nauchnyye issledovaniya v Arktike. T. 2. Klimaticheskiye izmeneniya ledyanogo pokrova Yevraziyskogo shel'fa = Scientific research in the Arctic. T. 2. Climatic changes in the ice sheet of the Eurasian shelf*. St. Petersburg: Nauka. 2007:135 p. (In Russ.).
2. Timokhov L., Ashik I., Kirillov S. et al. Extreme Changes of the Arctic Ocean during and after IPY2007/2008. *Polarforschung*. 2012; 81(2): 85—102.
3. Alekseev G. V. Development and amplification of global warming in the Arctic. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology*. 2015; (1): (11—26). (In Russ.).
4. Aksenov Y., Popova E. E., Yool A. et al. On the future navigability of Arctic sea routes: High-resolution projections of the Arctic Ocean and sea ice. *Marine Policy*. 10.1016/j.marpol.2015.12.027.
5. Maximov I. V. *Geofizicheskiye sily i vody okean = Geophysical forces and waters of the ocean*. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1970: 447 p. (In Russ.).
6. Gudkovich Z. M., Sarukhanyan E. I., Smirnov N. P. “Polar tide” in the atmosphere of high latitudes and fluctuations of ice cover of the Arctic seas. *Doklady of the Academy of Sciences = Reports earth sciences*. 1970; (190)3: (954—957). (In Russ.).
7. Sleptsov-Shevlevich B. A., Boyarinov A. M. *Solnechnyy veter, vrashcheniye Zemli i klimat = Solar wind, Earth rotation and climate*. St. Petersburg. 2002: 159 p. (In Russ.).
8. Dmitriyev A. A., Belyazo V. A., Gudoshnikov Yu. P. *Ritmicheskiye kolebaniya zemnykh prirodnnykh protsessov i ikh gravitatsionnaya obuslovlennost' = Rhythmic fluctuations of terrestrial natural processes and their gravitational conditionality*. St. Petersburg: Izdatelstvo Politekhnicheskogo Universiteta. 2011: 231 p. (In Russ.).
9. Vise V. Yu. *Kolebaniya solnechnoy aktivnosti i ledovitosti polyarnykh morey / Doklady yubileyной sessii Arkticheskogo instituta = Fluctuations of solar activity and ledovitost of the polar seas. Doklady yubileyной sessii Arkticheskogo instituta*. Leningrad: Izdatelstvo Glavsevmorputi. 1945. (In Russ.).
10. Karklin V. P. 22-year cycle of solar activity and the atmospheric pressure field of the temperate and high latitudes of the northern hemisphere. *Izvestiya VGO = VGO News*. 1973; (3): (275—280) (In Russ.).
11. Karklin V. P., Kovalyov E. G. Influence of solar activity on forming of large anomalies of a ledovitost of the Arctic seas. *Trudy Arkticheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta = Proceeding of the AARI*. 1994; (432): (28—35). (In Russ.).
12. Santsevich T. I. To a technique of long-term hydrometeorological forecasts for the Arctic. *Trudy Arkticheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta = Proceeding of the AARI*. 1970; (292): (49—86). (In Russ.).
13. Sleptsov-Shevlevich B. A. *Geofizicheskiye osnovy morskikh gidrologicheskikh prognozov = Geophysical bases of sea hydrological forecasts*. Moscow: Mortechnikinformreklam. 1991:103 p. (In Russ.).
14. Egorov A. G. Solar cycle and two regimes of long-term changes in surface pressure in high and temperate latitudes of the Earth's northern hemisphere in winter. *Doklady Akademii Nauk. = Reports of the Academy of Sciences*. 2007; 414(3): (402—407). (In Russ.).

15. Sleptsov—Shevlevich B. A., Zakharov V. F. Manifestation of solar activity in long—term fluctuations of a ledovitost in the priatlantichesky Arctic. *Izvestiya russkogo geograficheskogo obshchestva = News RGO*. 1996; 128(2): (55—58). (In Russ.).
16. Ogurtsov M. G., Nagovitsyn Yu. A., Kocharov G. E. and Jungner H. Long period cycles of the sun's activity recorded in direct solar data and proxies. *Solar Physics*. 2002; (211): 371—394.
17. Gudkovich Z. M., Karklin V. P., Frolov I. E. Centuries-old climate and ice cover of the Eurasian Arctic seas changes and their possible causes. *Meteorologiya i Gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2005; (6): (5—14). (In Russ.).
18. Fedorov V. M. *Solnechnaya radiatsiya i klimat Zemli = Solar radiation and climate of the Earth*. Moscow: Fizmatgiz. 2018: 232 p. (In Russ.).
19. Lesgaft E. *L'dy Severnogo Ledovitogo okeana i morskoy put' iz Yevropy v Sibir' = The ice of the Arctic Ocean and the sea route from Europe to Siberia*. St. Petersburg, 1913.
20. Wiese V. Y. *Osnovy dolgosrochnnykh ledovykh prognozov dlya arkticheskikh morey. = Fundamentals of long-term ice forecasts for the Arctic seas*. Proceedings of the AARI. Moscow: Glavsevmorput publishing house. 1944; (190): 274 p. (In Russ.).
21. Zakharov V. F., Malinin V. N. *Morskiye l'dy i klimat = Sea ice in the climate*. St. Petersburg, Hydrometeoizdat. 2000: 92 p. (In Russ.).
22. Vinje T. Fram strait ice fluxes and atmospheric circulation: 1950-2000. *J. Climate*. 2001; (14): 3508—3517.
23. Karklin V. P., Yulin A. V., Karelin I. D., Ivanov V. V. Climatic fluctuations of the Arctic seas of the Siberian shelf. *Trudy Arkticheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta = Proceeding of the AARI*. 2001; (443): (5—11). (In Russ.).
24. Lebedev A. A., Mironov E. U. Reconstruction of ice conditions in the North Atlantic and adjacent the seas during the Second World War. *Trudy Arkticheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta = Proceeding of the AARI*. 2001; (443): (30—37). (In Russ.).
25. Johannessen O. M., Alexandrov V. Yu., Frolov I. Ye., et al. *Nauchnyye issledovaniya v Arktike. Vol. 3. Distantionnoye zondirovaniye morskikh l'dov na Severnom morskoy puti: izucheniyе i primeneniye = Scientific research in Arctic. Vol. 3. Remote Sensing of Ice in the Northern Sea Route: Studies and Applications*. SPb.: Nauka, 2007: 512 p. (In Russ.).
26. Electronic resource <https://www.aari.ru/projects/ECIMO/index.php>
27. Medvedev I. P., Kulikov E. A., Rabinovich A. B., Lapshin V. B. Chandler Beats and Pole Tide in the North and Baltic Seas. *Geliogeofizicheskiye issledovaniya = Heliogeophysical Research*. 2018; (18): (9—17). (In Russ.).
28. Electronic resource <http://statistica.ru/theory>.
29. Malinin V. N., Gordeeva S. M. *Fiziko-statisticheskiy metod prognoza okeanologicheskikh kharakteristik (na primere Severo-Yevropeyskogo basseyna). = Physico-statistical method for predicting oceanological characteristics (on the example of the North European Basin)*. Murmansk, PINRO Publishing House. 2003: 129 p. (In Russ.).
30. Timokhov L. A., Borodachev V. E., Borodachev I.V. et al. A role of hydrometeorological factors and solar activity in interannual changes of the area of ice of the East Siberian Sea. *Led i sneg Ice = Ice and Snow*. 2019; 59(2): (222—233). (In Russ.).
31. Timokhov L. A., Vyazigina N. A., Mironov E. U., Popov A. V. Features of seasonal and interannual variability of an ice cover of the Greenland Sea. *Led i sneg Ice = Ice and Snow*. 2018; 58(1): (127—134). (In Russ.).
32. Bekryaev R. V., Polyakov I. V., Alexeev V. A. Role of polar amplification in long—term surface air temperature variations and modern arctic warming. *J. Climate*, 2010. 23(14): 3888—3906.
33. Timokhov L. A., Malinin V. N., Ivanov V. V. Relationship of Long-Term Changes in Arctic Air Temperature with Fluctuations in Hydrometeorological and Astrogeophysical Factors. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2024; (76): (451—473). (In Russ.).

Информация об авторах

Тимохов Леонид Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела океанологии, ФГБУ «АНИИ», ltim@aari.ru.

Фролов Иван Евгеньевич, член-корреспондент РАН, доктор географических наук, научный руководитель ФГБУ «ААНИИ».

Белязо Валерий Александрович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, отдел ледового режима и прогнозов, ФГБУ «ААНИИ», v—belizo37@mail.ru.

Дмитриев Александр Алексеевич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «ААНИИ», aad1907@yandex.ru.

Трошичев Олег Александрович, доктор физико-математических наук, научный руководитель отдела геофизики, ФГБУ «ААНИИ», olegtro@aaari.ru.

Information about the authors

Timokhov L. A., Doctor of Physical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Department of Oceanology, Federal State Budgetary Institution Arctic and Antarctic Research Institute.

Frolov I. E., Doctor of Geography Sciences, Professor, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, scientific director of Arctic and Antarctic Research Institute.

Belyazo V. A., Candidate of Geography Sciences, Senior Researcher, Department of Ice Regime and Forecasts, Arctic and Antarctic Research Institute.

Dmitriev A. A., Candidate of Geography Sciences, Senior Researcher, Arctic and Antarctic Research Institute.

Troshichev O. A., Doctor of Physical Sciences, Scientific Director of the Department of Geophysics, Arctic and Antarctic Research Institute.

Конфликт интересов: **конфликт интересов отсутствует.**

Статья поступила 13.08.2025

Принята в печать 07.11.2025

The article was received on 13.08.2025

The article was accepted on 07.11.2025

Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 666—679.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(81):666—679.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК [556.555.2:551.583](282.255.5)

doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-666-679

Уровенный режим озера Балхаш и его изменения в условиях нестационарного климата

***Валерий Сергеевич Вуглинский, Валерия Александровна Сушкова,
Любовь Сергеевна Курочкина***

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, vvuglins@mail.ru

Аннотация. Изучение динамики уровней воды крупных озер имеет важное научное значение, поскольку уровень является интегральным показателем состояния водных ресурсов водоема. В статье представлены результаты исследования закономерностей уровенного режима крупного бессточного озера Балхаш за период с 1944 г. по 2020 г. Предложены приемы заполнения пропусков в многолетних рядах уровней воды, использования спутниковой информации для их продления, восстановления многолетних рядов с учетом антропогенного влияния. Выполнен анализ значимости наклонов линий трендов в многолетних рядах уровней воды за период с 1979 г. по 2020 г. Дана количественная оценка изменений среднегодовых уровней озера за последние 40 лет в условиях нестационарной климатической ситуации.

Ключевые слова: озеро Балхаш, уровень воды, восстановление многолетнего ряда, изменчивость уровня, нестационарный период.

Для цитирования: Вуглинский В. С., Сушкова В. А., Курочкина Л. С. Уровенный режим озера Балхаш и его изменения в условиях нестационарного климата // Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 666—679. doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-666-679.

HYDROLOGY

Original article

Water level regime of lake Balkhash and its changes in conditions of a non-stationary climate

Valery S. Vuglinsky, Valeria A. Sushkova, Lyubov S. Kurochkina

State Hydrological Institute, Russia, vvuglins@mail.ru

Summary. Studying the water level dynamics of large lakes is of significant scientific importance, as the level is an integral indicator of the state of the reservoir water resources. This article presents the results of a study of the water level patterns of Lake Balkhash, a large endorheic lake. To study the long-

term dynamics of the water level of Lake Balkhash, the period from 1944 to 2020 was selected, divided into two half-periods: with a conditionally stationary climate (1944—1978) and a non-stationary climate (1979—2020). The main characteristics of the water level of Lake Balkhash were the average monthly and average annual values obtained from ground-based observations, averaged for the entire water body. In addition to the long-term water level series, similar long-term series of climate characteristics (precipitation and air temperature) were generated for joint analysis. Methods are proposed for filling gaps in long-term water level series, using satellite information to extend them, and restoring long-term series, taking into account anthropogenic influence. An analysis of the significance and slopes of trend lines in long-term water level series for the period from 1979 to 2020 was performed. A quantitative assessment of changes in average annual lake levels over the past 40 years under non-stationary climatic conditions was provided. It showed that, under real conditions, the increase in the average annual level of Lake Balkhash for the period from 1979 to 2020 (the period of non-stationary climatic situation) compared to the previous period (1944—1978) was +1.56 m. An analysis of changes in the average annual air temperature for the Lake Balkhash region revealed an increase in air temperature in the lake area for the period from 1979 to 2020 by +1.2 °C compared to the previous calculation period.

Keywords: Lake Balkhash, water level, restoration of a long-term series, quantitative assessment of changes, non-stationary period.

For citation: *Vuglinsky V. S., Sushkova V. A., Kurochkina L. S. Water level regime of lake Balkhash and its changes in conditions of a non-stationary climate *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(81):(666—679). doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-666-679. (In Russ.).*

Введение

Согласно мнению ученых, климат на нашей планете, начиная со второй половины XX века, начал меняться, вследствие чего многие природные процессы и явления стали отличаться от тех, которые были характерны для предшествующего столетия со стационарным климатом [1, 2]. Эта ситуация коснулась и динамики уровней воды крупных озер, поскольку уровень воды является результатом сложившегося соотношения между компонентами водного баланса озера, многие из которых прямо или косвенно зависят от климатических условий, сложившихся над акваторией озера и его водосбором.

Озеро Балхаш — бессточное озеро в Балхаш-Алакольской котловине на юго-востоке Казахстана. Главные питающие его реки — Или, Каратал и Аксу обеспечивают до 80 % притока в озеро. В табл. 1 представлены основные физико-географические и морфометрические характеристики озера [3].

Таблица 1

Основные географические и морфометрические характеристики оз. Балхаш

Main geographical and morphometric characteristics of Lake Balkhash

Местоположение		Морфометрические характеристики*					
Широта, град. СШ	Долгота, град. ВД	Площадь водосбора, км ²	Объём, км ³	Площадь зеркала, км ²	Средняя глубина, м	Длина, км	Средняя ширина, км
46,54	74,88	413000	94	17500	5,8	614	до 30

* При отметке уровня воды 341,41 м.

Уровеньный режим озера претерпевал значительные изменения за последние 80—100 лет, связанные как с климатическими изменениями, так и с антропогенным влиянием. Особо следует отметить период длительного наполнения

Капчагайского водохранилища на р. Или, в течение которого озеро ежегодно недополучало части годового стока, которая расходовалась на заполнение указанного водохранилища. Как следствие, уровни озера в этот период ежегодно снижались, ухудшая водохозяйственную и экологическую ситуацию в районе озера [4].

В настоящей статье рассматриваются результаты анализа многолетних колебаний уровня воды оз. Балхаш за длительный период, включающий стационарный климатический период (1944—1978 гг.) и последующий период с нестационарным климатом (1979—2020 гг.), и даются оценки изменений уровня озера за второй период по сравнению с предыдущим. Выбор указанных периодов обусловлен тем, что, по мнению многих исследователей, наиболее ощутимые изменения климата и связанные с ними изменения гидрологических характеристик на территории Евразии, в том числе и на территории бывшего СССР, произошли в конце 70-х — начале 80-х гг. прошлого века [5, 6, 7].

Исходные данные и их корректировка

В качестве основных характеристик уровня воды озера Балхаш рассматривались среднемесячные и среднегодовые значения, полученные по данным наземных наблюдений, осредненные для всего водоема. Для заполнения пропусков в рядах наземных наблюдений и их продления использовались результаты спутниковых наблюдений.

Исходная информация об уровнях воды по данным наземных наблюдений была заимствована из базы данных «ГВК-озера», находящейся в ФГБУ «ГГИ», а также любезно предоставлена РГП «Казгидромет». Дополнительно были использованы синхронные многолетние ряды данных наземных и спутниковых наблюдений за уровнем воды оз. Балхаш, представленные в интегрированной базе данных Международного центра данных по гидрологии озёр и водохранилищ (International Data Centre on Hydrology of Lakes and Reservoirs — HYDROLARE), функционирующего в Государственном гидрологическом институте под эгидой Всемирной Метеорологической организации (ВМО). В дополнение к многолетним рядам уровней воды для совместного анализа были сформированы аналогичные многолетние ряды климатических характеристик (осадков и температуры воздуха) с использованием международного архива подразделения климатических исследований в Школе наук об окружающей среде Университета Восточной Англии (University of East Anglian) [8]. Метеорологические данные были получены путем вычисления осредненных значений температуры воздуха и осадков для квадратов сетки размером $0,5^\circ$, в которых расположено озеро.

После первичного анализа сформированного многолетнего ряда среднемесячных уровней воды по данным наземных наблюдений были выявлены существенные пропуски, составившие 4 полных года (с 2017 г. по 2020 г.) и 27 отдельных месяцев. Для получения непрерывных многолетних рядов среднемесячных и среднегодовых значений уровня воды озера было выполнено заполнение пропусков в рядах с применением следующих приемов:

— линейная интерполяция между соседними членами ряда;

— подбор года-аналога с близкими значениями имеющихся крайних членов ряда;

— использование спутниковых данных.

Первый прием применялся в случае пропусков в рядах, не превышающих пяти месяцев. Второй прием применялся в случае пропусков в рядах от шести до десяти месяцев. При этом соблюдалось условие, что после заполнения пропусков среднегодовое значение уровня воды в восстановленном ряду должно быть близким к аналогичному значению принятого года-аналога. С использованием указанных двух приемов были восстановлены пропуски в рядах среднемесячных и среднегодовых значений за период с 1944 г. по 2016 г.

Для получения среднемесячных и среднегодовых значений уровней воды за период с 2017 г. по 2020 г. были использованы данные спутниковых наблюдений. Основы методики корректировки спутниковых данных по уровню воды крупных озер с использованием данных наземных наблюдений были разработаны Лабораторией космических исследований в области геофизики и океанографии (LEGOS) Национального центра космических исследований Франции (CNES) [9]. В дальнейшем методика получила развитие в совместных работах указанной лаборатории и Государственного гидрологического института [10]. Среднемесячные уровни воды по спутниковым данным рассчитываются как средние арифметические значения из результатов спутниковых измерений за месяц.

В распоряжении авторов имелись многолетние ряды среднемесячных уровней воды оз. Балхаш, полученные по результатам спутниковых наблюдений за период с 1992 г. по 2020 г. В них, как и в наземных рядах, также имелись пропуски — не было данных за 14 месяцев. Таким образом, для получения непрерывных спутниковых рядов требовалось заполнить указанные пропуски. Для этого был использован следующий методический подход. На основании выбора в хронологическом порядке, начиная с данных за 1992 г. всех месяцев с наличием как наземных, так и спутниковых значений уровней воды, были составлены комбинированные параллельные ряды среднемесячных значений наземных и спутниковых данных. Затем были построены совместные хронологические графики изменений среднемесячных уровней воды, чтобы оценить размах отклонений между спутниковыми и наземными данными. Особенно четко на таких графиках проявляются однонаправленные тенденции завышения или занижения спутниковых данных по сравнению с наземными. Такие графики, построенные для оз. Балхаш, представлены на рис. 1.

На графиках четко прослеживается синхронность в рядах спутниковых и наземных наблюдений. В то же время очевидны систематические отклонения спутниковых данных от наземных. В отдельные месяцы эти отклонения достигали 50 см. С целью исключения выявленных систематических погрешностей в спутниковом ряду все его значения были скорректированы путем введения коэффициента, полученного как частное от деления средних значений в параллельных комбинированных рядах. Для оз. Балхаш этот коэффициент составил 0,99. Путём умножения значений наземных данных на указанный коэффициент были заполнены пропуски в спутниковом ряду.

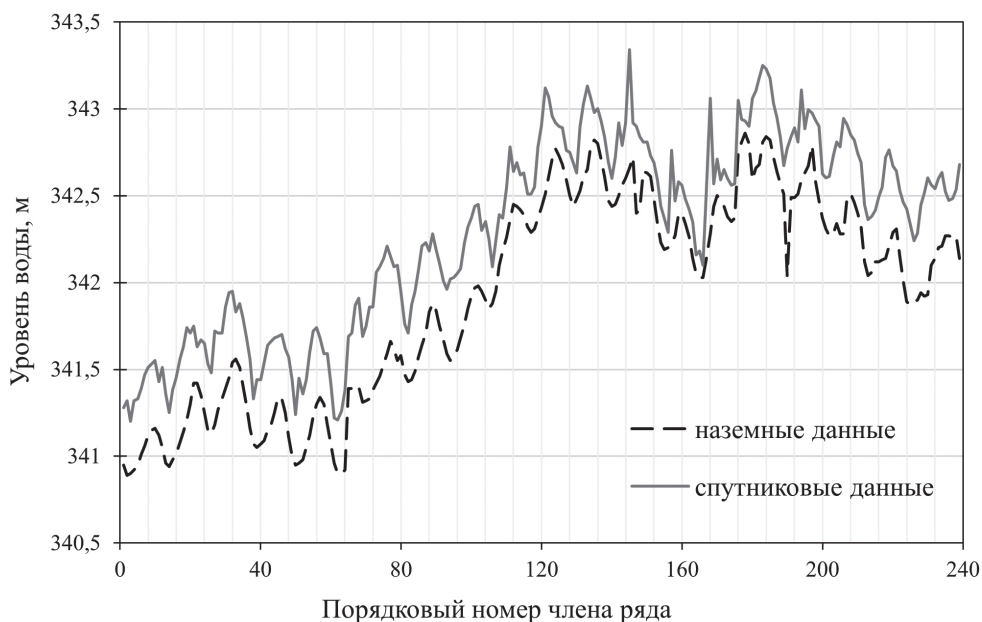


Рис. 1. Совместные комбинированные графики колебаний уровней воды оз. Балхаш за период с 1992 г. по 2016 г.

Fig. 1. Combined graphs of fluctuations in the water levels of Lake Balkhash for the period 1992—2016.

Для того, чтобы оценить репрезентативность полученного непрерывного спутникового ряда среднемесячных уровней воды за период с 1992 г. по 2016 г. и удалить возможные сомнительные и ошибочные значения, он был подвергнут статистическому анализу. В качестве статистических характеристик были определены средние, максимальные и минимальные значения многолетнего ряда, а также среднеквадратическое отклонение. Для удаления сомнительных и ошибочных значений был использован статистический способ выбраковки величин, выходящих за пределы полуторного размаха интерквартильного интервала между первым и третьим квартилями [11]. Все значения, лежащие за пределами полуторного размаха этого интервала, превышают допустимую статистическую ошибку разброса членов ряда, рассматриваются как случайные «выбросы» и подлежат удалению из ряда. В табл. 2 приведены статистические характеристики откорректированного многолетнего спутникового ряда среднемесячных значений уровня воды оз. Балхаш.

На рис. 2 представлены результаты квантильного анализа в виде «ящика с усами», построенного по данным откорректированного многолетнего ряда среднемесячных значений уровня воды оз. Балхаш, с помощью которого несложно определить «выбросы».

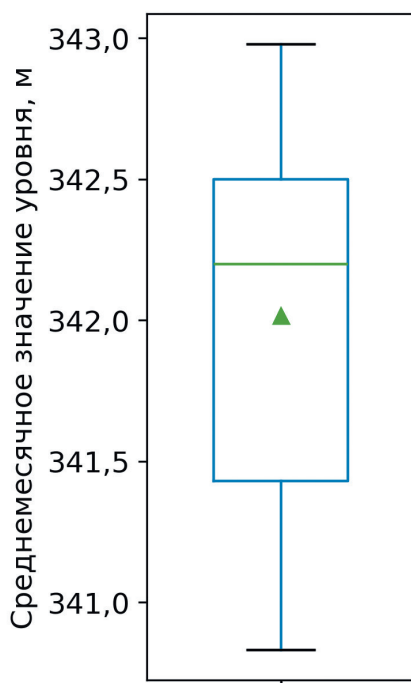


Рис. 2. «Ящик с усами», характеризующий разброс среднемесячных значений уровней воды оз. Балхаш в спутниковом откорректированном ряду.

Fig. 2. “Boxplot” characterizing the “spread” of the average monthly values of Lake Balkhash water levels in the satellite-corrected series.

Таблица 2

Статистические характеристики многолетнего спутникового ряда среднемесячных значений уровня воды оз. Балхаш за период с 1992 г. по 2016 г.
Statistical characteristics of the long-term satellite series of average monthly water levels in Lake Balkhash from 1992 to 2016

Статистические параметры				Квартили		
σ	Среднее значение, м	Максимальное значение, м	Минимальное значение, м	25 % (первый квартиль)	50 % (медиана)	75 % (третий квартиль)
0,57	342,08	343,33	340,83	341,43	342,20	342,56

Верхние и нижние стороны «ящика» характеризуют значения 75 % и 25 % квартилей, а горизонтальная линия внутри его — это среднее (медианное) значение многолетнего ряда. Все значения, лежащие за пределами полуторного размаха разницы между первым и третьим квартилями (1,7 см), превышают допустимую ошибку и подлежат удалению. Эта разница отнимается от значения 25 % (343,43 – 1,7 = 339,73 см). Поскольку полученное значение меньше минимального

значения в ряду, то принимается последнее — 340,83 см. Тот же алгоритм действий и при работе с 75 % квантилем ($342,56 + 1,7 = 343,69$ см). Так как полученное значение превышает максимальное по ряду, то принимается последнее — 343,33. На рис. 2 эти границы обозначены горизонтальными отрезками на вертикальных линиях, проведенных от нижней и верхней сторон «ящика с усами». Для многолетнего спутникового ряда уровней воды оз. Балхаш «выбросы» установлены не были и удалять их не пришлось.

Репрезентативность откорректированного спутникового ряда для оз. Балхаш оценивалась на основе сопоставления двух статистических параметров, полученных для наземного и спутникового рядов: среднеквадратического отклонения σ и коэффициента корреляции r [10, 12]. Величины среднеквадратических отклонений должны быть близкими между собой, а коэффициент корреляции должен составлять не менее 0,85. Указанные параметры для оз. Балхаш представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения статистических параметров многолетних рядов для оз. Балхаш

Values of statistical parameters of long-term series for Lake Balkhash

Вид многолетнего ряда	Среднеквадратическое отклонение σ	Коэффициент корреляции r
Наземные наблюдения	0,60	0,98
Спутниковые наблюдения	0,58	

Из таблицы видно, что откорректированный многолетний спутниковый ряд среднемесячных уровней воды оз. Балхаш за период с 1992 г. по 2016 г. соответствует принятым критериям и является репрезентативным. Результаты спутниковых наблюдений были использованы для заполнения периода с отсутствием наземных данных (с 2017 г. по 2020 г.). Среднемесячные значения уровней воды за этот период были рассчитаны на основании спутниковых данных путем введения соответствующего корректирующего коэффициента.

Сводный расчетный многолетний ряд среднемесячных уровней воды оз. Балхаш за период с 1944 г. по 2020 г. был сформирован на базе имевшегося наземного ряда с заполнением в нем пропусков и его продлением с использованием вышеизложенных методических подходов.

Преобразование расчетного многолетнего ряда среднегодовых уровней воды озера с учетом антропогенного воздействия

Уровенный режим оз. Балхаш был нарушен при строительстве Капчагайской ГЭС на впадающей в озеро р. Или, сопровождавшемся заполнением Капчагайского водохранилища, которое началось в 1970 г. Общая ёмкость водохранилища — 28,14 млрд м³, полезный объём — 6,6 млрд м. Чтобы резко не снизить уровень озера, заполнение водохранилища продолжалось 17 лет и завершилось в 1987 г. Согласно литературным источникам [4, 13, 14], с 1970 г. по 1987 г. среднегодовой уровень воды озера снизился на 2,2 м, а объём — на 30 км³.

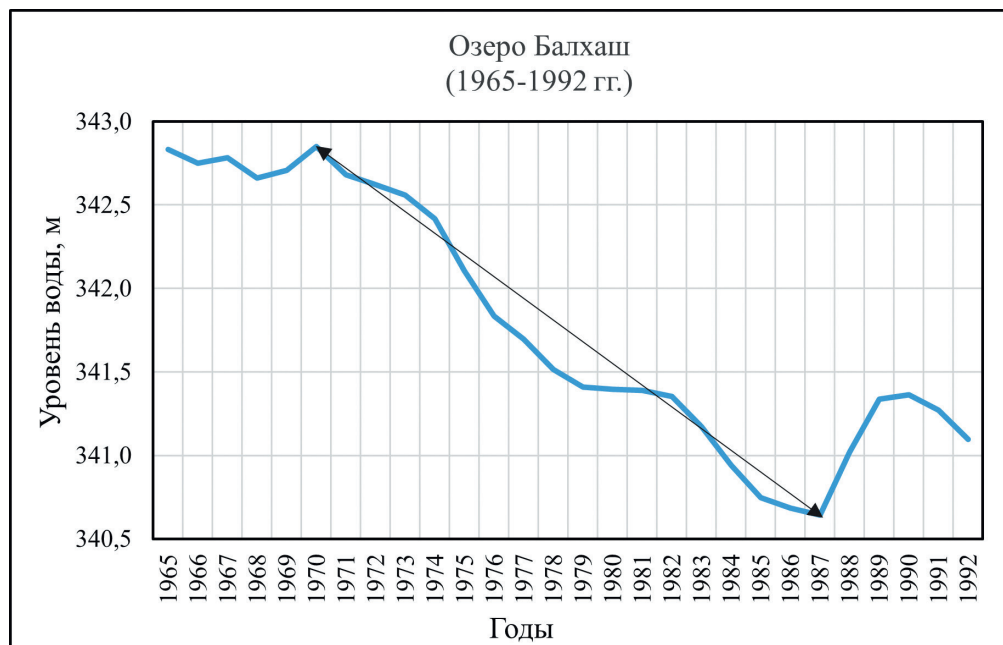


Рис. 3. Хронологический график изменений среднегодового уровня оз. Балхаш за период с 1965 г. по 1992 г. с линией тренда за период с 1980 г. по 1987 г.

Fig. 3. Chronological graph of changes in the average annual level of Lake Balkhash for the period from 1965 to 1992. With a trend line for the period from 1980 to 1987.

До строительства Капчагайской ГЭС уровень озера испытывал циклические колебания в основном между отметками 341 м и 342 м. В 1987 г. наблюдался минимальный уровень — 340,64 м. В последующие годы уровень начал повышаться, что некоторые специалисты объясняли большим количеством осадков, выпавших в 90-е гг. XX в. Очевидно, что в период с 1970 г. по 1987 г. естественный режим колебаний уровня озера был нарушен и, как следствие, нарушена однородность многолетнего ряда. Для восстановления однородности ряда была выполнена его корректировка.

На рис. 3 представлен хронологический график среднегодовых уровней воды оз. Балхаш за период с 1965 г. по 1992 г. В 1969 г. уровень озера находился на отметке 342,74 м, а в 1987 г., как уже отмечалось, на самой низкой отметке за период наблюдений, т. е. на отметке 340,64 м. Падение уровня составило 2,10 м.

Представленная на рисунке линия тренда с 1970 г. по 1987 г. отчетливо отражает близкий к равномерному характер снижения уровня воды оз. Балхаш в период наполнения Капчагайского водохранилища. Кривая хода уровня за рассматриваемый период не имеет существенных отклонений от линии тренда. Чтобы получить однородный ряд, в величины среднегодовых уровней воды в период с 1970 г. по 1987 г. равномерно по годам были введены нарастающим итогом

однородные положительные поправки около 0,12 м в год, составившие в сумме на конец 1987 г. +2,10 м. Полученные восстановленные значения уровня оз. Балхаш приведены ниже (табл. 4).

Таблица 4

Восстановленные среднегодовые уровни оз. Балхаш за период с 1970 г. по 1987 г.

Reconstructed average annual levels of Lake Balkhash for the period from 1970 to 1987.

Годы	Уровень воды, измеренный	Уровень воды, восстанов- ленный	Годы	Уровень воды, измеренный	Уровень воды, восстанов- ленный	Годы	Уровень воды, измеренный	Уровень воды, восстанов- ленный
1970	342,85	342,97	1976	342,10	342,90	1982	341,35	342,84
1971	342,68	342,91	1977	341,83	342,75	1983	341,17	342,77
1972	342,62	342,96	1978	341,70	342,73	1984	340,94	342,66
1973	342,56	343,02	1979	341,51	342,66	1985	340,75	342,59
1974	342,42	342,99	1980	341,41	342,67	1986	340,69	342,64
1975	342,10	342,79	1981	341,40	342,78	1987	340,64	342,71

В годы после 1987 г. каждое последующее значение ряда корректировалось на разность между среднегодовыми значениями текущего и последующего годов (по данным измерений). Таким образом был получен однородный восстановленный многолетний ряд среднегодовых уровней воды оз. Балхаш, который использовался в дальнейших расчетах. На рис. 4 приведены хронологические графики изменения среднегодового уровня воды оз. Балхаш за период с 1944 г. по 2020 г., построенные по исходному и восстановленному ряду.

Проверка однородности исходного и восстановленного многолетних рядов среднегодовых уровней воды за период с 1944 г. по 2020 г. по критериям Стьюдента (t-критерий) и Фишера (F-критерий) показала, что исходный ряд по обоим критериям оказался неоднородным, а восстановленный — однородным.

Количественная оценка изменений уровня воды озера Балхаш в условиях нестационарного климата

Для количественной оценки изменений уровня воды оз. Балхаш за период с 1979 г. по 2020 г. первоначально было необходимо установить значимость и направление линейного тренда за указанный период. Для оценки значимости тренда были использованы следующие методы: метод линейного тренда (linear_trend), метод Манна-Кендалла (mk_trend), метод Спирмана (spearman_rho) и ADF-тест [15]. Все четыре метода однозначно указали на значимость тренда в многолетнем восстановленном ряду среднегодовых уровней воды оз. Балхаш за рассматриваемый период. Для количественной оценки тренда был выполнен анализ наклона линий тренда с использованием следующих методов: линейная регрессия (МНК), метод Сена (Theil-Sen), RANSAC-регрессия и LAD-регрессия (метод наименьших модулей) [16, 17, 18]. На рис. 5 представлен график с линиями тренда, полученными с использованием указанных методов.

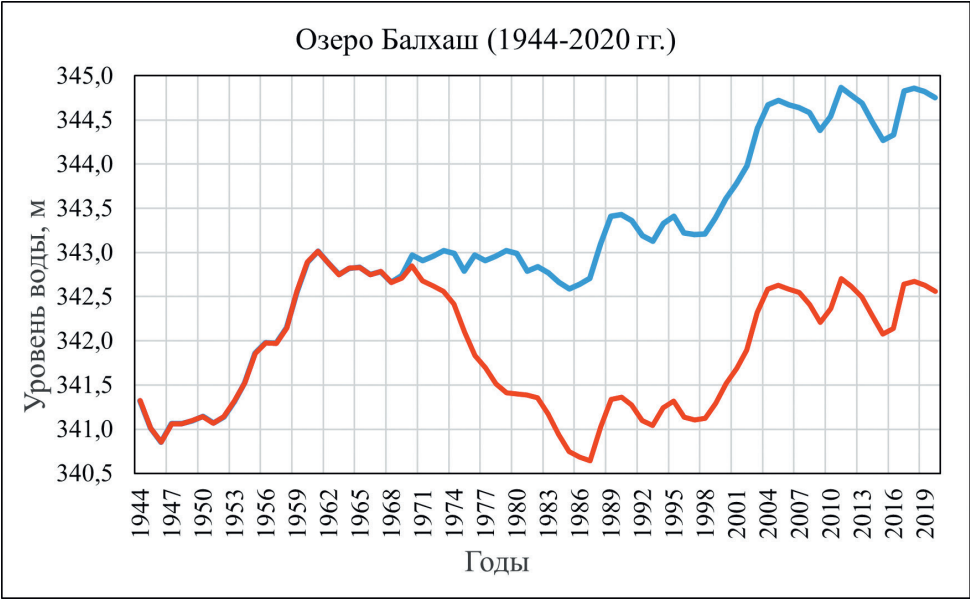


Рис. 4. Хронологические графики изменений среднегодового уровня оз. Балхаш, построенные по исходному (красный цвет) и восстановленному (синий цвет) рядам.

Fig. 4. Chronological graphs of changes in the average annual lake level of Lake Balkhash, constructed using the original (red) and reconstructed (blue) series.

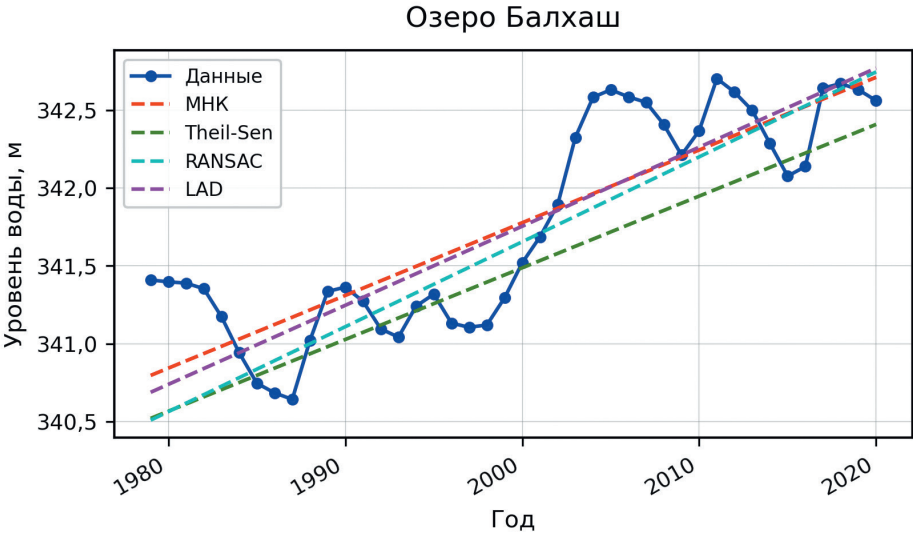


Рис. 5. График с линиями тренда, полученными с использованием различных методов.

Fig. 5. Graph with trend lines obtained using different methods.

Как видно из рисунка, все линии демонстрируют положительный характер тренда и три из них параллельны друг другу, а наклон четвертой — не сильно отличается от остальных. Количественные оценки наклона линий тренда, полученные по каждому из четырех использованных методов представлены в табл. 5.

Таблица 5

Значения наклонов линий тренда, полученные с использованием разных методов для многолетнего восстановленного ряда уровней воды оз. Балхаш за период с 1979 г. по 2020 г.

Slopes of trend lines obtained using different methods for the long-term reconstructed series of Lake Balkhash water levels for the period 1979—2020.

Значения наклонов линий тренда, м/год				Среднее значение наклона, м/год
Линейная регрессия (МНК)	Метод Сена	RANSAC-регрессия	LAD-регрессия	
0,047	0,046	0,052	0,051	+ 0,049

Исходя из полученного среднего значения наклона линий тренда, изменение восстановленного уровня оз. Балхаш за период с 1979 г. по 2020 г. по тренду составило: $0,049 \times 42 = 2,06$ м. Сравнение средних значений среднегодовых уровней воды озера за периоды с 1944 г. по 1978 г. и с 1979 г. по 2020 г. показало, что во второй период средний уровень был выше на 18 см. Таким образом, в естественных условиях (при отсутствии потерь воды р. Или на наполнение Капчагайского водохранилища), повышение среднегодового уровня оз. Балхаш за период с 1979 г. по 2020 г. (период нестационарной климатической ситуации) по сравнению с предыдущим периодом (с 1944 г. по 1978 г.) составило бы +2,24 м. В реальных условиях изменение уровня оз. Балхаш за период с 1979 г. по 2020 г. по тренду составило +1,85 м. Однако среднегодовой уровень озера за период с 1944 г. по 1978 г. был выше уровня за период с 1979 г. по 2020 г. на 29 см. Соответственно, в реальных условиях повышение среднегодового уровня оз. Балхаш за период с 1979 г. по 2020 г. (период нестационарной климатической ситуации) по сравнению с предыдущим периодом (с 1944 г. по 1978 г.) составило +1,56 м, что в какой-то мере компенсировало антропогенное снижение уровня озера, вызванное заполнением Капчагайского водохранилища.

Заключение

В течение последних 80—100 лет происходили существенные колебания уровня оз. Балхаш, связанные как с климатическими изменениями, так и с антропогенным влиянием. Длительное наполнение Капчагайского водохранилища на р. Или вызвало продолжительное антропогенное снижение уровня воды озера в период с 1970 г. по 1987 г. Для изучения многолетней динамики уровня озера Балхаш был выбран период с 1944 г. по 2020 г., разделенный на два полупериода: с условно стационарным климатом (с 1944 г. по 1978 г.) и нестационарным климатом (с 1979 г. по 2020 г.). В связи с наличием пропусков в рядах наземных наблюдений за уровнем были применены методы, позволившие не только заполнить

пропуски в наземных рядах данных, но и продлить эти ряды с использованием спутниковых наблюдений. В последнем случае была применена методика корректировки спутниковых данных, адаптированная применительно к многолетним рядам среднемесячных и среднегодовых уровней озера, что позволило получить восстановленные ряды уровней за весь выбранный расчетный период. Однородность восстановленного ряда среднегодовых уровней была подтверждена соответствующими статистическими критериями.

Для того, чтобы получить количественную оценку изменений среднегодовых уровней воды оз. Балхаш за период с 1979 г. по 2020 г. первоначально была оценена значимость тренда за указанный период с использованием четырех различных статистических подходов. Все четыре метода однозначно указали на значимость тренда в многолетнем восстановленном ряду среднегодовых уровней воды оз. Балхаш за рассматриваемый период. Непосредственная оценка изменений уровня воды оз. Балхаш за указанный период была получена на основании анализа наклона линий (коэффициентов) тренда также с использованием различных статистических подходов. В итоге было установлено, что в естественных условиях (при отсутствии потерь воды р. Или на наполнение Капчагайского водохранилища), повышение среднегодового уровня оз. Балхаш за период с 1979 г. по 2020 г. (период нестационарной климатической ситуации) по сравнению с предыдущим периодом (с 1944 г. по 1978 г.) составило бы +2,24 м.

Интересно отметить, что анализ изменений среднегодовой температуры воздуха для района оз. Балхаш с использованием тех же четырех критериев оценки линий наклона тренда, выявил рост температуры воздуха в районе озера за период с 1979 г. по 2020 г. на +1.2 °С по сравнению с предыдущим расчетным периодом. В то же время корреляционная связь между многолетними рядами среднегодовых уровней воды и среднегодовой температуры воды за рассматриваемый период оказалась слабой.

Таким образом, основная научная задача, поставленная авторами статьи, была успешно решена. Предложенные в статье приемы заполнения пропусков в многолетних рядах уровней воды, использования спутниковой информации, восстановления многолетних рядов с учетом антропогенного влияния, анализа значимости и наклонов линий трендов при оценке количественных изменений уровня могут найти успешное применение при аналогичных исследованиях. Результаты количественной оценки изменений среднегодового уровня озера за последние десятилетия, показавшие интенсивный его рост, могут быть использованы при планировании водохозяйственных мероприятий в бассейне озера, при реализации мер, связанных с использованием водных запасов озера, а также для оптимизации мероприятий, связанных с динамикой его уровня (судоходство, водозаборы, прибрежная инфраструктура и др.).

Список литературы

1. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том I. Изменения климата. М.: Росгидромет. 2008. 227 с.
2. Climate change 2023: AR6 synthesis report: summary for policymakers. IPCC, 2023. 36 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

3. Турсунов Э. А., Мадибеков А. С., Кулебаев К. М. Современные морфометрические характеристики оз. Балкаш // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2014. № 34. С. 43—47.
4. Проблемы гидроэкологической устойчивости в бассейне озера Балхаш. Под. ред. А. Б. Самаковой // Алматы: Казанат. 2003. 583 с.
5. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // Метеорология и гидрология. 2004. №4. С.50—66.
6. Climate change 2014. Synthesis Report. Summary for policymakers. IPPC. 2014. 31 p.
7. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И. А. Шикломанова. СПб.: Государственный гидрологический институт. 2008. 600 с.
8. Climatic Research Unit (CRU) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.uea.ac.uk/groups-and-centres/climatic-research-unit> (дата обращения: 15.10.2023).
9. Ricko M., Birkett C. M., Carton J. A. et al., Intercomparison and validation of continental water level products derived from satellite radar altimetry // Journal of Applied Remote Sensing. 2012. 6(1). P. 1710. DOI: 10.1117/1.JRS.6.061710.
10. Vuglinsky V. S., Cretaux J-F, Izmailova A. V. et al. Prospects for using satellite information to determine the water level of large lakes and reservoirs (using the example of water bodies in Russia) // Meteorology and Hydrology. 2024. No. 1. P. 5—16. DOI: 10.3103/S1068373924010011.
11. Crétau J.-F., Birkett C. Lake studies from satellite altimetry // C R Geoscience, 2006. Vol. 338. P. 1098—1112. DOI: 10.1016/j.crte.2006.08.002.
12. Berry P. A. M. Global inland water monitoring from multi-mission altimetry // Geophys. Res. Lett. 2005. 32(16). P. 4. DOI: 10.1029/2005GL022814.
13. Actual hydrometeorological problems of the Balkhash Lake and its region / edited by I. I. Skotzelas, St. Petersburg: Gidrometeoizdat. 1995. P. 103—170.
14. Ivkina N. I. Water level variation on the Balkhash lake in the modern period // Гидрометеорология и экология. Казгидромет. 2022, №3. P. 6—13. DOI: 10.54668/2789-6323-2022-106-3-6-13.
15. Bianchi M., Boyle M., Hollingsworth D. Comparison of Trend Estimation Methods // Applied Economics. Letters. 1999. (2). P. 103—109. DOI: 10.1080/135048599353726.
16. Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau // Journal of the American statistical association. 1968. Vol. 63. No. 324. P. 1379—1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
17. Fischler M. A., Bolles R. C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography // Communications of the ACM. 1981. Vol. 24, No. 6. P. 381—395. DOI: 10.1145/358669.358692.
18. Koenker R. Quantile Regression. Cambridge: Cambridge University Press. 2005. 360 p. DOI: 10.1017/CBO9780511754098.

References

1. *Otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii = Report on Climate Change and Its Impacts in the Russian Federation*. Vol. I. Climate Change. M.: Rosgidromet. 2008: 227 p. (in Russ.).
2. Climate change 2023: AR6 synthesis report: summary for policymakers. IPCC. 2023: 36 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
3. Tursunov E. A., Madibekov A. S., Kulebaev K. M. Modern morphometric characteristics of Lake Balkhash. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2014; (34): (43—47). (in Russ.).
4. *Problemy gidroekologicheskoy ustoychivosti v bassejne ozera Balkhash = Problems of Hydroecological Sustainability in the Balkhash Lake Basin*. Ed. A. B. Samakovai, Almaty: Kaganat. 2003: 583 p. (in Russ.).
5. Gruza G.V., Rankova E.Ya. Detection of climate change: state, variability and extremes of climate. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2004; (4): (50—66). (in Russ.).
6. Climate change 2014. Synthesis Report. Summary for policymakers. IPPC. 2014: 31 p.
7. *Vodnyye resursy Rossii i ikh ispol'zovaniye = Water resources of Russia and their use*. Ed. I. A. Shiklomanov. 2008: 600 p. (in Russ.).

8. Climatic Research Unit (CRU) Available at: <https://www.uea.ac.uk/groups-and-centres/climatic-research-unit> (accessed on: 15.10.2023).
9. Ricko M., Birkett C. M., Carton J. A. et al. Intercomparison and validation of continental water level products derived from satellite radar altimetry. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2012; 6(1): 1710. DOI: 10.1117/1.JRS.6.061710.
10. Vuglinsky V. S., Cretaux J.-F., Izmailova A. V. et. al. Prospects for using satellite information to determine the water level of large lakes and reservoirs (using the example of water bodies in Russia). *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2024; (1): 5—16. DOI: 10.3103/S1068373924010011.
11. Crétau J-F and C. Birkett. Lake studies from satellite altimetry. *C R Geoscience*, 2006; (338): 1098—1112. DOI: 10.1016/j.crte.2006.08.002.
12. Berry P. A. M. Global inland water monitoring from multi-mission altimetry. *Geophys. Res. Lett.* 2005; (32): 4. DOI: 10.1029/2005GL022814.
13. Actual hydrometeorological problems of the Balkhash Lake and its region, ed. I.I. Skotzelas, St. Petersburg: Gidrometeoizdat. 1995; 103—170. (in Russ.).
14. Ivkina N.I. Water level variation on the Balkhash lake in the modern period. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. Kazhydromet. 2022; (3): 6—13. DOI: 10.54668/2789-6323-2022-106-3-6-13.
15. Bianchi M., Boyle M., Hollingsworth D. Comparison of Trend Estimation Methods. *Applied Economics Letters*. 1999; (6): 103—109. DOI: 10.1080/135048599353726.
16. Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American statistical association*. 1968; (63): 1379—1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
17. Fischler M. A., Bolles R. C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*. 1981; (24): 381—395. DOI: 10.1145/358669.358692.
18. Koenker R. Quantile Regression. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 360 p. DOI: 10.1017/CBO9780511754098.

Информация об авторах

Вуглинский Валерий Сергеевич, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, Государственный гидрологический институт, vvuglins@mail.ru.

Сушкова Валерия Александровна, аспирант, Государственный гидрологический институт, sushkova.valeriya.98@mail.ru.

Курочкина Любовь Сергеевна, научный сотрудник, Государственный гидрологический институт, plathanthera@gmail.com.

Information about authors

Vuglinskiy Valery Sergeevich, doctor of geographical sciences, professor, chief researcher, State Hydrological Institute, vvuglins@mail.ru.

Sushkova Valeria Aleksandrovna, postgraduate student, State Hydrological Institute, sushkova.valeriya.98@mail.ru.

Kurochkina Lyubov Sergeevna, researcher, State Hydrological Institute, plathanthera@gmail.com.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 01.09.2025

Принята в печать 25.10.2025

The article was received on 01.09.2025

The article was accepted on 25.10.2025

Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 680—698.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(81):680—698.

ЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК [556.114:556.54:574.583](282.247.29)

doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-680-698

Трансформация биогенного стока минерального азота фитопланктоном в эстуарии реки Преголи

***Сергей Валерьевич Александров, Юлия Александровна Горбунова,
Надежда Вадимовна Двоеглазова***

Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия, hydrobio@mail.ru

Аннотация. Рассмотрено сезонное функционирование биологического фильтра, образуемого фитопланктоном, в эстуарии реки Преголи, который трансформирует биогенный сток. Выполнен сопоставительный анализ данных по гидрологии (соленость, температура), азоту нитратов, хлорофиллу «а» с марта по август 2024 г. Показано резкое увеличение обилия фитопланктона (хлорофилла) и снижение концентрации азота в средней зоне эстуария. Концентрации хлорофилла «а» в мае и августе в средней зоне достигали уровня «гиперцветения» вод. Ранней весной в период половодья в эстуарии использовалось до 2/3 биогенного стока по азоту. В теплый период межени при переходе от пресных к солоноватоводным условиям формировался мощный биофильтр из фитопланктона, в котором азот нитратов почти полностью извлекался. В результате уменьшается биогенная нагрузка на море, но происходит увеличение эвтрофирования средней (лагунной) зоны эстуария.

Ключевые слова: хлорофилл, азот, биологический фильтр, «цветение» воды, река, эстуарий, трофическое состояние.

Благодарности: Результаты исследований гидрологических условий и хлорофилла получены за счёт гранта Российского научного фонда №24-44-20027. Результаты исследований биогенных элементов получены в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025). Авторы благодарят А. В. Килесо, Д. А. Найданова за помощь в выполнении экспедиционных работ и гидрохимических анализов.

Для цитирования: Александров В. А., Горбунова Ю. А., Двоеглазова Н. В. Трансформация биогенного стока минерального азота фитопланктоном в эстуарии реки Приголи // Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 680—698. doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-680-698.

Original article

Transformation of nutrient runoff of mineral nitrogen by phytoplankton in the Pregolya Estuary

***Sergey V. Aleksandrov, Yulia A. Gorbunova,
Nadezhda V. Dvoeglazova***

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,
hydrobio@mail.ru

Summary: The Pregolya Estuary belongs to the most eutrophic aquatic ecosystems, in which the upper, middle and lower zones are distinguished, differing in hydrological, hydrochemical conditions and phytoplankton abundance. The data on hydrology (salinity, temperature), nutrients (nitrogen of nitrates) and chlorophyll *a* were analyzed for the period from March to August 2024. The upper zone of the estuary (lower part of the Pregolya River and the mouth) is characterized by a high content of nutrients (nitrate nitrogen) in the water, especially during the flood period, and relatively low abundance of phytoplankton (chlorophyll), the development of which is hindered by high flow rates. A sharp increase in phytoplankton abundance and a decrease in nitrogen occur in the middle zone of the estuary, especially during the warm season. Chlorophyll *a* concentrations in the middle zone corresponded to the “hyperbloom” of waters in May and August 2024, and on average, hypertrophic level was observed over the studied period. High values of chlorophyll *a* reflect favorable conditions for phytoplankton (supply of nutrients) and the possibility of creating a powerful biological filter in this estuary. Due to a sharp increase (by an order of magnitude) in the abundance of phytoplankton (water “hyperbloom”, chlorophyll *a* > 100 µg/l), rapid and almost complete extraction of nitrate nitrogen (reduction up to 100—1000 times) coming with river runoff is possible. Such significant changes occurred in May and August 2024 within a few kilometers of the transition from fresh to brackish water conditions (1—3 psu). In the lower zone of the estuary, the abundance of phytoplankton is significantly reduced due to the limitation of nutrients consumed in the middle zone. In the aspect of studying the “marginal filter” of estuaries, the spatial distribution of chlorophyll can reveal zones of formation of the biological filter and the most intensive removal of nutrients.

Seasonal variability in the biological filter is observed in the Pregolya Estuary, which affects the nutrient runoff into the Baltic Sea. In early spring, during the flood period, the seasonal succession of phytoplankton does not allow for the formation of a high abundance, and up to 2/3 of the nutrient runoff in nitrogen is used in the estuary, and the rest can contribute to the eutrophication of the Baltic Sea. During the warm period of low-water flow, a powerful biofilter is formed in the middle zone, where phytoplankton abundance grows to hypertrophic level and nitrate nitrogen is completely extracted from the water. As a result, the nutrient load from the estuary to the sea is significantly reduced, but there is strong biological pollution of the lagoon part of the estuary.

Keywords: chlorophyll, nitrogen, biological filter, algae bloom, Pregolya River, estuary, trophic state, Vistula Lagoon.

Acknowledgments: The results of the studies of hydrological conditions and chlorophyll were obtained within the grant of the Russian Science Foundation grant (No. 24-44-20027). The results of the studies of nutrients were obtained within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for IO RAS (theme No. FMWE-2024-0025). The authors thank A. V. Kileso, D. A. Naidanov for their assistance in carrying out expeditionary work and hydrochemical analyses.

For citation: Aleksandrov S. V., Gorbunova Y. A., Dvoeglazova N. V. Transformation of nutrient runoff of mineral nitrogen by phytoplankton in the Pregolya Estuary. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(81):(680—698). doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-680-698. (In Russ.).

Введение

Процессы, связанные с эвтрофированием и биопродуктивностью водных экосистем, достаточно хорошо изучены на примере внутренних водоемов. Эстуарии (дельты рек, лагуны) менее исследованы, но при этом они характеризуются уникальным сочетанием физических, химических и биологических показателей и имеют высокую первичную продуктивность [1]. Одной из актуальных проблем последних десятилетий является эвтрофикация прибрежных морских вод. Причина, в первую очередь, заключается в хозяйственной деятельности человека на суше [2, 3]. Речной сток выносит биогенные вещества, прежде всего азот и фосфор, в морские экосистемы, обуславливая значительные изменения в них. Эстуарии могут существенно влиять на поступление азота и фосфора с суши в морскую среду и снижать биогенную нагрузку на нее. В области смешения пресных и соленых вод наблюдаются сложные процессы, обуславливающие удержание неорганических и органических веществ, поступающих с речным стоком. Эффективность эстуариев в качестве естественного фильтра в большой степени зависит от их морфологических и функциональных характеристик, в частности от скорости водообмена [4—6].

А. П. Лисицын ввел понятие «маргинальный фильтр» и выделил физическую, физико-химическую и биологическую его части, принципиально обозначил местоположение зон изъятия из речного стока растворенных и нерастворенных веществ [7]. Он также указал, что маргинальный фильтр может выполнять функцию задержания загрязнений, и такая возможность рассмотрена на примере удержания нового вида загрязнения — микропластика [8]. Помимо седиментационных и сорбционных процессов в маргинальных фильтрах активно протекают биологические процессы (биоассимиляция, биофильтрация) [7]. В функционировании биологического фильтра, наряду с зоопланктонными и бентосными видами-фильтраторами, важную роль играет фитопланктон, который изымает растворенные неорганические биогенные вещества, при этом часть их удерживается и накапливается в эстуариях [6, 9]. Концентрация хлорофилла «а» в воде является показателем обилия (биомассы) фитопланктона, в том числе служит одним из ключевых индикаторов биопродуктивности и трофического статуса водных экосистем, включая эстуарии [10, 11]. Следовательно, оценка его величин и пространственного распределения может использоваться для характеристики биологического фильтра.

Река Преголя относится к средним рекам Балтийского моря, водосборный бассейн (13418 км²) которой охватывает густонаселенную территорию Калининградской области и Варминско-Мазурского воеводства Польши, при этом биогенная нагрузка с водосбора составляет 5200 т N/год и 650 т P/год [12]. Река Преголя впадает в восточную часть Вислинского залива (Калининградский залив), обеспечивая ~45 % материкового стока. Вислинский залив — одна из крупнейших солоноватоводных лагун Европы со средней глубиной 2,7 м, имеет свободный водообмен с морем через пролив [13]. Поступление через пролив морских вод (17,0 км³/год) в Вислинский залив многократно превышает материковый сток

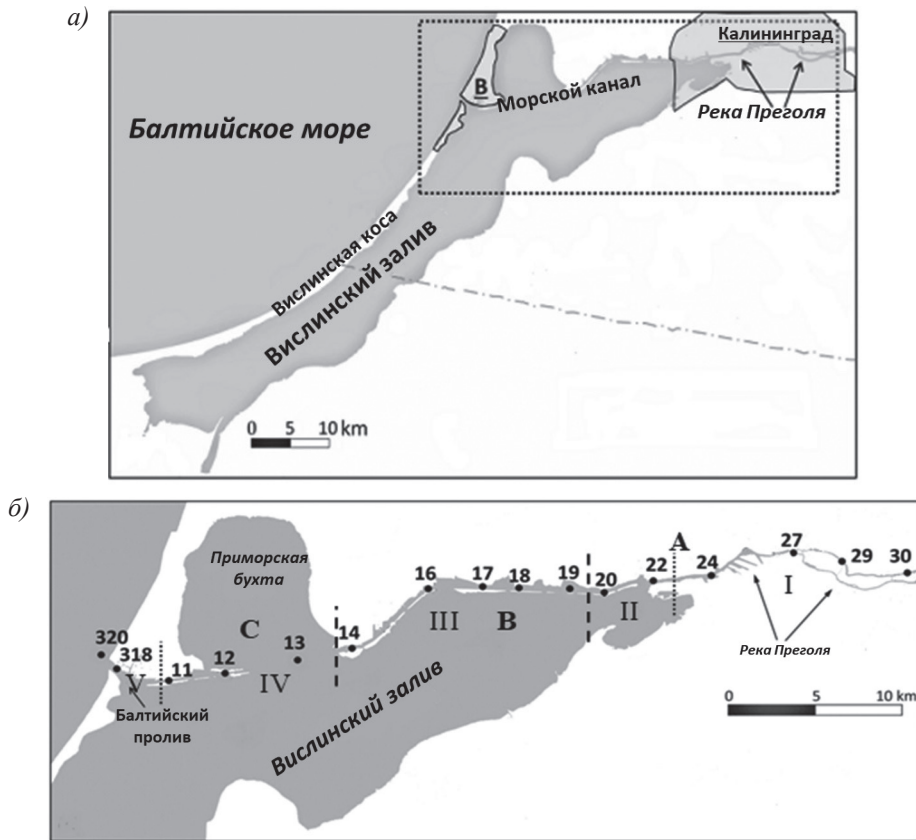


Рис. 1. Расположение района исследований (а) и схема станций отбора проб в эстуарии реки Преголя (б).

(А, В, С — верхняя, средняя, нижняя зоны; I—V — выделенные районы; пунктирные линии — условные границы зон; точечные линии — условные границы районов).

Fig. 1. Location of the study area (а) and scheme of sampling stations in the Pregolya Estuary (б).

(А, В, С — upper, middle, lower zones; I—V — proposed areas; dashed lines — conditional boundaries of zones; dotted lines — conditional boundaries of areas).

(3,6 км³/год) и объем самого залива (2,3 км³/год) [14, 15], в результате водоем имеет гидрологические признаки эстуарной системы [1, 13].

Устье р. Преголи связано с морским проливом глубоководным Калининградским морским каналом, который проходит вдоль северного берега Калининградского залива. Канал представляет гидротехническое сооружение, построенное в 1901 г., длиной 43 км, глубиной 9—12 м. На большей части своей длины канал отделен от залива насыпными дамбами, открытый участок канала длиной около 5 км имеется только в районе Приморской бухты (рис. 1). Пресноводный сток р. Преголи направляется в глубоководный канал и в акваторию залива, которые

являются соответственно глубоководной и мелководной частями эстуария реки Преголи [16].

Интенсивное перемешивание речных и морских вод (соленость 0—7 ‰) в эстуарии р. Преголи, включая морской канал и залив, определяет неоднородность распределения гидрологических, химических и биологических показателей [16—20]. По распределению взвешенных веществ и ряда металлов в нем показано формирование маргинального фильтра [21]. Калининградский залив, составляющий центральную часть эстуария р. Преголи, характеризуется увеличением обилия и продуктивности фитопланктона до гипертрофного состояния в период летнего «цветения» вод [22]. Многолетние гидрологические исследования проводятся в заливе, морском проливе, морском канале и нижнем течении р. Преголи с 1990-х гг. [16, 23], а гидробиологические исследования до последнего времени выполнялись в основном в лагуне (Вислинский залив), практически не затрагивая речную часть и морской пролив, а также акваторию морского канала. Важным аспектом работ в 2024 г. было получение данных для нижнего течения р. Преголи и морского пролива, что позволило целостно рассмотреть всю эстуарную систему.

Целью работы является рассмотрение роли эстуарной системы р. Преголи как биологического фильтра, который трансформирует биогенный сток и снижает биогенную нагрузку на Балтийское море, но одновременно способствует «цветению» вод в лагуне (Вислинском заливе).

Материалы и методы

Изучение эстуария р. Преголи проведено на 16 станциях, что позволило получить данные о пространственном распределении показателей от нижнего течения реки до морского пролива (рис. 1). Отбор проб выполнялся в 2024 г. в период весеннего половодья (26 марта, 9 апреля) и последующий период межени (13 мая, 2 августа). На каждой станции температуру и соленость воды определяли одним из гидрофизических зондов Sontek CastAway-CTD, Sea&Sun CTD90M, Idronaut Ocean Seven 316Plus Multiparameter Probe. Пробы воды отбирали в поверхностном слое (0—1 м) батометром Нискина (объем — 5 л). Пробы хлорофилла фильтровали через фильтры МФАС-МА-6 (диаметр пор — 0,3 мкм) и определяли оптические плотности на спектрофотометре СФ-56 на основе методики и уравнений [24]. Концентрацию азота нитратного (N-NO_3) определяли с использованием спектрофотометра КФК-3 [25].

Результаты и обсуждение

Пространственное деление эстуария реки Преголи с учетом гидрологических условий

Для эстуария р. Преголи отсутствует установившееся деление акватории с учетом морфометрических и гидрологических характеристик. В ряде работ такое районирование применяется только для лагунной акватории (Вислинского залива), которая является лишь частью эстуария [26—28]. При анализе пространственной

изменчивости предложено условное деление эстуария р. Преголи на три основные зоны (верхняя, средняя, нижняя) в соответствии со схемой, используемой для эстуариев [29]. Для более детальной характеристики пространственной изменчивости гидрологических, гидрохимических и биологических условий в пределах этих зон было дополнительно выделено 5 районов (I—V) (рис. 1).

А) «Верхняя зона» включает нижнее течение и устье р. Преголи с преимущественно пресноводными условиями. В пределах нее было выделено 2 района:

I — нижнее течение р. Преголи с узким руслом (< 100 м), расположенное преимущественно в пределах г. Калининграда (станции 24—30). Поверхностный слой с пресноводными условиями. Соленость воды была 0,2—0,3 пс и только в межень (май, август 2024 г.) незначительно увеличивалась ближе к устью (станция 24) до 0,7—1,1 пс (рис. 2 а).

II — устье в районе впадения реки в лагуну (Калининградский залив) (станции 20—22) с выраженным влиянием речных вод р. Преголи. В период половодья (март, апрель) наблюдаются пресноводные условия (0,4—0,6 пс), в межень отмечается небольшой рост солености до 0,9 пс в мае и 1,8 пс в августе.

В) «Средняя зона» расположена в восточной части лагуны (Калининградском заливе), включая отделенный дамбами участок Калининградского морского

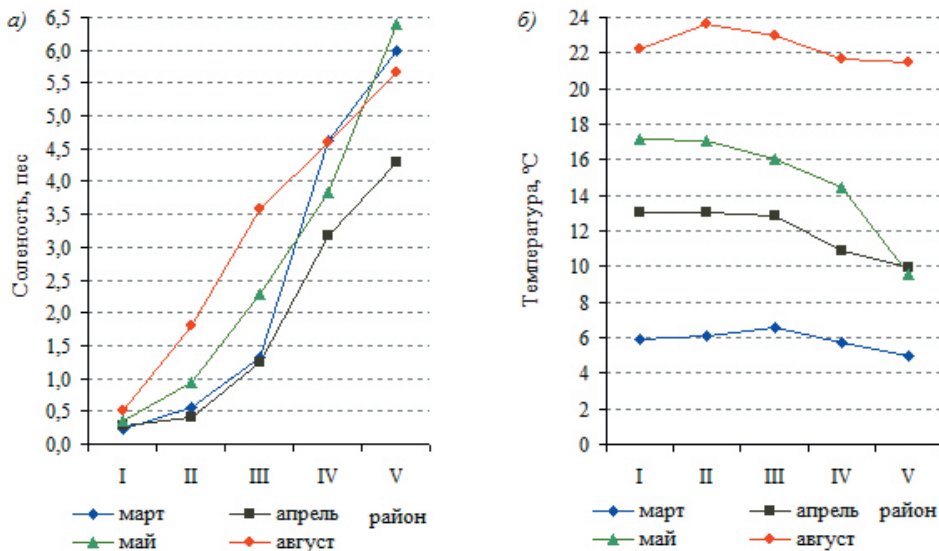


Рис. 2. Средние для районов значения солености воды (а) и температуры воды (б) в поверхностном слое.

(I — нижнее течение реки, II — устье, III — восточный район, IV — западный район, V — район морского пролива).

Fig. 2. Average for areas values of water salinity (a) and water temperature (b) in the surface layer.

(I — the lower part of the river, II — the mouth, III — eastern area, IV — western area, V — sea strait).

канала (станции 14—19), которая отнесена к району III (восточный район). На этот район значительное влияние оказывает поступление речных вод в период половодья, когда соленость около 1 пс (1,2—1,3 пс в марте и апреле 2024 г.), в период межени поступление морских вод по морскому каналу ведет к осолонению до 2,3 пс в мае и 3,6 пс в августе. В этом районе в целом наблюдается переход к лимническим условиям, характерным для лагун.

С) «Нижняя зона» включает западную часть лагуны и район морского пролива, через который происходит свободный водообмен с Балтийским морем, в ней выделяется 2 района.

IV — западный район расположен в открытой неглубокой (3—5 м) акватории лагуны (станции 11—13), где происходит смешение речных, лагунных и морских вод. Внутригодовые изменения речного стока сказываются меньше, и солоноватоводные условия достаточно стабильные (3,2—4,6 пс с марта по август 2024 г.) (рис. 2 а).

V — район морского пролива (станции 318, 320) соединяет лагуну с прибрежной зоной моря. В него активно поступают солоноватоводные воды Балтийского моря, и наблюдается максимальная соленость воды в эстуарии Преголи — 5,7—6,4 пс, которая может уменьшаться в период половодья и сгонных восточных ветров (до 4,3 пс в апреле 2024 г.).

Гидрологические условия

Для р. Преголи характерна значительная внутригодовая изменчивость стока. Наибольший расход воды (период половодья) наблюдается с февраля до начала апреля, а минимальный (межени) с мая по октябрь [30], что значительно влияет на сезонную изменчивость солености в эстуарии. Согласно данным Калининградского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (КЦГМС), в 2024 г. наибольший сток р. Преголи отмечен в феврале, когда водность рек была выше среднемноголетней [20, 31]. В последующие месяцы (март, апрель) в р. Преголя был среднемноголетний уровень. В период половодья в марте и апреле 2024 г. в устье реки были пресные речные воды (0,4—0,6 пс), а в средней зоне эстуария (восточный район) происходило опреснение (около 1 пс) под влиянием речного стока (рис. 2 а). В межень речной сток снижался и находился в мае и августе 2024 г. на среднемноголетнем уровне. В мае влияние речных вод (соленость около 1 пс) сохранялось в устье, но в средней зоне эстуария оно снижалось, и соленость увеличивалась в диапазоне 1,3—3,4 пс. Наибольшее осолонение вод устья (1—2 пс) и средней зоны (3—4 пс) было в августе в период минимального стока р. Преголи и распространения солоноватых вод лагуны.

Температура воздуха в 2024 г. была выше среднемноголетнего уровня на 1—4 °С в отдельные месяцы на протяжении всего года [31]. В частности, в марте она была выше на 3 °С, в мае — на 3—4 °С по данным КЦГМС. Температура воды в эстуарии р. Преголя в конце зимнего гидрологического периода (март) характеризовалась однородным прогревом поверхностного слоя (около 6 °С) (рис. 2 б). В апреле с весенним прогревом она увеличивалась до 12—13 °С в верхней и

средней зоне эстуария и до 10 °С в нижней зоне. В мае с учетом высоких среднемесячных температур воздуха вода в эстуарии Преголи прогрелась до 14—17 °С и только у морского пролива температура была ниже (10 °С) под влиянием морских вод (соленость увеличивалась с 4 до 6 пс). В августе, который в Калининградской области был теплым и самым засушливым месяцем лета 2024 г., наблюдался максимальный годовой прогрев воды до 22—23 °С на всей акватории эстуария Преголи. Наблюдаемое в 2024 г. распределение гидрологических условий в целом соответствует описанным ранее закономерностям [18, 27, 28]. Повышенный прогрев воздуха и воды в 2024 г. отражает усиливающуюся тенденцию роста температур (0,4 °С/ 10 лет), в частности весной и летом, на акватории и в прибрежных районах Балтийского моря, включая юго-западные районы Северо-Западного Федерального округа [33—35]. Следствием этого может быть влияние на гидрохимические и биологические процессы в водных экосистемах, в частности способствующих формированию «цветений» воды.

Азот нитратов и хлорофилл

Основным гидрохимическим источником эвтрофирования водоемов служат высокие концентрации фосфора и азота [2, 3, 5]. Азот нитратов является основной формой поступления минерального азота в водные экосистемы с речным стоком. Его содержание отражает сезонную изменчивость поступления биогенных веществ в эстуарий р. Преголи и их последующее использование биологическими сообществами, прежде всего фитопланктоном. Концентрации азота нитратов в воде эстуария р. Преголи в 2024 г. имели выраженную пространственную и сезонную изменчивость.

В период *половодья* в марте—апреле наблюдались наибольшие концентрации азота нитратов, особенно в верхней зоне эстуария (нижнее течение р. Преголи и ее устье — 1000—1400 мкгN/л), заполненной пресными водами (районы I, II) (рис. 3 а). В этот период происходит интенсивное поступление азота с водосборной территории после зимнего накопления. Развитие фитопланктона в реке и устье было относительно слабым (хлорофилл «а» в среднем — 7—13 мкг/л) (рис. 3 б). В средней зоне эстуария (район III) обилие ранневесеннего фитопланктона существенно увеличивалось (в среднем до 31—34 мкг/л, максимально 60—67 мкг/л), что вело к росту потребления азота нитратов водорослями и снижению его концентраций в 2—3 раза (до уровня 500—600 мкгN/л на границе с нижней зоной эстуария). В нижней зоне эстуария (район IV) обилие фитопланктона снижалось (в среднем до 17—20 мкг/л), вероятно, из-за неблагоприятного влияния осолонения при поступлении морских вод, также ведущего к разбавлению вод эстуария и снижению концентрации биогенных веществ. В частности, в марте между станциями 13 и 12 с увеличением солености с 2,3 до 5,6 пс, содержание хлорофилла и азота нитратов снижалось в 2 и 2,5 раза (до 13 мкг/л и 260 мкгN/л).

Несмотря на значительное снижение концентраций азота нитратов из-за его потребления фитопланктоном в средней зоне эстуария и дополнительного разбавления морскими водами в нижней зоне, его значительная часть — 390—440 мкгN/л

(40 % в марте и 30 % в апреле от исходных величин в речной воде) достигала морского пролива (район V). Поступление азота из эстуария р. Преголи в таком количестве способствует эвтрофированию Балтийского моря. Согласно многолетним данным в прибрежной зоне моря у Калининградского полуострова весной концентрации биогенных элементов на порядок ниже (~ 40 мкгN/л азота нитратов и 65 мкгN/л минерального азота) [32].

В *межень* в теплый период года сток р. Преголи снижался с одновременным уменьшением концентрации азота нитратов в нижнем течении и устье до ~ 500 мкгN/л мае и ~ 300 мкгN/л в августе 2024 г. В верхней зоне эстуария обилие фитопланктона оставалось на низком уровне как в марте-апреле (хлорофилл «а» в среднем 11 мкг/л) (рис. 3). Повышенная проточность в р. Преголе, по сравнению с нижележащей лагунной частью, вероятно угнетающе действовала на фитопланктон, в результате он не использовал высокие концентрации биогенных элементов речного стока.

Резкое увеличение обилия фитопланктона происходило на границе верхней и средней зон эстуария. При переходе от лотических к лимническим условиям в средней зоне складывались оптимальные гидрологические условия для фитопланктона (снижение проточности, при сохранении низкой солености).

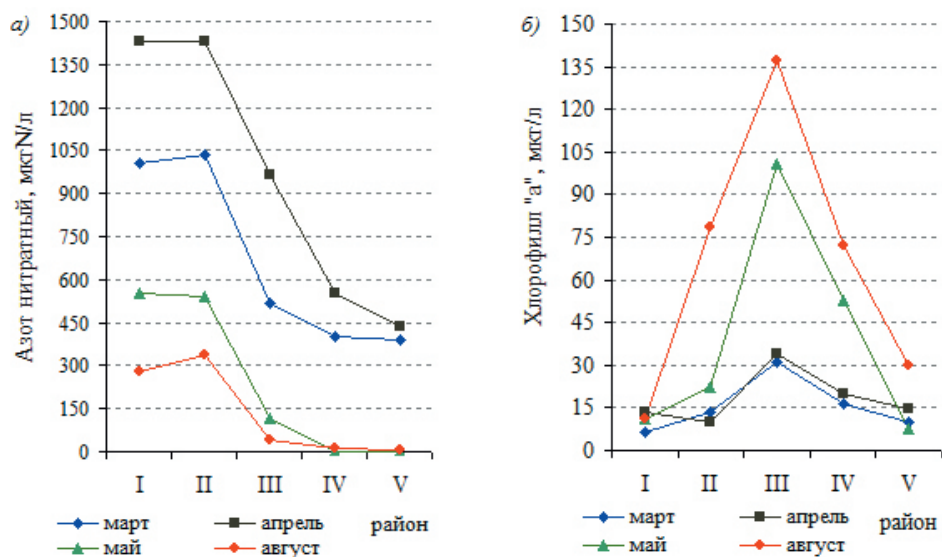


Рис. 3. Средние для районов концентрации азота нитратного (а) и хлорофилла (б) в поверхностном слое.

(I — нижнее течение реки, II — устье, III — восточный район, IV — западный район, V — район морского пролива).

Fig. 3. Average for areas values of concentrations of nitrate nitrogen (a) and chlorophyll (b) in the surface layer.

(I — the lower part of the river, II — the mouth, III — eastern area, IV — western area, V — sea strait).

В результате в этой зоне происходило интенсивное весеннее развитие фитопланктона (концентрации хлорофилла «а» 70—130 мкг/л) и особенно масштабное летнее «гиперцветение» воды (70—180 мкг/л). Как следствие, в средней зоне (район III) формировался мощный биологический фильтр: быстрое извлечение биогенных элементов и одновременно массовое развитие фитопланктона (рис. 3). В частности, в мае 2024 г. в центре средней зоны в пределах 2 км (между станциями 17 и 18) концентрация азота нитратов снижалась с 450 до 3 мкгN/л при резком росте обилия фитопланктона (хлорофилл «а» увеличивался с 70 до 130 мкг/л). В августе на границе верхней и средней зон эстуария (между станциями 19 и 22) концентрация азота нитратного снижалась с 500 до 20 мкгN/л, а хлорофилл «а» увеличивался с 40 до 180 мкг/л. В оба месяца такие изменения происходили в зоне перехода от пресных к солоноватоводным условиям (от 1,3 до 2,5 пром. ‰).

В нижней зоне, расположенной в западной части Калининградского залива (район IV), концентрации азота нитратов в мае были около аналитического нуля, а в августе — всего 10 мкгN/л, чему способствовало высокое обилие фитопланктона, потребляющего азот. Сезонная динамика азота нитратов в средней и нижней зоне эстуария р. Преголи в 2024 г. соответствовала ранее установленной для Калининградского залива: открытая акватория лагуны характеризовалась максимальными величинами в марте—апреле (200—1000 мкгN/л) и минимумом с мая по август (< 10 мкгN/л), и значительным снижением концентраций от восточного района, куда поступает сток р. Преголи, до района у морского пролива [27, 28].

Из-за активного использования азота в эстуарии р. Преголи в теплый период (май — август) концентрации азота нитратов в районе морского пролива были очень низкими (1—7 мкгN/л). Они сопоставимы с летним уровнем в прибрежной зоне моря (~10 мкгN/л, согласно [32]) и не оказывают эвтрофирующего влияния на Балтийское море.

«Цветение» воды и трофическое состояние в разных зонах эстуария

Обилие фитопланктона, оцениваемое по концентрации хлорофилла «а», в эстуарии р. Преголи имело значительную пространственную изменчивость, связанную с влиянием гидрологических условий и содержанием биогенных элементов.

Наименьшие величины хлорофилла «а» были в верхней зоне эстуария (нижнее течение р. Преголи). Несмотря на высокие концентрации биогенных элементов весь период наблюдений (март—август) и широкий диапазон температуры воды (6—22 °C) здесь стабильно сохранялось слабое развитие фитопланктона (хлорофилл «а» в диапазоне 5—16, в среднем для отдельных месяцев 7—13 мкг/л) (рис. 3 б), соответствующее пограничному состоянию между мезотрофными и эвтрофными водами [10]. Значимым фактором, препятствующим интенсивному развитию фитопланктона в этой зоне, вероятно, является высокая проточность, которая может оказывать как прямое механическое воздействие на фитопланктон, в том числе на цианобактерий, так и изменять физические и химические условия его обитания [36].

Резкое увеличение обилия фитопланктона происходило в средней зоне эстуария. Даже в период половодья в марте и апреле концентрации хлорофилла «а» на отдельных участках могли достигать 60—67 мкг/л. Значительное увеличение обилия фитопланктона происходило в период межени (май, август). В мае 2025 г. впервые за многолетний период исследований Калининградского залива концентрации хлорофилла «а» были выше 100 мкг/л (до 113—132 мкг/л), что классифицируется как «гиперцветение» вод. Ранее такие величины наблюдались только летом в гипертрофных водоемах, в частности в Куршском заливе, тогда как в Калининградском заливе в мае они были в среднем в 3—5 раз ниже (20—30 мкг/л) [22, 37]. Летом 2024 г. хлорофилл «а» достигал максимальных величин (до 140—180, в среднем 137 мкг/л) (рис. 3 б). Такое интенсивное развитие фитопланктона в этой зоне эстуария летом обусловлено доминированием цианобактерий (*Woronichinia compacta*, *Microcystis aeruginosa*), которые сменяют доминирующие в речной части диатомовые водоросли (*Melosira varians*, *Skeletonema subsalsum*, *Stephanodiscus hantzschii*) и многократно увеличивают биомассу фитопланктона [19]. Измеренные летом 2024 г. концентрации хлорофилла «а» соответствовали максимальным величинам, которые могут наблюдаться в пресных и солоноватоводных водных экосистемах при массовом развитии цианобактерий («гиперцветении» воды). Ранее в северной и центральной частях Вислинского залива (российская зона, Калининградский залив) величины хлорофилла «а» были значительно ниже (в среднем до 50 мкг/л) [22]. Только в более закрытой и эвтрофированной южной части Вислинского залива (польская зона), куда поступает часть стока р. Висла и наблюдается интенсивное «цветение» вод, концентрации хлорофилла «а» периодически превышали 100 мкг/л [38, 39].

Интенсивное «цветение» воды летом 2024 г. дополнительно было связано с максимальным прогревом вод в эстуарии, достигшем в августе 23 °С при среднемесячной температуре воздуха на 1—1,5 °С выше среднемноголетних величин [31]. Такая температура (> 20—22 °С) оптимальна для роста цианобактерий [40] и в целом многолетняя тенденция увеличения прогрева в акватории и прибрежных районах Балтийского моря [33] может стимулировать «цветение» воды.

Очень интенсивное развитие фитопланктона сохранялось на всем протяжении средней зоны эстуария, составляя в мае и августе 2024 г. в среднем 101 и 137 мкг/л. Для всего периода с марта по август 2024 г. содержание хлорофилла «а» было 76 мкг/л, что втрое выше, чем условная граница (25 мкг/л) для гипертрофных водных экосистем [10]. Это характеризует чрезвычайно высокий уровень обилия фитопланктона и продуктивности вод, создаваемый в средней зоне эстуария благодаря биогенным веществам, поступающим с речным стоком.

В нижней зоне, в пределах западной части лагуны (район IV), обилие фитопланктона в мае и августе снижалось в 2 раза (хлорофилл «а» в среднем 50 и 70 мкг/л, максимально до 85 мкг/л) (рис. 3 б) вследствие лимитирования по биогенным элементам, потребленным в средней зоне эстуария. Сохранению высоких концентраций хлорофилла «а» в этой зоне на уровне «цветения» вод способствует интенсивная вегетация азотфиксирующих цианобактерий [38, 41], массовое развитие которых возможно при дефиците азота при высокой температуре

воды ($> 20\text{—}22\text{ }^{\circ}\text{C}$) [42]. Также в этот район дополнительно поступает фитопланктон из средней зоны эстуария. Для всего периода с марта по август 2024 г. содержание хлорофилла «а» в западной части лагуны составило 40 мкг/л, что достигает гипертрофного уровня [10]. Концентрации хлорофилла «а» в нижней зоне эстуария р. Преголи в целом соответствовали обилию фитопланктона (хлорофилл «а» 35—45 мкг/л) Вислинского залива согласно многолетним данным [39, 43].

Значительная часть органического вещества фитопланктона, образующегося в средней и нижней зонах эстуария р. Преголи, впоследствии аккумулируется на дне, формируя илистые отложения, занимающие значительную часть Вислинского залива [44]. Высокое содержание биогенных элементов в них создает условия для многолетнего высокого уровня эвтрофирования и первичной продуктивности вод в лагунной экосистеме [22, 39, 43].

Биологический фильтр в эстуарии

В связи со сложностью структуры и большим разнообразием условий, эстуарии значительно различаются по обилию фитопланктона (хлорофиллу «а») и его сезонной динамике [11]. В большинстве эстуарных систем максимальные концентрации хлорофилла «а» не превышают 40—50 мкг/л [45], что в целом соответствует эвтрофному уровню продуктивности вод (максимальные величины 25—75 мкг/л) согласно трофической классификации [10]. Только в единичных из них (например, залив Тампа, фьорд Рингкёбинг), получающих большую биогенную нагрузку и относящихся к лагунному типу, максимальные концентрации хлорофилла «а» периодически были выше 100 мкг/л [11], соответствуя гипертрофному уровню. Обилие фитопланктона (хлорофилла «а») в эстуарии р. Преголи в период «цветения» воды превышало 100 мкг/л, что относит его к наиболее высокоэвтрофным водоемам мира.

Несмотря на широкий диапазон изменчивости, общей чертой многих эстуариев является наличие устойчивого максимума хлорофилла в верхней или средней, преимущественно пресноводной зоне [45, 46]. Интенсивное развитие фитопланктона характерно для зон уменьшения концентраций неорганических форм азота и фосфора, так как их потребление фитопланктоном является основным процессом удаления биогенных веществ из воды в эстуариях [47].

В период половодья (март—апрель) в эстуарий р. Преголи поступает наибольшее количество биогенных элементов, и сезонная сукцессия фитопланктона не позволяет формировать высокое обилие (концентрации хлорофилла в 3—4 раза ниже, чем в мае-августе), в результате значительное количество биогенных элементов (30—40 % азота нитратов) проходит через эстуарий р. Преголи. В воде, поступающей из эстуария в море через морской пролив, концентрации азота нитратов на порядок выше, чем в море, и могут оказывать существенное влияние на эвтрофирование прибрежной зоны Балтийского моря.

Напротив, резкое увеличение (на порядок) обилия фитопланктона (хлорофилл «а» > 100 мкг/л, «гиперцветение» вод) в опресненной средней части эстуария

р. Преголи в мае и августе 2024 г. и одновременное резкое снижение концентраций азота нитратов (до 100—1000 раз) свидетельствует о формировании мощного биофильтра в эстуарной зоне в теплый период года. Поступающий с речным биогенным стоком азот нитратов почти полностью потребляется в эстуарии р. Преголи. Его концентрации, выносимые эстуарными водами через морской пролив, не оказывают эвтрофирующего влияния на Балтийское море в этот период. Одновременно с этим использование азота нитратов фитопланктоном в эстуарии с формированием мощных «цветений» воды в его средней зоне ведет к увеличению эвтрофирования в лагуне (Вислинском заливе). В частности, могут формироваться неблагоприятные последствия «гиперцветений» цианобактерий (накопление токсинов, замор рыб), а образование на дне илистых отложений создает условия для сохранения многолетнего высокого уровня эвтрофирования вод.

Заключение

Эстуарий р. Преголи относится к наиболее эвтрофным водным экосистемам, для которого характерна значительная пространственная и сезонная изменчивость гидрологических, гидрохимических условий и обилия фитопланктона. Верхняя зона эстуария (нижнее течение реки и устье) характеризовалась высоким содержанием в воде биогенных элементов (азота нитратов), особенно в период половодья, и относительно низким обилием фитопланктона (хлорофилла), развитию которого, вероятно, препятствует высокая проточность. Резкое увеличение обилия фитопланктона происходило в средней зоне эстуария, особенно в теплый период года. Летом 2024 г. при массовом развитии цианобактерий («гиперцветении» воды) концентрации хлорофилла «а» соответствовали максимальным величинам для пресных и солоноватоводных экосистем. Высокие величины хлорофилла «а» отражают благоприятные условия для фитопланктона (обеспеченность биогенными элементами) и возможность создания мощного биологического фильтра в данном эстуарии.

В биологическом фильтре в эстуарии р. Преголи происходит быстрое и почти полное извлечение азота нитратов (снижение до 100—1000 раз), поступающего с речным стоком, благодаря резкому росту (на порядок) обилия фитопланктона («гиперцветение» вод, хлорофилл «а» > 100 мкг/л). В нижней зоне эстуария обилие фитопланктона значительно снижается из-за лимитирования по биогенным элементам, потребленным в средней зоне. В аспекте изучения «маргинального фильтра» эстуариев пространственное распределение хлорофилла позволяет выявлять зоны формирования биологического фильтра и наиболее интенсивного изъятия биогенных веществ.

В эстуарии р. Преголи наблюдается сезонная изменчивость действия биологического фильтра, что влияет на биогенный сток в Балтийское море. Ранней весной в период половодья сезонная сукцессия фитопланктона не позволяет формировать высокое обилие, и в эстуарии используется до 2/3 биогенного речного стока по азоту, а остальная часть поступает в Балтийское море, что может способствовать эвтрофированию ее прибрежной зоны. В теплый период в межень формируется мощный биофильтр, в котором фитопланктон развивается до гипертрофного

уровня, и азот нитратов полностью извлекается. Это значительно снижает биогенную нагрузку на море, но происходит увеличение эвтрофирования средней (лагунной) зоны эстуария.

Список литературы

1. McLusky D. S., Elliott M. The Estuarine Ecosystem: Ecology, Threats and Management. Oxford University Press, 2004. doi: 10.1093/acprof:oso/9780198525080.001.0001.
2. Nixon S. W. Coastal Marine Eutrophication: A Definition, Social Causes, and Future Concerns // *Opheelia*. 1995. V. 41. P. 199—219. doi: 10.1080/00785236.1995.10422044.
3. Cloern J. Our Evolving Conceptual Model of the Coastal Eutrophication Problem // *Marine Ecology Progress Series*. 2001. V. 210. P. 223—253. doi: 10.3354/meps210223.
4. Nixon S. W., Ammerman J. W., Atkinson L. P. et al. The fate of nitrogen and phosphorus at the land sea margin of the North Atlantic Ocean // *Biogeochemistry*. 1996. V. 35. P. 141—180. doi: 10.1007/BF02179826.
5. Nedwell D. B., Jickells, T. D., Trimmer M. et al. Nutrients in estuaries // *Advances in Ecological Research*. 1999. V. 29. P. 43—92. doi: 10.1016/S0065-2504(08)60191-9.
6. Conley D. J., Kaas H., Möhlenberg F. et al. Characteristics of Danish estuaries // *Estuaries and Coasts*. 2000. V. 23(6). P. 820—837. doi: 10.2307/1353000.
7. Лисицын А. П. Маргинальный фильтр океанов. *Океанология*. 1994. Т. 34, № 5. С. 735—747.
8. Chubarenko I., Khatmullina L., Esiukova E. et al. Deposition of microplastics in estuaries: critical review of field and experimental data from the perspective of the Ocean Marginal Filter concept // *Science of the Total Environment*. 2025. V. 997. P. 180210. doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.180210.
9. Arndt S., Lacroix G., Gypens N. et al. Nutrient dynamics and phytoplankton development along an estuary-coastal zone continuum: A model study // *Journal of Marine Systems*. 2011. V. 84, No. 3—4. P. 49—66. doi: 10.1016/j.jmarsys.2010.08.005.
10. OECD: Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control. Paris, 1982. 154 p.
11. Cloern J. E., Jassby A. D. Patterns and scales of phytoplankton variability in estuarine-coastal Ecosystems // *Estuaries and Coasts*. 2010. V. 33, No. 2. P. 230—241. doi: 10.1007/s12237-009-9195-3.
12. Chubarenko B., Gorbunova J., Domnin D. Scenario analysis of socio-economic and climate related changes in nutrient load and retention for the Pregolya River catchment (South-Eastern Baltic): The view at the beginning of 21st century // *Fundamental and Applied Hydrophysics* 2024. V. 17, No. 2. P. 35—49. doi: 10.59887/2073-6673.2024.17(2)-4.
13. Chubarenko B., Margoński P. The Vistula lagoon // *Ecology of Baltic coastal waters*. / U. Schiewer (Ed.). Berlin, Heidelberg: Springer. 2008. P. 167—195. doi: 10.1007/978-3-540-73524-3_8.
14. Силич М. В. Водный баланс залива // *Гидрометеорологический режим Вислинского залива*. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. С. 143—172.
15. Ciesliski R., Chlost I. Water balance characteristics of the Vistula Lagoon coastal area along the southern Baltic Sea // *Baltica*. 2017. V. 30. No. 2. P. 107—117. doi: 10.5200/baltica.2017.30.12.
16. Chubarenko B., Domnin D., Navrotskaya S. et al. Transboundary lagoons of the Baltic Sea (Chapter 6). In: *The diversity of russian estuaries and lagoons exposed to human influence. Estuaries of the World*. Switzerland: Springer International Publishing, 2017. P. 149—191. doi: 10.1007/978-3-319-43392-9_6.
17. Krechik V., Krek A., Bubnova E., Kapustina M. Mixing zones within the complex transitional waters of the Baltic Sea Vistula Lagoon // *Regional Studies in Marine Science*. 2020. V. 34. P. 101023. doi: 10.1016/j.rsma.2019.101023.
18. Korobchenkova K. D., Aleksandrov S. V., Semenova A. S., Stont Zh. I., Ulyanova M. O. Influence of hydro-meteorological conditions on the plankton distribution in the estuary of the Pregol river and the coastal part of the Baltic Sea // *Oceanology*. 2023. V. 63, No. S1. P. S188—S201. doi: 10.1134/S0001437023070068.
19. Семенова А. С., Дмитриева О. А. Планктонные сообщества системы «река Прегола — Вислинский залив — Калининградский морской канал (КМК) — Балтийское море» // *Труды Зоологического института РАН*. 2023. Т. 3276. № 3. С. 430—450. doi: 10.31610/trudyzin/2023.327.3.430.

20. Бирюкова А. Д., Муратова А. А., Ульянова М. О. Анализ изменчивости параметров карбонатной системы в зоне смешения речных, заливных и морских вод (на примере юго-восточной части Балтийского моря) // Успехи современного естествознания. 2025. № 7. С. 8—19. doi: 10.17513/use.38406.
21. Lukashin V. N., Krechik V. A., Klyuvitkin A. A. et al. Geochemistry of suspended particulate matter in the marginal filter of the Pregolya River (Baltic Sea) // Oceanology. 2018. V. 58, No. 6. P. 856—869. doi: 10.1134/S0001437018060097.
22. Aleksandrov S. V. Long-term changes in the primary production of phytoplankton in the ecosystem of the Vistula Lagoon of the Baltic Sea // Inland Water Biology. 2024. V. 17, No. 1. P. 37—47. doi: 10.1134/S1995082924010036.
23. Чубаренко Б. В., Двоеглазова Н. В., Боскачёв Р. В. и др. Пространственно-временная изменчивость гидрологических характеристик в зоне смешения реки Преголи (Юго-Восточная Балтика) и методические подходы к ее изучению // Океанологические исследования. 2024. Т. 52, № 1. С. 157—176. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).8.
24. Jeffrey S. W., Humphrey G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton // Biochemie und Physiologie der Pflanzen. 1975. V. 167, Issue 2. P. 191—194. doi: 10.1016/S0015-3796(17)30778-3.
25. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промысла районов Мирового океана. Москва: ВНИРО, 2003. 202 с.
26. Чубаренко Б. В. Зонирование Калининградского залива и устьевое участка реки Преголи по показателям гидролого-экологического состояния и в целях оптимизации мониторинга / Комплексное исследование процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна. Вып. 2, Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2007. С. 591—601.
27. Александров С. В. Пространственные изменения гидрохимических показателей в Вислинском заливе в 2014—2016 годах // Труды АтлантНИРО. 2018. Т. 2, № 1. С. 5—21.
28. Сташко А. В., Александров С. В. Пространственное распределение и сезонная динамика гидрохимических условий в Вислинском заливе Балтийского моря в 2020—2022 гг. // Океанологические исследования. Т. 51. № 1. С. 71—90. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).4.
29. Fairbridge R. W. The estuary: its definition and geodynamic cycle // Chemistry and Biochemistry of Estuaries. John Wiley, New York, 1980. P. 1—35.
30. Domnin D., Chubarenko B., Capell R. Formation and re-distribution of the river runoff in the catchment of the Pregolya River // The Handbook of Environmental Chemistry. 2018. V. 65: 269—284. doi: 10.1007/978_2017_97.
31. Гидрометеорологическая обстановка по Калининградской области. Калининградский ЦГМС – филиал ФГБУ «Северо-Западное УГМС». 2024. URL: <https://meteo39.ru/news.html>.
32. Kudryavtseva E. A., Aleksandrov S. V. Hydrological and hydrochemical underpinnings of primary production and division of the Russian sector in the Gdansk Basin of the Baltic Sea // Oceanology. V. 59, No. 1. P. 49—65. doi: 10.1134/S0001437019010077.
33. Бойцов В. Д. Долгопериодная изменчивость температуры поверхности Северного и Балтийского морей в 1900—2020 гг // Гидрометеорология и экология. 2021. № 63. С. 236—254. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-236-254.
34. Груздев А. И., Лобанов В. А. Оценка современных климатических изменений температуры воздуха в Северо-Западном Федеральном округе // Гидрометеорология и экология. 2025. № 79. С. 307—323. doi: 10.33933/2713-3001-2025-79-307-323.
35. Шишкина Т. Р., Ефимова Ю. В., Лаврова И. В., Иванова И. А., Иванова Е. П. Формирование аномального термического режима осенью и весной на Европейской территории России // Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. С. 57—72. doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-57-72.
36. Рахуба А. В. Оценка влияния гидродинамического режима на развитие фитопланктона и качество воды Куйбышевского водохранилища // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. 2020. Т. 162, № 3. С. 430—444. doi: 10.26907/2542-064X.2020.3.430-444.
37. Александров С. В., Горбунова Ю. А. Продукция фитопланктона и содержание хлорофилла в эстуариях различного типа // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2012. № 1. С. 90—98.

38. Kownacka J., Calkiewicz J., Kornijów R. A turning point in the development of phytoplankton in the Vistula Lagoon (southern Baltic Sea) at the beginning of the 21st century // *Oceanologia*. 2020. V. 62, No. 4. P. 538—555. doi: 10.1016/j.oceano.2020.08.004.
39. Nawrocka L., Kobos J. The trophic state of the Vistula Lagoon: an assessment based on selected biotic and abiotic parameters according to the Water Framework Directive // *Oceanologia*. 2011. V. 53, No. 3. P. 881—894. doi: 10.5697/oc.53-3.881.
40. Whitton B. Freshwater plankton // *The biology of blue-green algae*. 1973. V. 9. P. 353—367.
41. Kruk M., Jaworska B., Jablonska-Barna I. et al. How do differences in the nutritional and hydrological background influence phytoplankton in the Vistula Lagoon during a hot summer day? // *Oceanology*. 2016. V. 58, No. 4. P. 341—352. doi: 10.1016/j.oceano.2016.05.004.
42. Waughman G. The effect of temperature on nitrogenase activity // *Journal of Experimental Botany*. 1977. V. 28, No. 105: 949—8960. doi: 10.1093/jxb/28.4.949.
43. Александров С. В., Сташко А. В. Экологическое состояние Вислинского залива с учетом параметров качества и эвтрофирования вод // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки*. 2023. № 3. С. 78—91. doi: 10.5922/gikbfu-2023-3-6.
44. Чечко В. А., Топчая В. Ю., Бабаков А. Н. Новая карта донных осадков Калининградского залива Балтийского моря // *Известия КГТУ*. 2023. № 69. С. 44—56. doi: 10.46845/1997-3071-2023-69-44-56.
45. Underwood G. J. C., Kromkamp J. Primary production by phytoplankton and microphytobenthos in estuaries // *Advances in Ecological Research*. 1999. V. 29. P. 93—153. doi: 10.1016/S0065-2504(08)60192-0.
46. Le Y., Zhao Y., Liu X. et al. Distribution characteristics and influencing factors of chlorophyll a in the Pearl River Estuary and surrounding waters during spring and summer of 2023 // *Regional Studies in Marine Science*. 2025. V. 87. P. 104241. doi: 10.1016/j.rsma.2025.104241.
47. Fisher T. R., Harding Jr. L. W., Stanley D. W. et al. Phytoplankton, nutrients, and turbidity in the Chesapeake, Delaware, and Hudson estuaries // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 1988. V. 27, No. 1. P. 61—93. doi: 10.1016/0272-7714(88)90032-7.

References

1. McLusky D. S., Elliott M. *The Estuarine Ecosystem: Ecology, Threats and Management*. Oxford University Press. 2004. doi 10.1093/acprof:oso/9780198525080.001.0001.
2. Nixon S. W. Coastal Marine Eutrophication: A Definition, Social Causes, and Future Concerns. *Opheelia*. 1995; 41: 199—219. doi: 10.1080/00785236.1995.10422044.
3. Cloern J. Our Evolving Conceptual Model of the Coastal Eutrophication Problem. *Marine Ecology Progress Series*. 2001; 210: 223—253. doi: 10.3354/meps210223.
4. Nixon S. W., Ammerman J. W., Atkinson L. P. et al. The fate of nitrogen and phosphorus at the land sea margin of the North Atlantic Ocean. *Biogeochemistry*. 1996; 35: 141—180. doi: 10.1007/BF02179826.
5. Nedwell D. B., Jickells, T. D., Trimmer M. et al. Nutrients in estuaries. *Advances in Ecological Research*. 1999; 29: 43—92. doi: 10.1016/S0065-2504(08)60191-9.
6. Conley D. J., Kaas H., Møhlenberg F. et al. Characteristics of Danish estuaries. *Estuaries and Coasts*. 2000; 23(6): 820—837. doi: 10.2307/1353000.
7. Lisitsyn A. P. Marginal filter of the oceans. *Okeanologiya = Oceanology*. 1994; 34(5): 735—747. (In Russ.).
8. Chubarenko I., Khatmullina L., Esiukova E. et al. Deposition of microplastics in estuaries: critical review of field and experimental data from the perspective of the Ocean Marginal Filter concept. *Science of the Total Environment*. 2025; 997: 180210. doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.180210.
9. Arndt S., Lacroix G., Gypens N., et al. Nutrient dynamics and phytoplankton development along an estuary-coastal zone continuum: A model study. *Journal of Marine Systems*. 2011; 84(3—4): 49—66. doi: 10.1016/j.jmarsys.2010.08.005.
10. OECD: Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control. Paris, 1982: 154 p.
11. Cloern J. E., Jassby A. D. Patterns and scales of phytoplankton variability in estuarine-coastal Ecosystems. *Estuaries and Coasts*. 2010; 33(2): 230—241. doi: 10.1007/s12237-009-9195-3.

12. Chubarenko B., Gorbunova J., Domnin D. Scenario analysis of socio-economic and climate related changes in nutrient load and retention for the Pregolya River catchment (South-Eastern Baltic): The view at the beginning of 21st century. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024; 17(2): 35—49. doi: 10.59887/2073-6673.2024.17(2)-4.
13. Chubarenko B., Margoński P. The Vistula lagoon. Ecology of Baltic coastal waters. U. Schiewer (Ed.). Berlin, Heidelberg: Springer. 2008; 167—195. doi: 10.1007/978-3-540-73524-3_8.
14. Silich M. V. Water balance of the lagoon. *Gidrometeorologicheskij rezhim Vislinskogo zaliva = Hydrometeorological regime of the Vistula Lagoon*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1971: (143—172). (In Russ.).
15. Ciesliski R., Chlost I. Water balance characteristics of the Vistula Lagoon coastal area along the southern Baltic Sea. *Baltica*. 2017; 30(2): 107—117. doi: 10.5200/baltica.2017.30.12.
16. Chubarenko B., Domnin D., Navrotskaya S. et al. Transboundary lagoons of the Baltic Sea (Chapter 6). In: The diversity of russian estuaries and lagoons exposed to human influence. Estuaries of the World. Switzerland: Springer International Publishing, 2017: 149—191. doi: 10.1007/978-3-319-43392-9_6.
17. Krechik V., Krek A., Bubnova E., Kapustina M. Mixing zones within the complex transitional waters of the Baltic Sea Vistula Lagoon. *Regional Studies in Marine Science*. 2020; 34: 101023. doi: 10.1016/j.rsma.2019.101023.
18. Korobchenkova K. D., Aleksandrov S. V., Semenova A. S., Stont Zh. I., Ulyanova M. O. Influence of hydro-meteorological conditions on the plankton distribution in the estuary of the Pregol river and the coastal part of the Baltic Sea. *Oceanology*. 2023; 63(S1): S188—S201. doi: 10.1134/S0001437023070068.
19. Semenova A. S., Dmitrieva O. A. Plankton communities of the system “Pregolya River–Vistula Lagoon–Kaliningrad Sea Canal (KMC)–Baltic Sea”. *Trudy Zoologicheskogo instituta RAN = Proceedings of the Zoological Institute of the RAS*. 2023; 327(3): (430—450). (In Russ.). doi: 10.31610/trudyzin/2023.327.3.430.
20. Biryukova A. D., Muratova A. A., Ulyanova M. O. Analysis of the variability of the parameters of the carbonate system in the mixing zone of river, lagoon and sea waters (on the example of the south-astern part of the Baltic Sea). *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in modern natural science*. 2025; 7: (8—19). (In Russ.). doi: 10.17513/use.38406.
21. Lukashin V. N., Krechik V. A., Klyuvitkin A. A. et al. Geochemistry of suspended particulate matter in the marginal filter of the Pregolya River (Baltic Sea). *Oceanology*. 2018; 58(6): 856—869. doi: 10.1134/S0001437018060097.
22. Aleksandrov S. V. Long-term changes in the primary production of phytoplankton in the ecosystem of the Vistula Lagoon of the Baltic Sea. *Inland Water Biology*. 2024; 17(1): 37—47. doi: 10.1134/S1995082924010036.
23. Chubarenko B. V., Dvoeglazova N. V., Boskachev R. V. et al. Spatio-temporal variability of hydrological characteristics in the mixing zone of the Pregolya River (South-Eastern Baltic) and methodological approaches to its study. *Okeanologicheskie issledovaniya = Oceanological Research*. 2024; 52(1): (157—176). doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).8. (In Russ.).
24. Jeffrey S. W., Humphrey G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a , b , c_1 and c_2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*. 1975; 167(2): 191—194. doi: 10.1016/S0015-3796(17)30778-3.
25. *Rukovodstvo po himicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskom monitoringe rybohozaystvennykh vodoymov i perspektivnykh dlya promysla rajonov Mirovogo okeana = Manual to chemical analysis of sea and fresh waters in environmental monitoring of fishery water bodies and areas of the World Ocean that are promising for fishing*. Moscow: VNIRO, 2003: 202 p. (In Russ.).
26. Chubarenko B. V. Zoning of the Kaliningrad Bay and the mouth of the Pregolya River based on indicators of the hydrological and ecological state and in order to optimize monitoring. *Kompleksnoe issledovanie processov, harakteristik i resursov rossijskikh morej Severo-Evropejskogo bassejna = Comprehensive study of the processes, characteristics and resources of the Russian seas of the North European Basin*. Issue 2. Apatity: Publishing House of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2007: 591—601. (In Russ.).
27. Aleksandrov S. V. Spatial changes in hydrochemical indicators in the Vistula Lagoon in 2014-2016. *Trudy AtlantNIRO = Proceedings of AtlantNIRO*. 2018; 2 (1): (5—21). (In Russ.).

28. Stashko A. V., Aleksandrov S. V. Spatial distribution and seasonal dynamics of hydrochemical conditions in the Vistula Lagoon of the Baltic Sea in 2020–2022. *Okeanologicheskie issledovaniya = Oceanological Research*. 2023; 51(1): 71—90. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).4. (In Russ.).
29. Fairbridge R. W. The estuary: its definition and geodynamic cycle. *Chemistry and Biochemistry of Estuaries*. John Wiley, New York, 1980: (1—35).
30. Domnin D., Chubarenko B., Capell R. Formation and re-distribution of the river runoff in the catchment of the Pregolya River. *The Handbook of Environmental Chemistry*. 2018; 65: 269—284. doi: 10.1007/698_2017_97.
31. *Gidrometeorologicheskaya obstanovka po Kaliningradskoj oblasti = Hydrometeorological situation in the Kaliningrad Oblast*. Kaliningrad Center for Hydrometeorological Survey — branch of the Federal State Budgetary Institution “North-West MSMS”. 2024. URL: <https://meteo39.ru/news.html>. (In Russ.).
32. Kudryavtseva E. A., Aleksandrov S. V. Hydrological and hydrochemical underpinnings of primary production and division of the Russian sector in the Gdansk Basin of the Baltic Sea. *Oceanology*. 2019; 59(1): 49—65. doi: 10.1134/S0001437019010077.
33. Boitsov V. D. Long-term variability of the sea surface temperature (SST) in the North and Baltic Seas for the 1900—2020. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University)*. 2021; (63): 236—254. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-236-254. (In Russ.).
34. Shishkina T. R., Efimova Yu. V., Lavrova I. V., Ivanova I. A., Ivanova E. P. Formation of an anomalous thermal regime in autumn and spring on the European territory of Russia. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024; (74): 57—72. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-57-72. (In Russ.).
35. Gruzdev A. I., Lobanov V. A. Assessment of modern climate changes in air temperature in the North-western Federal District. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025; (79): 307—323. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2025-79-307-323. (In Russ.).
36. Rakhuba A. V. Assessment of the influence of the hydrodynamic regime on the development of phytoplankton and water quality of the Kuibyshev Reservoir. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki = Scientific Notes of Kazan University. Series: Natural Sciences*. 2020; 162(3): 430—444. (In Russ.). doi: 10.26907/2542-064X.2020.3.430-444. (In Russ.).
37. Aleksandrov S. V., Gorbunova J. A. Phytoplankton production and chlorophyll content in estuaries of different types. *Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta = Bulletin of the Immanuel Kant Baltic Federal University*. 2012; (1): (90—98). (In Russ.).
38. Kownacka J., Calkiewicz J., Kornijów R. A turning point in the development of phytoplankton in the Vistula Lagoon (southern Baltic Sea) at the beginning of the 21st century. *Oceanologia*. 2020; 62(4): 538—555. doi: 10.1016/j.oceano.2020.08.004
39. Nawrocka L., Kobos J. The trophic state of the Vistula Lagoon: an assessment based on selected biotic and abiotic parameters according to the Water Framework Directive. *Oceanologia*. 2011; 53(3): 881—894. doi: 10.5697/oc.53.3.881.
40. Whitton B. Freshwater plankton. *The biology of blue-green algae*. 1973; 9: 353—367.
41. Kruk M., Jaworska B., Jablonska-Barna I. et al. How do differences in the nutritional and hydrological background influence phytoplankton in the Vistula Lagoon during a hot summer day? *Oceanology*. 2016; 58(4): 341—352. doi: 10.1016/j.oceano.2016.05.004.
42. Waughman G. The effect of temperature on nitrogenase activity. *Journal of Experimental Botany*. 1977; 28(105): 949—8960. doi: 10.1093/jxb/28.4.949.
43. Aleksandrov S. V., Stashko A. V. Ecological state of the Vistula Lagoon due to parameters of water quality and eutrophication. *Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Yestestvennyye i meditsinskiye nauki = Bulletin of the Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*. 2023; (3): (78—91). doi: 10.5922/gikbfu-2023-3-6. (In Russ.).
44. Chechko V. A., Topchaya V. Yu., Babakov A. N. New map of bottom sediments of the Kaliningrad Gulf of the Baltic Sea. *KSTU News*. 2023; (69): (44—56). doi: 10.46845/1997-3071-2023-69-44-56. (In Russ.).
45. Underwood G. J. C., Kromkamp J. Primary production by phytoplankton and microphytobenthos in estuaries. *Advances in Ecological Research*. 1999; 29: 93—153. doi: 10.1016/S0065-2504(08)60192-0.

46. Le Y., Zhao Y., Liu X. et al. Distribution characteristics and influencing factors of chlorophyll a in the Pearl River Estuary and surrounding waters during spring and summer of 2023. *Regional Studies in Marine Science*. 2025; 87: 104241. doi: 10.1016/j.rsma.2025.104241.
47. Fisher T. R., Harding Jr. L. W., Stanley D.W. et al. Phytoplankton, nutrients, and turbidity in the Chesapeake, Delaware, and Hudson estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 1988; 27(1): 61—93. doi: 10.1016/0272-7714(88)90032-7.

Сведения об авторах

Сергей Валерьевич Александров, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория геоэкологии, Атлантическое отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, hydrobio@mail.ru.

Юлия Александровна Горбунова, кандидат биологических наук, научный сотрудник, лаборатория прибрежных систем, Атлантическое отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, julia_gorbunova@mail.ru.

Надежда Вадимовна Двоеглазова, младший научный сотрудник, лаборатория прибрежных систем, Атлантическое отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, nadya2eyes@mail.ru.

Information about authors

Sergey Valerievich Aleksandrov, PhD (Biol. Sci.), Leading Researcher, Laboratory of Geoecology, Atlantic Branch of the Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences.

Yulia Aleksandrovna Gorbunova, PhD in Biology, Researcher, Laboratory for Coastal Systems Study, Atlantic Branch of the Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences.

Nadezhda Vadimovna Dvoeglazova, Junior Researcher, Laboratory for Coastal Systems Study, Atlantic Branch of the Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 07.09.2025

Принята в печать 27.10.2025

The article was received on 07.09.2025

The article was accepted on 27.10.2025

Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 699—717.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(81):699—717.

Научная статья

УДК 502.51:504.5(985)«2023»

doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-699-717

Сравнительный анализ результатов учета морского мусора наземными и дистанционными (БПЛА) методами на побережье архипелага Новая Земля в 2023 г.

Александра Александровна Ершова¹, Екатерина Андреевна Голубева¹, Евгений Викторович Антонов², Елизавета Александровна Сердюкова³

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, ПластикЛаб, С.-Петербург, Россия, ershova@rshu.ru

² Институт географии РАН, Москва, Россия

³ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, С.-Петербург, Россия

Аннотация. Представлены результаты полевых исследований 2023 г. по оценке загрязнения морским макромусором побережий архипелага Новая Земля и сравнение результатов учета двумя методами мониторинга: традиционного наземного (ручной сбор по протоколам OSPAR/AMAP) и дистанционного (аэрофотосъемка с БПЛА). На основе анализа данных с четырех ключевых участков побережья выявлены преимущества и ограничения каждого метода в арктических условиях. Установлено, что наземные методы обеспечивают точную оценку качественного состава макромусора, а дистанционные эффективны для картографирования крупных объектов и обследования обширных территорий. Результаты показывают целесообразность совместного применения методов для разработки протоколов экологического мониторинга в Арктике.

Ключевые слова: морской мусор, методы мониторинга побережья, БПЛА, протокол OSPAR, Баренцево море, Арктика.

Благодарности: работа выполнена в рамках проекта Госзадания Минобрнауки РФ № FSZU-2023-0002 и программы «Арктический плавучий университет».

Для цитирования: Ершова А. А., Голубева Е. А., Антонов В. А. и др. Сравнительный анализ результатов учета морского мусора наземными и дистанционными (БПЛА) методами на побережье архипелага Новая Земля в 2023 г. // Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 699—717. doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-699-717.

Comparison of results of ground-based and remote (UAV) methods of marine debris monitoring on the coast of the Novaya Zemlya archipelago in 2023

*Alexandra A. Ershova¹, Ekaterina A. Golubeva¹,
Evgeniy V. Antonov², Elizaveta A. Serdyukova³*

¹ Russian State Hydrometeorological University, PlasticLab, St. Petersburg, Russia

² Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

Summary. The results of a comparison of methods for monitoring marine macrolitter pollution along the coasts of the Novaya Zemlya archipelago (Barents Sea) in 2023 are presented. These methods utilize ground-based methods (manual collection and classification according to OSPAR/AMAP protocols) and remote sensing methods — drone aerial photography followed by photogrammetric processing and visual interpretation of orthophotomaps. As in previous years of research, the highest marine litter density was observed along the coast of Cape Zhelaniya (on the Barents Sea side), with plastic waste from fishing and shipping dominating. The findings are consistent with the results of previous studies in this area. The most common litter categories were fishing nets, plastic buoys, and fragments of synthetic ropes. A comparative analysis of the methods demonstrated high representativeness of ground-based surveys for assessing the qualitative composition and sources of pollution, while the remote sensing method is effective for mapping large objects and surveying hard-to-reach coastlines and large areas in a short period of time. Thus, the methods demonstrate complementarity, covering different aspects of the monitoring task. In Arctic conditions, the use of UAVs significantly expands the monitoring timeframe, allowing surveys to be conducted during periods inaccessible for fieldwork. Operational limitations of UAV surveys related to flight altitude and resolution were identified. To increase data detail, it is advisable to combine general aerial views with targeted surveys of key areas at lower altitudes. These data can be used to create litter density maps and predict its distribution. This approach opens the possibility of prompt decision-making regarding the cleanup of the most polluted coastal areas.

Keywords: marine litter, monitoring, coastlines, UAVs, Barents Sea, Arctic.

Acknowledgments: This work was completed as part of the Russian Ministry of Education and Science's State Assignment Project No. «FSZU-2023-0002» and the Arctic Floating University program.

For citation: Ershova A. A., Golubeva E. A., Antonov E. V. et al. Comparison of results of ground-based and remote (UAV) methods of marine debris monitoring on the coast of the Novaya Zemlya archipelago in 2023 *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(81):(699—717). doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-699-717. (In Russ.).

Введение

Загрязнение Мирового океана отходами человеческой деятельности стало одним из глобальных экологических вызовов современности. Пластик представляет значительную угрозу для морских организмов: животные, птицы и рыбы страдают от употребления в пищу крупных пластиковых частиц и запутывания в брошенных рыболовных снастях. Пластиковые предметы (макромусор) — предметы более 2,5 см [1] на побережьях под воздействием УФ-излучения и вследствие ветровой и волновой эрозии разрушаются и превращаются в микропластик (частицы менее 5 мм), который по своим морфологическим и физико-химическим

характеристикам является потенциально высокоопасным токсикантом для живых организмов при попадании в пищевую цепь [2, 3, 4].

Мировые исследования подчеркивают важность океанских побережий как резервуаров морского пластикового мусора [5] и пляжей как очагов накопления мусора [6], которые, согласно модельным оценкам, хранят около четверти всего океанского пластика [7]. Очевидно, отдаленные районы и острова также будут являться накопителями некоторого количества морского мусора [8]. Исследования полярных регионов показали, что морская вода и побережья, несмотря на значительную удаленность от густонаселенных частей планеты, тем не менее значительно загрязнены пластиковым мусором и микропластиком [9], а Баренцево море названо местом формирования потенциального «шестого мусорного пятна» в Мировом океане [10, 11]. Сообщается также о поедании пластика арктической фауной в арктических экосистемах [12, 13].

Данных о количественном и качественном составе морского мусора на арктических побережьях России до сих пор сравнительно мало, что связано, в первую очередь, с их труднодоступностью и дороговизной береговых исследований. Пластиковый мусор стал основным компонентом морского макромусора на побережьях баренцевоморских архипелагов (Новая Земля и Земля Франца-Иосифа) в 2018 г. [14], значительное количество плавающего пластикового мусора зарегистрировано на поверхности Баренцева море в районах интенсивного движения судов [15]. Показано накопление мусора на дне Баренцева моря в районе Шпицбергена [16], а также на побережьях архипелагов Шпицберген [17] и Новая Земля [18]. При этом уровень загрязнения побережий этих двух удаленных арктических архипелагов остается одним из самых высоких в мире. Исследования подтвердили высокую вероятность нелегального сброса пластиковых отходов с рыболовецких и грузовых судов в этой части Баренцева региона.

Имеющихся данных прибрежных исследований в Арктике недостаточно для понимания тенденций накопления морского мусора в этой части земного шара, что связано, в первую очередь, со скудностью данных мониторинга в целом и несогласованностью методов, используемых различными исследовательскими группами. Традиционно учет морского макромусора ведется вручную с помощью наблюдателя, который фиксирует предметы мусора на поверхности моря или на побережье. И хотя методы с участием наблюдателя имеют множество преимуществ (например, точная идентификация предметов мусора, отсутствие проблем с зарядом батареи камеры или объемом памяти), альтернативные методы дистанционного зондирования способствуют получению более объективных и воспроизводимых результатов, а также возможности повторного использования и анализа записанных изображений в других исследованиях [19, 20].

Применение дистанционных методов особенно актуально для труднодоступных арктических районов. Основной задачей в таких регионах является не уборка мусора, а выявление источников его поступления с помощью БПЛА-съемки и других методов для разработки мер предотвращения загрязнения. В связи с этим целью данного исследования являлось сравнение данных, полученных методами наземного обследования (ручной сбор и идентификация) и дистанционной

съемки с БПЛА, для выработки оптимального подхода к оценке загрязненности арктических побережий морским макромусором и планированию мероприятий по его ликвидации, а также для разработки адаптированных арктических протоколов мониторинга.

Данные для исследования получены в результате проведения научно-образовательной экспедиции Арктического плавучего университета (АПУ) на научно-исследовательском судне «Профессор Молчанов» в период с 23 июня по 15 июля 2023 г.

Материалы и методы исследования

1. Ручной сбор и классификация морского мусора

Побережья архипелага Новая Земля являются местом регулярного мониторинга морского макромусора в регионе Баренцева моря в рамках экспедиций Арктического плавучего университета. В экспедиции АПУ 2023 г. группа мониторинга морского мусора осуществила три высадки на острове Северный архипелага Новая Земля: в Русской Гавани, на Мысе Желания и в Бухте Витней (Ледяной Гавани). Выбор исследуемых участков береговой линии осуществлен с учетом доступности пляжа, геоморфологических особенностей берега и сопоставимости с предыдущими годами мониторинга (2021 г. и 2022 г. [18]). На всех побережьях последовательно обследованы два или три полигона, что позволило провести ручной сбор и учет макромусора в общей сложности на семи участках длиной 100 м каждый, расположенных на пляжах с различной экспозицией и на разных сторонах острова Северный архипелага Новая Земля, т. е. со стороны Баренцева и Карского морей.

Исследования пляжей проводились в соответствии с международной методикой и рекомендациями для Северо-Атлантического региона ОСПАР и Арктической программы по мониторингу и оценке АМАП [21], которые предусматривают учет макромусора на полосе длиной 100 метров от уреза воды до линии штормового выброса (до 70 метров). Рекомендации АМАП разработаны для арктического региона для условий отсутствия растительности. Береговая линия должна быть доступна с суши или с лодки; крупные предметы мусора (более 50 см) могут быть перемещены вглубь суши, если транспортировка невозможна; исследования должны проводиться не реже одного раза в течение безледного сезона. Соблюдение единого протокола обеспечивает сопоставимость полученных результатов с данными других регионов и предыдущими результатами мониторинга.

Для получения качественной и количественной информации о загрязнении побережья предметы подсчитаны и взвешены согласно категориям (пластик, резина, текстиль, бумага, обработанное дерево, металл, стекло и неидентифицированные материалы) классификатора «Master List of Categories of Litter Items» [22], данные занесены в протоколы с координатами участка и параметрами, необходимыми для дальнейшего расчета плотности распределения морского мусора, а также метеоусловиями. Собранные предметы отсортированы по основным морфологическим признакам: по видам полимерной продукции (бутылки (PET), рыболовные сети и леска (PA, PE), пенопласт (PS), упаковка и емкости (HDPE,

РР) и др.) и другим материалам (металл, стекло, резина, обработанное дерево, текстиль, бумага/картон, прочее) согласно международному классификатору программы Рамочной директивы по морской стратегии (MSFD) [22], а также по размерности фракций и цвету. Кроме того, на данном этапе определены основные признаки происхождения собранных предметов по видам этикеток и другим признакам (форма предметов): рыболовство/судоходство и бытовые отходы.

2. Аэрофотосъемка морских побережий с применением беспилотного летательного аппарата

В рамках экспедиции 2023 г. впервые проведено комплексное обследование береговой зоны с использованием беспилотного летательного аппарата. Получены снимки высокого разрешения всех обследованных побережий для дальнейшего дешифрирования и учета морского мусора, а также для сравнения с результатами ручного сбора, что создает принципиально новые возможности количественной оценки загрязнения береговой зоны. Ручной сбор производился после проведения полетов, в результате чего весь собранный мусор на стометровых участках был учтен на снимках. При этом за время проведения ручного сбора одного или двух участков по 100 м облет производился для всего пляжа, длина которого составляла до 1 км.

Съемка береговой части пляжей выполнена с использованием квадрокоптера DJI Mavic Air 2 (параметры кадра 4000 x 3000 пикселей) в надир, в один ряд вдоль берега, в ручном и автоматическом режиме (по заранее сформированному полетному плану) с формированием перекрытия кадров более 70 %.

В ходе первой аэрофотосъемки в бухте Русская Гавань сформировано полётное задание с использованием приложения «Litchi», предусматривающее автоматическую съёмку с частотой 1 кадр в секунду при скорости полета 2 м/с. Анализ результатов съёмки показал, что для морских пляжей, где положение уреза воды зависит от фазы прилива, предварительное планирование полёта оказывается сложным и малоэффективным. При однорядном методе съёмки существует риск получения либо чрезмерно узкой полосы охвата с избыточным количеством снимков водной поверхности в фазу прилива, либо образованием слепых зон в фазу отлива. Этот риск особенно возрастает при съёмке с небольших высот, где эффективная ширина полосы съёмки составляет примерно 15—20 метров.

В связи с этим, автоматический режим полёта по предварительно заданному маршруту целесообразен только для мелкомасштабной съёмки с широкой полосой охвата и значительным запасом по положению береговой линии с учетом возможных изменений, вызванных приливно-отливными процессами. Для минимизации вышеуказанных рисков при съёмке с относительно низких высот рекомендуется применять многорядный метод съёмки.

Повторная аэрофотосъемка в бухте Русская Гавань проведена на высоте 20 м в ручном режиме с визуальным контролем положения береговой линии для обеспечения максимальной эффективной ширины полосы охвата при однорядном полёте. Все последующие съёмки также выполнены в ручном режиме для достижения

оптимального качества и точности данных (табл. 1). На рис. 1 представлена схема расположения полигонов ручного сбора на территории Русской Гавани.

Таблица 1.

Параметры аэрофотосъёмки морских побережий архипелага Новая Земля
с использованием БПЛА

Parameters of aerial photography of Novaya Zemlya archipelago coastline using UAVs

Место съёмки	Высота от места взлета, м	Количество снимков	Эффективная ши- рина съёмки, м	Протяженность участка, м
Русская Гавань	20	145	37—40	770
	40	269		
Бухта Витней (Ледяная гавань)	20	87	27	337
	50	133	61	1002
Мыс Желания, Баренцево- морская сторона	20	231	22	718
Мыс Желания, Карская сторона	15,5	217	16—24	720

Для последующего анализа пространственного распределения антропогенных объектов по материалам аэрофотосъёмки проведена фотограмметрическая обработка изображений с использование пакета Agisoft Mateshape Professional. Высокая степень перекрытия снимков позволяет получить цифровую модель местности, построить ортофотомозаику и проводить дешифрирование на предмет выявления морского мусора. Для этого на первом этапе выполнено выравнивание снимков по точкам перекрытия и определены параметры внутреннего и внешнего ориентирования для каждого кадра.

На основе плотного облака точек построена цифровая модель местности (ЦММ), представляющая собой регулярную сетку (растр), каждая ячейка которой содержит значение высоты исследуемой территории. Пример полученной ЦММ для побережья Мыса Желания со стороны Баренцева моря представлен на рис. 1.

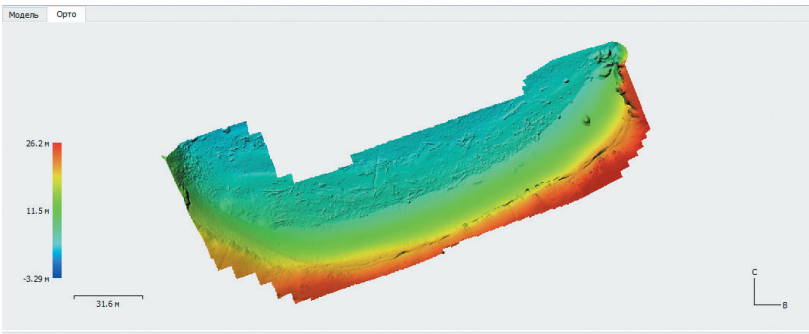


Рис. 1. Цифровая модель местности побережья Мыса Желания со стороны Баренцева моря (фрагмент).

Fig. 1. Digital model of the Cape Zhelaniya coastline area from the Barents Sea (fragment).

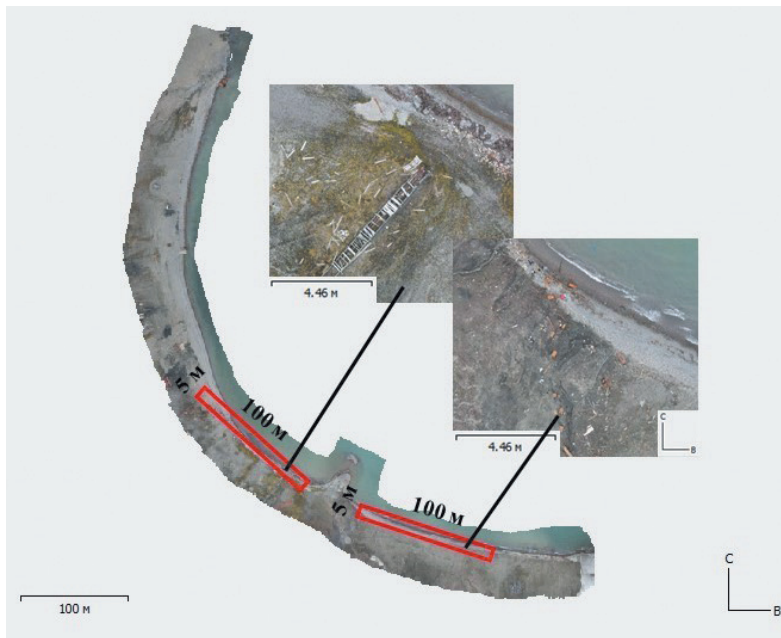


Рис. 2. Ортофотоплан побережья в Русской Гавани, построенный по снимкам с БПЛА (высота полета: 25—40 м) — граница полигона ручного сбора.

Fig. 2. Orthophotomap of the Russkaya Harbour coastline from UAV images (flight altitude is 25—40 m).

Заключительным этапом фотограмметрической обработки снимков является построение ортофотоплана — высокоточного планового изображения, полученного путем ортогонального проецирования исходных снимков на поверхность ЦММ. Пример итогового ортофотоплана для Русской Гавани и полигоны ручного сбора представлены на рис. 2.

3. Дешифрирование ортофотопланов

Дешифрирование ортофотопланов представляет собой процесс визуального анализа изображения с целью идентификации расположенных на нем объектов. В рамках данного исследования необходимо отличить морской мусор от объектов природного происхождения, таких как гравий, водоросли, вода и др. Для этого оператор проводит оценку по следующим признакам:

1. Спектральные характеристики: цвет и яркость объекта, позволяющие отличать материалы (например, зеленые полимерные сети, белые пенопластовые фрагменты, прозрачные пластиковые бутылки).

2. Морфологические признаки: форма, размер и пропорции объекта (линейные структуры — канаты и сети, изометричные — буи и емкости, фрагментированные — обломки).

3. Расположение объектов: взаимное расположение объектов, их приуроченность к элементам береговой линии (линии выброса).

Важным фактором достоверного определения предметов морского мусора является опыт работы с предметами пластикового мусора в реальных условиях Арктики, т. к. часто предметы белого и серого цвета могут быть при первом рассмотрении похожими на крупные камни и гравий.

Далее каждый объект относится к определенному классу в соответствии с классификатором морского мусора с присвоением атрибутов: тип материала (пластик, металл, дерево, стекло и др.), тип изделия (бутылка, сеть, веревка, упаковка, фрагмент и др.), размерная фракция (> 50 см, < 50 см). Для обеспечения сопоставимости данных при анализе снимков, полученных с разных высот, был установлен единый порог обнаружения в 50 см. Однако фактическое разрешение и минимальный размер обнаруживаемых объектов варьировались в зависимости от высоты съемки: с высоты 20 м идентифицировались объекты размером от 10 см, тогда как при съемке с 40—50 м надежно распознавались лишь объекты крупнее 40—50 см.

Примеры объектов, идентифицированных посредством визуального дешифрирования, представлены на рисунках 3 и 4.

Высота съемки - 20 м

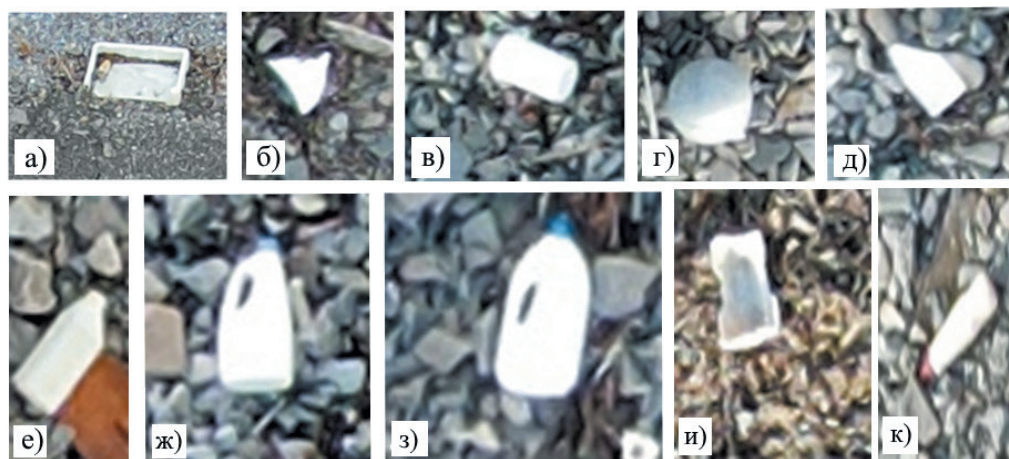


Рис. 3. Типы белого морского мусора, идентифицированного по снимкам с БПЛА:

- a) G57 Пластиковые ящики для рыбы или G79x Куски ящиков; б) и д) G79 Кусочки пластика 2,5 см — 50 см; в) G65 Ведро; з) G63 Буи; е), ж), з), и) и к) G9 Бутылки и контейнеры от чистящих средств. G — код классификатора морского мусора [22].

Fig. 3. Types of white marine debris identified from UAV images:

- a) G57 Fish boxes—plastic or G79x pieces of boxes; b) and d) G79 Plastic pieces 2.5 cm — 50 cm pieces; c) G65 Buckets; d) G63 Buoys; f), g), h), i) and j) G9 Cleaner bottles & containers. G — marine litter classifier code [22].

Высота съемки - 20 м

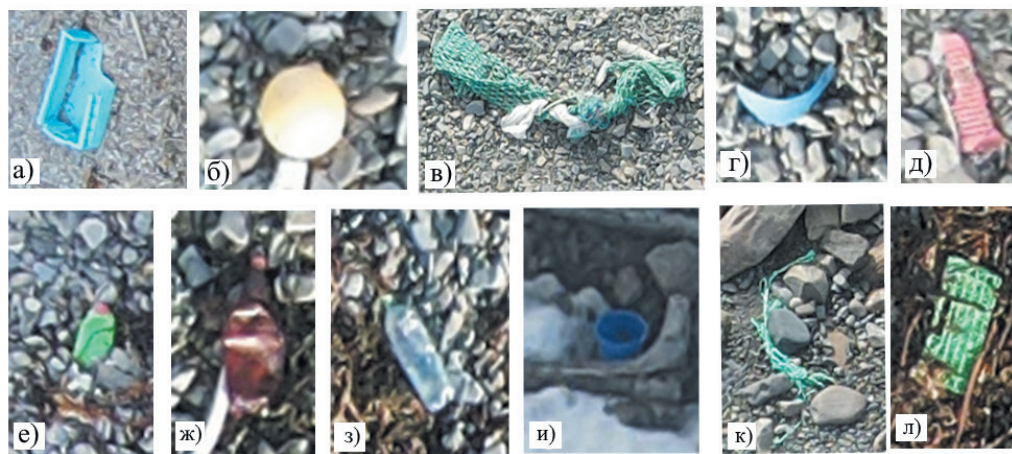


Рис. 4. Типы цветного морского мусора, идентифицированного по снимкам с БПЛА:

- a) G57 Пластиковые ящики для рыбы или G79x Куски ящиков б) G63 Буи;
 в) G54 Сети, их части > 50 см; г), д) и л) G79 Кусочки пластика 2,5 см — 50 см;
 е) G9 Бутылки и контейнеры от чистящих средств; ж) и з) G8 Питьевые бутылки > 0.5 л;
 з) и) G65 Ведро; к) G49 Канат (диаметр больше 1 см). G — код классификатора морского мусора [22].

Fig. 4. Types of colored marine debris identified from UAV images:

- a) G57 Fish boxes—plastic or G79x pieces of boxes; b) G63 Buoys;
 c) G54 Nets and pieces of net > 50 cm; d), e) and k) G79 Plastic pieces 2.5 cm — 50 cm;
 f) G9 Cleaner bottles & containers; g) and h) G8 Drink bottles > 0.5 l; h) i) G65 Buckets;
 j) G49 Rope (diameter greater than 1 cm). G — marine litter classifier code [22].

Результаты исследований

1. Результаты ручного сбора морского мусора

По результатам полевого сбора морского мусора проведена количественная и качественная оценка морского мусора для каждого исследуемого побережья. В Русской Гавани в 2023 г. собрано в среднем 743 предмета морского мусора на 100 м. В составе мусора пластик составил 48 %. Данный участок характеризуется узкой полосой берега, где весь макромусор был сосредоточен в полосе шириной 5 м, что являлось исключением из общей закономерности распределения мусора на арктических побережьях. В Ледяной Гавани в бухте Витней собрано в среднем 178 предметов морского мусора на 100 м (полное отсутствие мусора на пятиметровой полосе у уреза воды), пластика — 40 % от общего количества мусора; преобладает обработанное дерево. На Мысе Желания, как и в предыдущие два года, исследовались два побережья: со стороны Карского моря собрано 659 предметов морского мусора, пластика — 33 %; со стороны Баренцева моря было собрано 608 предметов морского мусора, пластика — 64 %. На пятиметровой полосе у уреза воды не найдено ни одного предмета мусора. Подробные

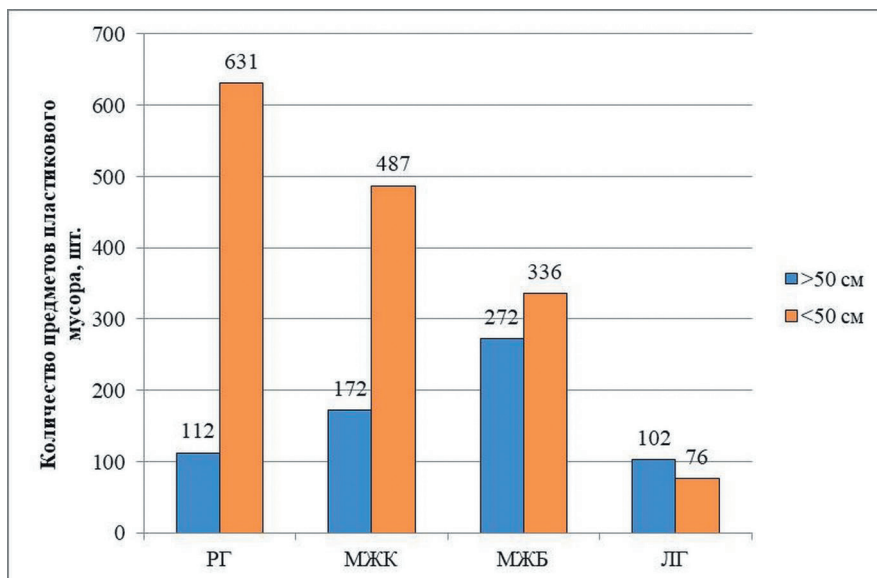


Рис. 5. Количество предметов пластикового мусора (шт. на 100 м пляжа), идентифицированных посредством ручного сбора в 2023 году на побережьях архипелага Новая Земля:

РГ — Русская гавань, МЖК — Мыс Желания Карское, МЖБ — Мыс Желания Баренцево, ЛГ — Ледяная гавань.

Fig. 5. The number of plastic debris items (pcs) identified through manual collection in 2023 on the coasts of the Novaya Zemlya archipelago:

RG — Russkaya Harbour, MZH — Cape Zhelaniya (Barents Sea), MZK — Cape Zhelaniya (Kara Sea), LG — Ledyanaya Harbour.

количественные и качественные характеристики собранных отходов в 2023 г. опубликованы в сборнике материалов конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU—2023)» [23].

Общее количество предметов пластикового макромуора (шт. на 100 м), идентифицированных посредством ручного сбора в 2023 г. и распределенных по категориям больше и меньше 50 см, приводится на рис. 5.

Во всех локациях, за исключением Ледяной Гавани, количество идентифицированных объектов мелкой фракции (< 50 см) превышает количество крупных объектов (> 50 см). Соотношение количества предметов (в %), идентифицированных посредством ручного сбора на всех исследуемых территориях, представлено на рис. 6.

В 2023 г. на пляжах Новой Земли были обнаружены различные виды пластиковых предметов, аналогичные тем, что фиксировались и в предыдущие годы исследований [18]. Среди наиболее распространенных находок выделяются фрагменты и обрезки рыболовных сетей, части ящиков для рыбы, крепежные ленты, куски канатов и веревок, а также разнообразные пластиковые емкости (ведра, корзины, бутылки от чистящих средств и контейнеры для пищевых продуктов),

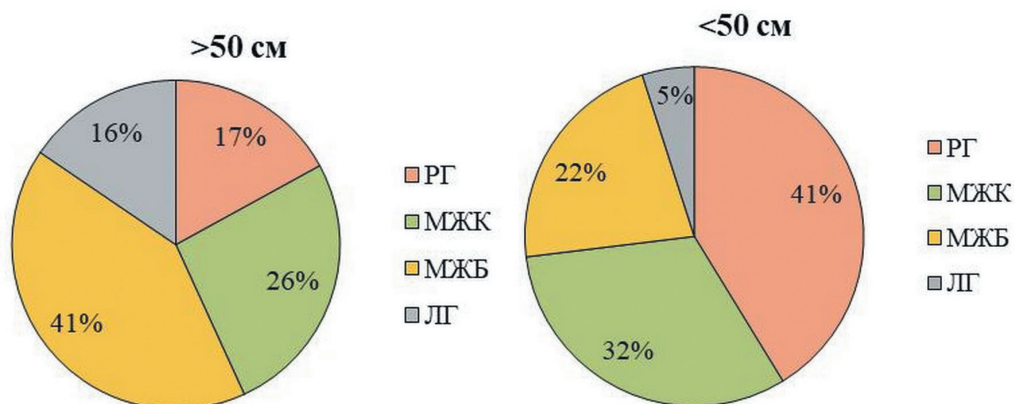


Рис. 6. Соотношение количества предметов морского мусора (%), идентифицированных посредством ручного сбора:

РГ — Русская гавань, МЖК — Мыс Желания Карское, МЖБ — Мыс Желания Баренцево, ЛГ — Ледяная гавань.

Fig. 6. The ratio of the amount of marine litter items (%) identified manually:

RG — Russkaya Harbour, MZH — Cape Zhelaniya (Barents Sea), MZK — Cape Zhelaniya (Kara Sea), LG — Ledyanaya Harbour.

крышки, патроны и мелкие фрагменты пластика. Для ряда предметов определено происхождение по внешним признакам (наклейки, вид продукции): Россия, Норвегия, Великобритания, Польша, Германия, Швеция.

Характерной особенностью распределения морского мусора на арктических побережьях является его аккумуляция в зонах штормовых выбросов, на значительном удалении от линии уреза воды (до 70 м). Это подтверждает несостоятельность подхода некоторых исследователей, ограничивающихся сбором мусора исключительно в 5 м от уреза воды: в активной приливно-отливной зоне, которая, как правило, остается свободной от значительного количества отходов, что также было отмечено в ходе съемок 2023 г. Следует отметить, что в отдельных случаях, как в Русской Гавани, особенности морфологии пляжа могут приводить к концентрированию макромусора в непосредственной близости от уреза воды. Однако такие случаи являются исключениями из выявленной общей закономерности аккумуляции мусора в зоне штормовых выбросов на арктических архипелагах [18].

2. Результаты дешифрирования снимков

Дешифрирование аэрофотоснимков, полученных с БПЛА, позволило провести количественную и качественную оценку загрязнения побережий архипелага Новая Земля дистанционным методом. Анализ зависимости возможностей дешифрирования от высоты съемки показал, что порог обнаружения объектов существенно отличается. При аэрофотосъемке с высоты 20 м обеспечивалось наилучшее разрешение, позволявшее уверенно идентифицировать контрастные и белые

объекты размером 10 см и менее, такие как пластиковые бутылки и их фрагменты. Съемка с высот 40—50 м позволяла распознавать только более крупные объекты (от 40—50 см), к которым относились рыболовные сети, ящики и буи.

Цветовая гамма хорошо различимых предметов мусора с БПЛА в порядке убывания — белый, синий, зеленый, желтый, оранжевый, красный, размер различимых предметов от 25—20 см, при этом значительная часть неидентифицируемых типов предметов мусора является кусочками пластика менее 40—50 см.

Для оценки распределения морского макромусора на побережьях рассчитывалась также его плотность (шт./м²) по данным ручного сбора и дешифрирования аэрофотоснимков. В целом, как и в предыдущие годы исследований [18], плотность морского макромусора выше на баренцевоморской стороне архипелага (рис. 7). По результатам визуального анализа ортофотопланов наибольшее

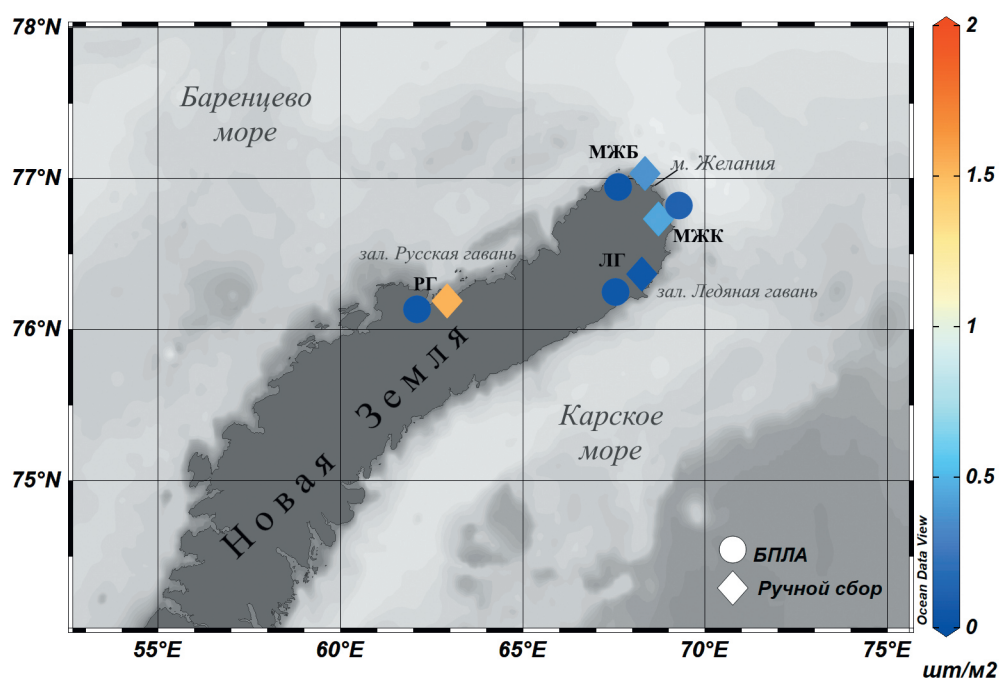


Рис. 7. Количественная оценка плотности распределения морского макромусора (шт./м²), выполненная путем сравнения данных наземного ручного сбора и автоматизированного дешифрирования аэрофотоснимков с беспилотного летательного аппарата (БПЛА).

РГ — Русская гавань, МЖК — Мыс Желания Карское, МЖБ — Мыс Желания Баренцево, ЛГ — Ледяная гавань.

Fig. 7. Quantitative assessment of the distribution density of marine debris (pcs/m²), carried out by comparing data from ground-based manual collection and automated interpretation of aerial photographs from an unmanned aerial vehicle (UAV).

RG — Russkaya Harbour, MZH — Cape Zhelaniya (Barents Sea), MZK — Cape Zhelaniya (Kara Sea), LG — Ledyanaya Harbour.

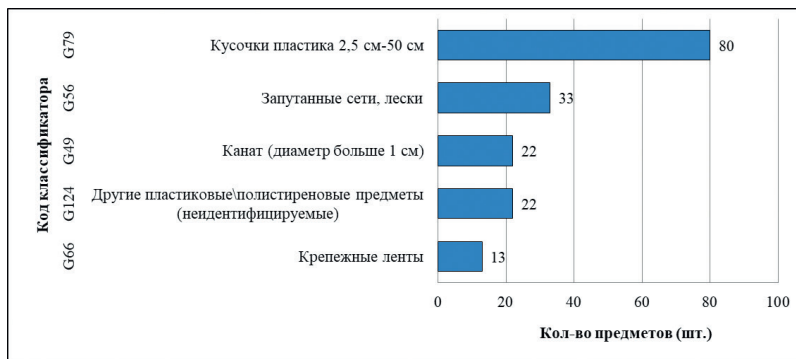


Рис. 8. Наиболее распространенные типы морского макромусора, идентифицированного по результатам аэрофотосъемки с БПЛА.

Fig. 8. The most common types of marine debris identified by aerial photography from UAVs.

количество морского макромусора зафиксировано на участке Мыса Желания со стороны Баренцева моря — 130 шт. Для данного участка характерно приближительное равенство крупной (> 50 см) и мелкой (< 50 см) фракций, т. е. 63 шт. и 67 шт. соответственно, в то время как на участках Русской Гавани и Ледяной Гавани преобладали объекты меньшего размера. Расчет плотности загрязнения также подтвердил, что наиболее высокая нагрузка характерна для Мыса Желания со стороны Баренцева моря — $0,008$ шт/м², а наименьшие значения отмечены в Ледяной Гавани — $0,0001$ шт/м².

Качественный анализ демонстрирует преобладание отходов, связанных с морской хозяйственной деятельностью (судоходство, рыболовство): синтетические канаты, сети, пластиковые бутылки и емкости, а также деревянные и металлические обломки (рис. 8).

Обсуждение результатов

На основании представленной количественной оценки морского макромусора исследуемых побережий установлено общее количество пластиковых предметов, идентифицированных по снимкам с БПЛА и посредством ручного сбора (табл. 2).

Таблица 2

Общее количество предметов, идентифицированных по снимкам с БПЛА и посредством ручного сбора

The total amount of waste identified from UAV images and manually

Размер	БПЛА, шт.				Ручной сбор, шт.			
	РГ	МЖК	МЖБ	ЛГ	РГ	МЖК	МЖБ	ЛГ
> 50 см	16	16	63	2	112	172	272	102
< 50 см	30	50	67	8	631	487	336	76

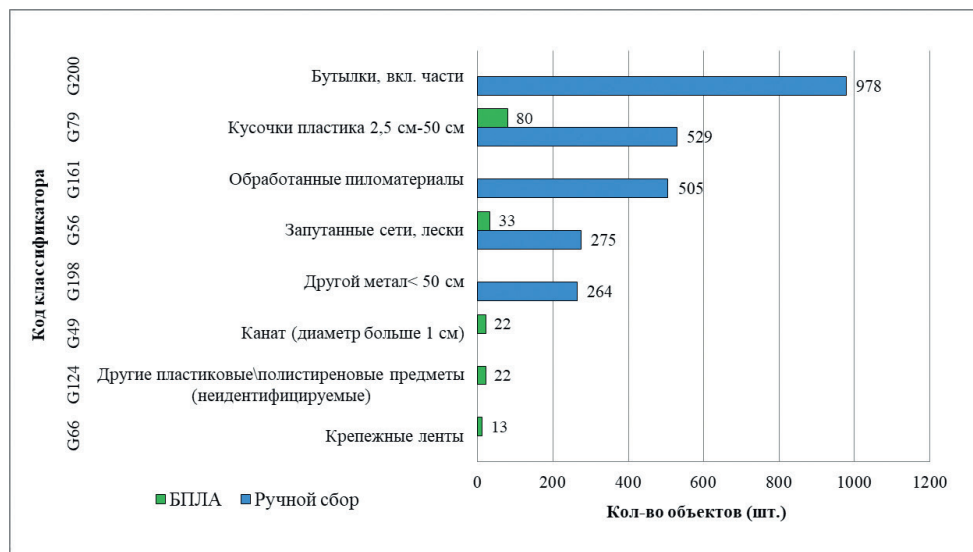


Рис. 9. Типы морского мусора, идентифицированного посредством ручного сбора и методом дешифрирования.

Fig. 9. Types of marine debris identified manually and by photo interpretation.

Посредством качественной оценки определены основные типы предметов, идентифицированных посредством ручного сбора и методом дешифрирования (рис. 9). Согласно результатам дешифрирования снимков БПЛА количество мусора на пляжах Новой Земли значительно отличается от результатов ручного сбора. Для корректного сравнения данных, полученных разными методами, все значения приведены к показателю плотности загрязнения (шт/м²). По данным БПЛА-съемки, на побережье Русской гавани выявлена плотность загрязнения 0,002 шт/м² (46 предметов на участке длиной 770 м), при этом 91 % объектов возможно идентифицировать и классифицировать. На пляжах Мыса Желания со стороны Баренцева моря плотность составила 0,008 шт/м² (130 предметов на 718 м, идентификация 93 % предметов), со стороны Карского моря — 0,005 шт/м² (66 предметов на 720 м, идентификация 94 % предметов). В бухте Витней (Ледяная гавань) зафиксирована минимальная плотность 0,0001 шт/м² (10 предметов на 1339 м, идентификация 50 % предметов).

Таким образом, метод ручного сбора и классификации морского мусора позволяет более детально изучить морфологию объектов, их происхождение и материал, поэтому данным способом идентифицировано значительно большее количество объектов в сравнении с дешифрированием по снимкам с БПЛА, где хорошо различимы только крупные объекты: металлические бочки, цветные пластиковые бутылки, рыбные ящики, рыболовные сети и буи. В то же время именно эти категории предметов являются наиболее крупными и преобладают в количественных массовых характеристиках морского макромусора на побережьях в целом.

Очевидно, в условиях суровых климатических условий и труднодоступности арктических территорий, дистанционный метод дает преимущество с точки зрения понимания общей массы выброшенных морем на берег и накопленных пластиковых отходов, а значит — возможностей его уборки.

Проведенный анализ позволил установить ряд ограничений при дешифрировании ортофотопланов, полученных в результате аэрофотосъемки с БПЛА с целью обнаружения морского мусора. Ключевым фактором стала зависимость чувствительности метода от высоты съемки. Так, с высоты 25—40 м возможна детализация до уровня распознавания форм отдельных бутылок и средних фрагментов, в то время как с высоты 100 м идентификация возможна лишь для крупных, ярко окрашенных объектов сложной формы (ящики, канаты, сети).

Кроме того, можно установить ограничение по минимальному размеру распознаваемых объектов: для четко очерченных предметов (например, бутылок) он составляет около 30 см, для прочих фрагментов — не менее 50 см. При этом существует высокая вероятность ошибок интерпретации, когда белые фрагменты сложно отличить от камней, а пена от волн может быть ложно опознана как мусор, что требует обязательной верификации по серии соседних снимков, а также требует высокой практической квалификации оператора. В этой связи можно говорить о том, что существенным фактором, влияющим на достоверность распознавания, помимо размера, являются спектральные характеристики объектов, такие как цвет и яркость. С высокой долей вероятности идентифицируются предметы с четким геометрическим контуром (бутылки, ведра, ящики) и высокой цветовой контрастностью (ярко-цветные или белые).

Важным ограничением является узкая полоса обзора при низких высотах для достижения требуемой детализации. Например, съемка с высоты 25 м позволяет охватить полосу шириной не более 50 м, что обуславливает необходимость выполнения дополнительных параллельных маршрутов для обследования протяженных участков побережья. Высота 40 м представляет собой оптимальное значение за счет возможности сохранить приемлемую детализацию при одновременном охвате всей береговой полосы в одном пролете.

На основании проведенной серии съёмок с использованием БПЛА можно привести следующие практические рекомендации:

- автоматическая съёмка с использованием полетных планов затруднена в силу динамики береговой линии вследствие приливно-отливных явлений, особенно для низких высот;

- автоматическая съёмка целесообразна при многорядной съемке на низких высотах и на протяженных участках;

- для съемки небольших по протяженности пляжей (до 1 км) рекомендуется применять БПЛА в ручном режиме пилотирования с полетом на минимальной высоте (15—20 м). Такой подход позволяет оперативно адаптироваться к конфигурации береговой линии и обеспечивает оптимальное качество аэрофотоснимков для последующей идентификации морского мусора;

- съемка на высоте 40—50 м и более не позволяет достоверно дешифрировать объекты менее 40—50 см.

Заключение

В рамках проведенных в 2023 г. исследований выполнен количественный и качественный учет морского мусора на ключевых участках побережья архипелага Новая Земля: Русской Гавани, Мысе Желания (включая Карское и Баренцево море) и Ледяной Гавани. Оценка накопления отходов на береговых территориях проведена посредством ручного сбора по международной методике ОСПАР и с помощью аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата дрона DJI Mavic Air 2, которая выполнена на данной территории впервые.

Наибольшее количество морского макромусора обнаружено на Мысе Желания со стороны Баренцева моря, при этом преобладающий тип отходов — пластик, преимущественно рыбохозяйственного происхождения. Проведенное сравнение с данными наземных исследований подтверждает, что визуальный анализ БПЛА-снимков позволяет эффективно распознавать крупные объекты (> 50 см), имеющие наибольшую массу (рыболовные сети, ящики, буи, бочки), но является недостаточно чувствительным методом для учета общего количества предметов, основная часть которого приходится на мелкоразмерные фракции (10—30 см). В то же время съемка с БПЛА позволяет охватить труднодоступные территории, где невозможно провести ручной сбор морского мусора, который является крайне трудо- и времязатратным методом учета макромусора.

Настоящее исследование выявило качественную зависимость эффективности дистанционного обнаружения от размера объекта и протяженности маршрута съемки. Вместе с тем, для количественной оценки «слепых зон» метода БПЛА необходимы дальнейшие исследования, включающие детальный анализ всего массива данных. Такой анализ должен быть направлен на определение доли объектов, остающихся «невидимыми» для аэрофотосъемки из-за малых размеров (менее 10—30 см), низкой цветовой контрастности (полупрозрачные, темные, сливающиеся с природными объектами) или сложной для автоматического распознавания формы.

Таким образом, оба метода являются взаимодополняемыми и их совместное применение целесообразно в качестве инструмента комплексной системы экологического мониторинга для условий Арктики, характеризующихся открытыми побережьями. Напротив, для береговых зон в более южных регионах, где макро-мусор аккумулируется в верхней полосе растительности, эффективность дистанционных методов существенно ограничена, что повышает значимость традиционных наземных обследований.

Разработка алгоритмов для автоматического обнаружения морского макро-мусора на аэрофотоснимках и упрощения аналитического процесса имеет решающее значение для успешного внедрения этих методов. В ходе дальнейших исследований с целью минимизации субъективности распознавания объектов на снимках дешифрирование будет проведено автоматизированным методом с применением алгоритмов машинного обучения.

Список литературы

1. Marine Litter, an analytical overview. United Nations Environment Programme. Nairobi. 2005. 47 p.
2. Frias J. P., Nash R. Microplastics: Finding a consensus on the definition // Marine Pollution Bulletin. 2019. Vol. 138. P. 145—147. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.11.022.

3. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. Reports and Studies. No. 90. 2015. 96 p.
4. Чубаренко И. П., Есюкова Е. Е., Хатмуллина Л. И. и др. Микропластик в морской среде. М.: Научный мир. 2021. 520 с.
5. Onink V., Jongedijk C. E., Hoffman M. J., et al. Global simulations of marine plastic transport show plastic trapping in coastal zones // *Environmental Research Letters*. 2021. Vol. 16 (Iss 6). P. 064053. DOI: 10.1088/1748-9326/abecbd.
6. Haarr M. L., Falk-Andersson J., Fabres J. Global marine litter research 2015—2020: Geographical and methodological trends // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 820. P. 153162. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153162.
7. Isobe A. and Iwasaki S. The fate of missing ocean plastics: Are they just a marine environmental problem? // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 825. P. 153935. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153935.
8. Lavers J. L., Bond A. L. Exceptional and rapid accumulation of anthropogenic debris on one of the world's most remote and pristine islands // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017. Vol. 114. No. 23. P. 6052—6055. DOI: 10.1073/pnas.1619818114.
9. Bergmann M., Collard F., Fabres J. et al. Plastic pollution in the Arctic // *Nature Reviews Earth & Environment*. 2022. Vol. 3. P. 323—337. DOI: 10.1038/s43017-022-00279-8.
10. van Sebillie E., England M. H., Froyland G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters // *Environmental Research Letters*. 2012. Vol. 7. P. 044040. DOI: 10.1088/1748-9326/7/4/044040.
11. Ершова А. А., Ерёмкина Т. Р., Макеева И. Н. и др. Микропластиковое загрязнение морской среды Баренцева и Карского морей в 2019 г. // *Гидрометеорология и экология*. 2022. № 69. С. 691—711. DOI: 10.33933/2713-3001-2022-69-691-711.
12. Gavrilov M. Plastic Pollution and Seabirds in the Russian Arctic, Workshop Report. 2019. Arctic Migratory Birds Initiative. Conservation of Arctic Flora and Fauna. Akureyri, Iceland. 2019. 23 p.
13. Collard F., Ask A. Plastic ingestion by Arctic fauna: A review // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 786. P. 147462. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147462.
14. Vesman A., Moulin E., Egorova A. et al. Marine litter pollution on the Northern Island of the Novaya Zemlya archipelago // *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 150. P. 110671. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.110671.
15. Pogojeva M., Zhdanov I., Berezina A. et al. Distribution of floating marine macro-litter in relation to oceanographic characteristics in the Russian Arctic Seas // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 166. P. 112201. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112201.
16. Parga Martínez K. B., Tekman M. B., Bergmann M. Temporal Trends in Marine Litter at Three Stations of the HAUSGARTEN Observatory in the Arctic Deep Sea // *Frontiers in Marine Science*. 2020. Vol. 7. P. 00321. DOI: 10.3389/fmars.2020.00321
17. Bergmann M., B. Lutz M. B. Tekman et al. Citizen scientists reveal: Marine litter pollutes Arctic beaches and affects wild life // *Marine Pollution Bulletin*. 2017. Vol. 125(1—2). P. 535—540. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.09.055.
18. Ershova A., Vorotnichenko E., Gordeeva S. et al. Beach litter composition, distribution patterns and annual budgets on Novaya Zemlya archipelago, Russian Arctic // *Marine Pollution Bulletin*. 2024. Vol. 204. P. 116517. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116517.
19. Garcia-Garin O., Monleón-Getino T., López-Brosa P. et al. Automatic detection and quantification of floating marine macro-litter in aerial images: Introducing a novel deep learning approach connected to a web application in R // *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 273. P. 116490. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116490.
20. Лучников А. И. Современные тенденции применения БПЛА в исследовании природных сред. Анализ зарубежных публикаций // *Гидрометеорология и экология*. 2025. № 80. С. 530—546. doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-530-546.
21. Litter and Microplastics Monitoring Guidelines. Version 1.0. Arctic Monitoring and Assessment Programme. 2021. 257 p.
22. Technical Subgroup on Marine Litter. Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas. European Union. 2013. 128 p.

23. Ершова А. А., Антонов Е. В., Голубева Е. А. Применение БПЛА для мониторинга морского мусора на побережье архипелага Новая Земля в 2023 г / Морские исследования и образование (MARESEDU-2023): Труды XII Международной научно-практической конференции, Москва, 23—27 октября 2023 года. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2024. С. 562—566.

References

1. Marine Litter, an analytical overview. United Nations Environment Programme. Nairobi, 2005: 47 p.
2. Frias J. P., Nash R. Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*. 2019; (138): (145—147). DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.11.022.
3. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. Reports and Studies. 90. 2015: 96 p.
4. Chubarenko I. P., Esiukova E. E., Khatmullina L. I. et al. *Mikroplastik v morskoy srede = Microplastics in the Marine Environment*. Moscow: Nauchny Mir. 2021: 520: p. (In Russ.).
5. Onink V., Jongedijk C. E., Hoffman M. J. et al. Global simulations of marine plastic transport show plastic trapping in coastal zones. *Environmental Research Letters*. 2021; 16 (6): 064053. DOI: 10.1088/1748-9326/abecbd.
6. Haarr M. L., Falk-Andersson J., Fabres J. Global marine litter research 2015–2020: Geographical and methodological trends. *Science of The Total Environment*. 2022; 820: 153162. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153162.
7. Isobe A., Iwasaki S. The fate of missing ocean plastics: Are they just a marine environmental problem? *Science of The Total Environment*. 2022; 825: 153935. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153935.
8. Lavers J. L., Bond A. L. Exceptional and rapid accumulation of anthropogenic debris on one of the world's most remote and pristine islands. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017; 114 (23): 6052—6055. DOI:10.1073/pnas.1619818114.
9. Bergmann M., Collard F., Fabres J. et al. Plastic pollution in the Arctic. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2022; 3: 323—337. DOI: 10.1038/s43017-022-00279-8.
10. van Sebille E., England M. H., Froyland G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environmental Research Letters*. 2012; 7: 044040. DOI: 10.1088/1748-9326/7/4/044040.
11. Ershova A. A., Eremina T. R., Makeeva I. N., et al. Microplastic contamination of marine environment of the Barents and Kara seas in 2019. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(69): 691—711. DOI: 10.33933/2713-3001-2022-69-691-711. (In Russ.).
12. Gavrilov M. Plastic Pollution and Seabirds in the Russian Arctic, Workshop Report. 2019. Arctic Migratory Birds Initiative. Conservation of Arctic Flora and Fauna. Akureyri, Iceland. 2019: 23 p.
13. Collard F., Ask A. Plastic ingestion by Arctic fauna: A review. *Science of The Total Environment*. 2021; 786: 147462. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147462.
14. Vesman A., Moulin E., Egorova A. et al. Marine litter pollution on the Northern Island of the Novaya Zemlya archipelago. *Marine Pollution Bulletin*. 2020; 150: 110671. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.110671.
15. Pogojeva M., Zhdanov, I., Berezina, A. et al. Distribution of floating marine macro-litter in relation to oceanographic characteristics in the Russian Arctic Seas. *Marine Pollution Bulletin*. 2021; 166: 112201. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112201.
16. Parga Martínez K.B., Tekman M.B., Bergmann M. Temporal Trends in Marine Litter at Three Stations of the HAUSGARTEN Observatory in the Arctic Deep Sea. *Frontiers in Marine Science*. 2020; 7: 00321. DOI: 10.3389/fmars.2020.00321
17. Bergmann M., Lutz B., Tekman M.B. et al. Citizen scientists reveal: Marine litter pollutes Arctic beaches and affects wild life. *Marine Pollution Bulletin*. 2017; 125 (1—2): 535—540. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.09.055.
18. Ershova A., Vorotnichenko E., Gordeeva S. et al. Beach litter composition, distribution patterns and annual budgets on Novaya Zemlya archipelago, Russian Arctic. *Marine Pollution Bulletin*. 2024; 204: 116517. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116517.
19. Garcia-Garin O., Monleón-Getino T., López-Brosa P. et al. Automatic detection and quantification of floating marine macro-litter in aerial images: Introducing a novel deep learning approach

- connected to a web application in R. *Environmental Pollution*. 2021; 273: 116490. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116490.
20. Luchnikov A. I. Current trends in the use of UAVs in the study of natural environments. Analysis of foreign publications. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(80):(530—546). DOI: 10.33933/2713-3001-2025-80-530-546. (In Russ.).
21. Litter and Microplastics Monitoring Guidelines. Version 1.0. Arctic Monitoring and Assessment Programme. 2021: 257.
22. Technical Subgroup on Marine Litter. Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas. European Union. 2013: 128 p.
23. Ershova A. A., Antonov E. V., Golubeva E. A. Application of UAVs for monitoring marine debris on the coast of the Novaya Zemlya archipelago in 2023. *Marine Research and Education (MARE-SEDU-2023): Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference*, Moscow, October 23—27, 2023. Tver: PoliPRESS LLC, 2024. (562—566). (In Russ.).

Информация об авторах

Ершова Александра Александровна, кандидат географических наук, доцент кафедры геоэкологии, природопользования и экологической безопасности, заведующий Лабораторией исследования пластикового загрязнения природной среды ПластикЛаб, Российский государственный гидрометеорологический университет, ershova@rshu.ru.

Голубева Екатерина Андреевна, аспирант кафедры геоэкологии, природопользования и экологической безопасности Российского государственного гидрометеорологического университета, katygolubev@gmail.com.

Антонов Евгений Викторович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник отдела социально-экономической географии, Институт географии РАН, antonov@igras.ru.

Сердюкова Елизавета Александровна, аспирант кафедры геоэкологии Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, serdukovaelizaveta489@gmail.com

Information about authors

Ershova Alexandra. A., PhD (Geogr. Sci.), Associate Professor, Department of Geoecology, Nature Management and Environmental Safety, Head of Laboratory for Plastic Pollution Research PlasticLab, Russian State Hydrometeorological University.

Golubeva Ekaterina A., postgraduate student at the Department of Geoecology, Nature Management and Environmental Safety at the Russian State Hydrometeorological University.

Antonov Evgeniy V., PhD (Geogr. Sci.), Senior Research Fellow, Department of Social and Economic Geography, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences.

Serdyukova Elizaveta A., postgraduate student at the Department of Geoecology at the St. Petersburg Mining University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 04.11.2025

Принята в печать 20.11.2025

The article was received on 04.11.2025

The article was accepted on 20.11.2025

Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 718—727.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(81):718—727.

ЭКОЛОГИЯ. ОБЗОР

Научная статья

УДК [502+551.5]:656

doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-718-727

Применение метода PROMETHEE для комплексной оценки экологических факторов на транспорте

Яна Евгеньевна Бразовская¹, Денис Максимович Авдыш²

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, y.brazovskaya@rshu.ru

² ООО «Агентство морского права»

Аннотация. В статье приводится обзор публикаций по применению метода PROMETHEE для комплексной оценки на транспорте с интеграцией экологических, гидрометеорологических и социально-экономических факторов в автомобильном, железнодорожном и морском секторах и дается оценка эффективности метода для решения задач устойчивого развития транспортных систем в условиях изменяющейся геоэкологической обстановки. Показано постепенное расширение спектра критериев от экономических к экологическим и недостаточную представленность гидрометеорологических факторов, что указывает на перспективы применения метода для климатически адаптированного транспортного планирования.

Ключевые слова: PROMETHEE, многокритериальные решения, транспортные системы, устойчивый транспорт, гидрометеорология.

Для цитирования: Бразовская Я. Е., Авдыш Д. М. Применение метода PROMETHEE для комплексной оценки экологических факторов на транспорте // Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 718—727. doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-718-727.

ECOLOGY. REVIEW

Original article

Application of the PROMETHEE method for a comprehensive assessment of environmental factors in transport

Yana E. Brazovskaya¹, Denis M. Avdysh²

¹ Russian State Hydrometeorological University

² LLC «Maritime Law Agency»

Summary. Traditional single-criterion optimization methods prove inadequate when addressing intricate trade-offs in contemporary transportation planning. This study presents a systematic analysis of

© Бразовская Я. Е., Авдыш Д. М., 2025

the PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations) method application for comprehensive assessment of environmental, hydrometeorological, and socio-economic factors across automotive, railway, and maritime transport sectors. The research methodology encompasses systematic literature review covering 2015—2025 period with analysis of problem types, applied method modifications, and integrated criteria. The study examines the method's theoretical foundation based on pairwise comparisons and outranking flows, investigating hybrid approaches integrating PROMETHEE with complementary methodologies such as Analytic Hierarchy Process (AHP) and fuzzy logic systems to address inherent subjectivity and uncertainty.

Key findings demonstrate remarkable versatility across transportation applications. In automotive sectors, PROMETHEE optimizes logistics center locations considering supplier proximity, cost minimization, and sustainability factors. Urban mobility applications evaluate passenger preferences integrating subjective criteria (comfort, safety) with objective measures (distance, time). Railway applications include infrastructure project evaluation and adaptive reuse of abandoned lines for sustainable development. Maritime applications demonstrate strategic value in port performance evaluation and sustainable shipping initiatives.

Comparative analysis revealed correlation between task complexity and method modification selection (PROMETHEE II, Fuzzy PROMETHEE, AHP-PROMETHEE). The findings show gradual expansion of criteria spectrum from economic to environmental factors and insufficient representation of hydrometeorological factors, indicating prospects for method application in climate-adaptive transport planning.

PROMETHEE's strength lies in handling both quantitative data and qualitative preferences through hybridization with fuzzy logic or AHP methodologies. This addresses complexity and uncertainty in transportation decisions where economic viability must balance environmental sustainability and social impact. The method's transparency provides clear rationales for complex choices, crucial given transportation's significant environmental footprint.

Despite challenges related to parameter subjectivity, PROMETHEE's widespread adoption underscores its unique contribution to sustainable transport development, enabling effective navigation of trade-offs in an increasingly volatile global landscape.

Keywords: PROMETHEE, multi-criteria decisions, transport systems, sustainable transport, hydrometeorology.

For citation: Brazovskaya Y. E., Avdysh D. M. Application of the PROMETHEE method for a comprehensive assessment of environmental factors in transport. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(81):(718—727). doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-718-727. (In Russ.).

Введение

Настоящая работа представляет собой систематический обзор публикаций, направленный на анализ современного состояния применения метода PROMETHEE в транспортных системах. Учитывая малую известность данного метода в гидromетеорологическом сообществе, особое внимание уделяется выявлению возможностей его применения для учета климатических и метеорологических факторов при принятии транспортно-логистических решений. Обзор охватывает три основных транспортных сектора: автомобильный, железнодорожный и морской с систематизацией типов решаемых задач, применяемых модификаций метода и интегрируемых групп критериев, включая экологические и гидрометеорологические параметры.

В основу исследования авторы поставили рассмотрение метода PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations или метод формирования рангов предпочтения для обогащения оценок). Метод разработан Жан-Пьером Брансом в начале 1980 гг. и с тех пор стал популярным для решения сложных задач принятия решений [1]. Фундаментальный принцип метода

заключается в количественном определении предпочтения одной альтернативы над другой для каждого критерия посредством попарных сравнений. Это достигается путем определения функции предпочтения для каждого критерия, которая преобразует отклонение между оценками в степень предпочтения в диапазоне от 0 до 1. Метод предлагает шесть типов функций предпочтения (обычную, U-образную, линейную, уровневую, V-образную и Гауссову), позволяя точно моделировать предпочтения лиц, принимающих решения [2]. Эти функции, наряду с назначенными весами, отражающими относительную важность каждого критерия, составляют основную входную информацию для алгоритма метода PROMETHEE.

Математический аппарат метода PROMETHEE включает расчет двух основных потоков превосходства для каждой альтернативы: положительного потока (Φ^+) и отрицательного потока (Φ^-). Положительный поток (Φ^+) количественно определяет, насколько альтернатива превосходит все другие альтернативы, в то время как отрицательный поток (Φ^-) показывает, в какой степени другие альтернативы превосходят данную альтернативу. Эти потоки обеспечивают частичное ранжирование альтернатив (PROMETHEE I), которое может включать несравнимые варианты, когда альтернативы не могут быть однозначно ранжированы из-за противоречивых предпочтений. Для достижения полного ранжирования PROMETHEE II рассчитывает чистый поток превосходства (Φ), который является разницей между положительным и отрицательным потоками ($\Phi = \Phi^+ - \Phi^-$). Более высокий чистый поток означает лучшую альтернативу. Метод также включает модуль визуализации GAIA (Graphical Analysis for Interactive Aid), который проецирует многомерные данные на двухмерную плоскость, упрощая понимание взаимодействий между критериями и альтернативами и помогая в анализе чувствительности [3]. Расширения, такие как Fuzzy PROMETHEE (Fuzzy PROMETHEE был предложен из-за ограничений классического метода PROMETHEE при решении задач принятия решений в условиях неопределённости), интегрируют теорию нечетких множеств для обработки расплывчатых или неопределенных ответов оценщиков, что особенно полезно в контексте группового принятия решений [4]. Выбор функции предпочтения и весов является критически важным и потенциально субъективным шагом в применении метода PROMETHEE.

Для повышения эффективности метода PROMETHEE его часто используют в сочетании со следующими методами:

- многокритериальный анализ принятия решений (Multi-Criteria Decision Analysis) — метод оценки и приоритизации вариантов с учётом нескольких критериев);

- аналитический иерархический процесс (AHP, Analytic Hierarchy Process) — математический метод многокритериального принятия решений, при котором выбор оптимального варианта происходит из нескольких альтернатив, или исключения и выбора в условиях реальности;

- исключение и выбор в условиях реальности (ELECTRE, Élimination Et Choix Traduisant la Réalité).

Эти методы многокритериального анализа принятия решений возникли в Европе в середине 1960 гг. и используются для выбора лучших действий при

решении основных проблем: выбор, ранжирование и сортировка [5]. Например, интеграция АНР и PROMETHEE применяется для минимизации субъективности исследователя в определении весов критериев и повышения надежности процесса принятия решений [5]. В свою очередь, Fuzzy PROMETHEE разработан для учета неопределенных ответов оценщиков [4].

Актуальность исследования обусловлена несколькими критическими факторами:

- во-первых, традиционные однокритериальные методы оптимизации оказываются неэффективными при решении транспортных задач, где экономическая целесообразность часто противоречит экологической устойчивости, а скорость доставки конфликтует с требованиями безопасности и минимизации воздействия на окружающую среду;

- во-вторых, глобализация цепочек поставок и растущая сложность мультимодальных перевозок требуют инструментов, способных интегрировать количественные показатели (выбросы, затраты, расстояния) с качественными критериями (комфорт, безопасность, социальная приемлемость);

- в-третьих, принятые международные обязательства по декарбонизации транспорта, включая Парижское соглашение и цели Европейского зеленого курса, создают императив для разработки и применения научно обоснованных методов принятия решений, обеспечивающих баланс между экономической эффективностью и экологической ответственностью.

К сожалению, на русском языке практически нет публикаций по возможности использования этого метода для решения комплексных транспортно-экологических задач, поэтому целью данной статьи является обзор иностранных публикаций применения метода PROMETHEE для комплексной оценки его эффективности на транспорте с интеграцией экологических, гидрометеорологических и социально-экономических факторов в автомобильном, железнодорожном и морском секторах, а также для решения задач устойчивого развития транспортных систем в условиях изменяющейся геоэкологической обстановки.

Методика исследования

Настоящее исследование основано на систематическом обзоре литературы (systematic literature review), направленной на анализ применения метода PROMETHEE в транспортных системах. Необходимость такого подхода обусловлена необходимостью структурированного обобщения разрозненных исследований из различных транспортных секторов для выявления общих закономерностей, тенденций и перспектив применения метода в гидрометеорологическом контексте.

Критериями включения публикаций в обзор являлись: применение метода PROMETHEE или его гибридных модификаций (Fuzzy PROMETHEE, АНР-PROMETHEE) в транспортных системах; наличие экологических или гидрометеорологических критериев оценки; публикация в рецензируемых научных изданиях; доступность полного текста на английском или русском языках. Исключались

публикации, посвященные исключительно математическим аспектам метода без практических приложений в транспорте.

Анализ отобранной литературы проводился по следующим категориям: сектор транспорта (автомобильный, железнодорожный, морской), тип решаемой задачи (выбор маршрута, оценка эффективности, размещение объектов, оценка устойчивости), применяемая модификация метода (классический PROMETHEE I/II, гибридные подходы), учитываемые группы критериев (экономические, экологические, социальные, гидрометеорологические). Особое внимание уделялось исследованиям, интегрирующим климатические и метеорологические факторы в процесс принятия решений, учитывая малую известность метода PROMETHEE в гидрометеорологическом сообществе.

Систематический обзор применения метода PROMETHEE в транспортных секторах

В *автомобильном секторе* PROMETHEE широко используется для решения логистических задач и городского планирования. Значительная область применения включает выбор местоположений для логистических и распределительных центров. В исследовании [6] применен метод PROMETHEE в сочетании с АНР в целях решения проблемы определения подходящих мест для логистических центров и минимизации затрат. При этом использовались критерии близости к поставщикам, минимизации затрат и устойчивость. Их подход способствовал стратегическому планированию размещения инфраструктуры и минимизации затрат в автомобильной промышленности, где поставки материалов составляют значительную часть затрат.

Еще одно важное применение метода заключается в планировании городской мобильности и выборе вида общественного транспорта. Л. Убахман и С. Сабольч использовали модели Fuzzy PROMETHEE для оценки предпочтений пассажиров в отношении различных видов транспорта, интегрируя как субъективные (например, комфорт, безопасность), так и объективные (например, расстояние, время) критерии [7]. Применение PROMETHEE с нечеткой логикой в приложениях автомобильного транспорта напрямую учитывает присущую неопределенность и субъективность человеческих предпочтений и качественных критериев, что позволяет количественно оценивать расплывчатые ответы, делая их пригодными для многокритериального анализа, что особенно ценно в условиях, где восприятие комфорта или безопасности играет ключевую роль.

Применение PROMETHEE в автомобильном транспорте демонстрирует стратегический сдвиг в сторону устойчивости, обусловленный как экономическим, так и экологическим давлением. Использование метода может проявляться в оптимизации логистических сетей с учетом затрат и устойчивости, в планировании городской мобильности и может стать прямым ответом на значительную экологическую нагрузку, создаваемую автомобильным сектором.

Статистические данные последних лет подчеркивают значительную роль и воздействие автомобильного транспорта на окружающую среду. В 2024 г. общий

объем автомобильных грузоперевозок в ЕС составил более 13,1 млрд тонн и 1867 млрд тонно-километров, при этом на Германию, Францию, Испанию, Польшу и Италию приходилось почти две трети от общего тоннажа [8]. Автомобильный транспорт остается крупнейшим источником выбросов парниковых газов (ПГ) в транспортном секторе, составляя в ЕС 73,2 % выбросов ПГ от транспорта в 2022 г. и 21,1 % от всех выбросов ПГ в ЕС-27 за тот же год [9]. Несмотря на резкое снижение выбросов в 2020 г. из-за пандемии COVID-19, в 2021 г. и 2022 г. наблюдался выброс, достигнув примерно 1044 Мт CO₂-экв. в 2022 г. [9]. Тяжелые грузовые автомобили, составляющие менее 2 % от общего автопарка, непропорционально сильно способствуют выбросам, составляя 23 % от общего объема выбросов CO₂ автомобильного транспорта в ЕС в 2022 г. [10]. Более 50 % от общих внешних издержек грузовых перевозок в ЕС-28 приходится на автомобильный транспорт [10]. Представленные данные подчеркивают острую необходимость в эффективных инструментах принятия решений для управления устойчивыми практиками и политическими интервенциями в секторе автомобильного транспорта.

В *железнодорожном секторе* метод PROMETHEE предлагает возможности для оценки инфраструктурных проектов, оптимизации мультимодальных операций и инициатив устойчивого развития. Например, Делли и Лантери исследовали возможность использования метода PROMETHEE к оценке адаптивного повторного использования заброшенных железнодорожных линий [11]. Их исследование продемонстрировало способность метода PROMETHEE к преобразованию заброшенной железнодорожной инфраструктуры в устойчивые общественные активы, демонстрируя полезность в городской регенерации и «зеленом» развитии, что также подчеркивает роль метода не только в транспортных решениях, но и в более широких решениях по землепользованию и городскому планированию, использующих транспортную инфраструктуру на благо общества.

Кроме того, метод PROMETHEE играет важную роль в оценке эффективности мультимодальных перевозок при сравнении различных видов перевозок. Методология оценки эффективности мультимодальных перевозок, включая контейнерные и комбинированные железнодорожно-автомобильные перевозки, с применением метода PROMETHEE для ранжирования вариантов на основе количественных и качественных критериев, была проверена Стойловой на маршрутах в Болгарии, которая продемонстрировала полезность в выборе оптимальных транспортных технологий [12]. Способность метода обрабатывать множество критериев делает его подходящим для сложного железнодорожного планирования, в том числе для выбора материалов и методов строительства инфраструктуры.

Несмотря на экологические преимущества железнодорожного транспорта, применение метода PROMETHEE в железнодорожных перевозках имеет решающее значение для преодоления операционных сложностей и внешних сбоев. Хотя статистические данные показывают экологические преимущества железных дорог, они также указывают на снижение объемов железнодорожных грузоперевозок в 2023 г. из-за ценовых скачков и замедления экономики [13]. Данное противоречие между присущими экологическими преимуществами и реальными

эксплуатационными проблемами подчеркивает необходимость систем поддержки принятия решений. Использование метода PROMETHEE для оценки эффективности железнодорожных перевозок напрямую решает эти сложности, позволяя лицам, принимающим решения, одновременно взвешивать экономические факторы, операционную осуществимость и экологические преимущества, делая железнодорожный транспорт более конкурентоспособным и устойчивым к внешним факторам.

Последние статистические данные по железнодорожному транспорту свидетельствуют о его растущей важности и экологических преимуществах. Грузовые железные дороги в среднем в три-четыре раза более топливоэффективны, чем грузовики, а перевод тонны груза с автомобильного на железнодорожный транспорт может сократить выбросы парниковых газов на 75 % [14]. Хотя железнодорожный транспорт считается экологически чистым, его воздействие включает шум, выбросы от дизельных операций и фрагментацию среды обитания, которые решаются технологическими и нормативными мерами. Применение метода PROMETHEE поддерживает стратегический сдвиг к более устойчивым и эффективным железнодорожным операциям, особенно в комбинированной логистике.

Относительно морского сектора следует отметить, что он активно использует метод PROMETHEE для стратегического принятия решений в областях устойчивости, безопасности и операционной эффективности. Метод PROMETHEE, согласно исследованию Мадукве и Оке, поддерживает инициативы по устойчивому судоходству и управлению флотом, помогая в выборе оптимальных стратегий для снижения воздействия на окружающую среду и повышения операционной устойчивости [15]. Метод PROMETHEE также применяется для оценки эффективности портов. Джафари и Эсмайлдуст применили интегрированный подход АНР-PROMETHEE для оценки иранских портов, включив измерение «Суверенитета» наряду с традиционными показателями Сбалансированной системы, исследование приоритезировало порты Шахид Раджаи, Имам Хомейни и Бушер, демонстрируя способность метода предоставлять комплексную основу для управления портами [16].

Другой значительной областью применения метода является оценка *морских районов* для туризма. Интегрированный подход АНР-PROMETHEE применялся Л. Бутовски для оценки привлекательности европейских прибрежных районов для парусного спорта по критериям безопасности, морских условий, туристической привлекательности и коммерческих предложений. Результаты показали наибольшую привлекательность Центрального Средиземноморья при расположении на последнем месте Черного моря, предоставив ценные сведения для развития направлений [17].

Мировая морская торговля, на долю которой приходится около 80 % объема международной торговли, в 2023 г. выросла на 2,4 %, достигнув 12,3 миллиарда тонн, с прогнозами дальнейшего роста до 2029 г. [18]. Однако на рост торговли существенное значение оказывают и политические решения. Так, сложная ситуация в Красном море в результате атак йеменских повстанцев-хуситов (шиитское движение «Ансар Алла»), связанных с боевыми действиями Израиля и сектора

Газа, стала причиной для некоторых судоходных компаний приостановить транзит грузов через Суэцкий канал и выбора иных более длинных маршрутов [19]. Изменение маршрутов приводит к удорожанию перевозок в связи с увеличением расхода топлива и росту выбросов. Фрахтовые ставки резко выросли в 2024 году, при этом Шанхайский контейнерный фрахтовый индекс (SCFI) более чем удвоился к середине 2024 г. по сравнению с концом 2023 г., что обусловлено увеличением расстояний доставки и ростом операционных расходов [18].

С экологической точки зрения, *судоходство* ежегодно вносит примерно 3 % в мировые выбросы парниковых газов, что сопоставимо с промышленно развитыми странами, такими как Япония или Германия. Медленное обновление мирового флота в сочетании с высокими затратами на декарбонизацию и неопределенностью в отношении будущих видов топлива также создает серьезные проблемы для усилий по сокращению выбросов [20]. Применение метода PROMETHEE в морском транспорте может иметь существенное значение для принятия обоснованных решений, которые балансируют экономическую жизнеспособность с экологической ответственностью и операционной устойчивостью в нестабильном глобальном ландшафте.

Заключение

Проведенный обзор публикаций позволяет выделить общие закономерности и специфические особенности применения метода PROMETHEE в рассмотренных транспортных секторах. Так, автомобильный сектор преимущественно использует гибридные подходы ANP-PROMETHEE и Fuzzy PROMETHEE для решения задач размещения объектов и городского планирования, что обусловлено высокой степенью неопределенности и необходимостью учета субъективных предпочтений пользователей. Железнодорожный сектор характеризуется применением классических модификаций PROMETHEE I/II для оценки инфраструктурных проектов и мультимодальных перевозок, где доминируют количественные критерии эффективности. Морской сектор демонстрирует наибольшее разнообразие применений: от оценки эффективности портов до анализа туристической привлекательности акваторий.

Анализ учитываемых критериев выявляет постепенное расширение спектра оцениваемых факторов. Если в ранних исследованиях (2015—2018 гг.) доминировали традиционные экономические критерии (стоимость, время доставки, расстояние), то в последнее время (2020—2025 гг.) наблюдается системная интеграция экологических показателей (выбросы парниковых газов, энергоэффективность, воздействие на экосистемы) и социальных факторов (безопасность, комфорт, общественная приемлемость). Особенно значимым является появление в морских исследованиях гидрометеорологических критериев, включающих ледовую обстановку, волнение моря, экстремальные погодные условия, что открывает перспективы для более широкого применения метода в гидрометеорологическом планировании.

Выявлена корреляция между сложностью решаемой задачи и применяемой модификацией метода. Задачи с преимущественно количественными критериями

(выбор маршрута, оптимизация расстояний) эффективно решаются классическим методом PROMETHEE II. Задачи, включающие качественные оценки и субъективные предпочтения (городская мобильность, туристическая привлекательность), требуют применения Fuzzy PROMETHEE для корректной обработки лингвистических переменных. Многокритериальные задачи с иерархической структурой критериев (размещение логистических центров, оценка портов) наиболее эффективно решаются гибридным подходом АНР-PROMETHEE, где АНР обеспечивает определение весов на основе парных сравнений, а PROMETHEE — окончательное ранжирование альтернатив.

Важным результатом обзора является выявление недостаточного использования гидрометеорологических факторов в существующих исследованиях. Из 12 рассмотренных работ только 2 явно включали метеорологические параметры (исследование Л. Бутовски по оценке морских районов для парусного спорта и работа автора по арктическому судоходству). Это указывает на существенный потенциал расширения применения метода PROMETHEE для задач транспортного планирования с учетом климатических изменений, экстремальных погодных явлений и сезонной изменчивости условий эксплуатации транспортной инфраструктуры.

References

1. Brans J.-P., De Smet Y. PROMETHEE Methods. *International Series in Operations Research & Management Science*. 2016; 187—219. doi: 10.1007/978-1-4939-3094-4_6.
2. Taherdoost H., Madanchian M. Using PROMETHEE Method for Multi-Criteria Decision Making: Applications and Procedures. *Iris Journal of Economics and Business Management*. 2023; 1(1):IJEEM. MS.ID.000502.
3. De Smet Y., Lidouh K. An Introduction to Multicriteria Decision Aid: The PROMETHEE and GAIA Methods. Business Intelligence. eBISS 2012. Lecture Notes in Business Information Processing. Berlin, Heidelberg: Springer. 2013;(138):1—22. doi: 10.1007/978-3-642-36318-4_7.
4. He D., Dong H. Supply Chain Quality Performance Evaluation Model Based on Intuitionistic Fuzzy PROMETHEE. *E3S Web of Conferences*. 2020; 214:03036. doi: 10.1051/e3sconf/202021403036.
5. Akmaludin A., Suriyanto A., Iriadi N., Widiyanto K. Comparison of Smartphone Technology using AHP, ELECTRE, and PROMETHEE Methods. *Sinkron*. 2024; 8(2): 734–747. doi: 10.33395/sinkron.v8i2.13085.
6. Fabry J., Zapletal F., Machacova T. Location selection for logistics centre using PROMETHEE method. *Acta logistica*. 2024; 11(3): 409—419. doi: 10.22306/al.v11i3.526.
7. Oubahman L., Duleba S. Fuzzy PROMETHEE model for public transport mode choice analysis. *Evolving Systems*. 2023; (15):1—18. doi: 10.1007/s12530-023-09490-4.
8. Road freight transport statistics [Electronic resource]: data as of June 2025 / Eurostat // Statistics Explained. [B. M.]. 2025. 14 p. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/9217.pdf>.
9. European Environment Agency. Climate [Electronic resource]. – Published on Oct 10, 2024. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/sustainability-of-europes-mobility-systems/climate>.
10. Decarbonization of automobile cargo transportation [Electronic resource]: joint statement / Chassan S., Lopez A., Sosse A., et al. Franco-German Council of Economic Experts.
11. 2025. March. 18p. URL: https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/Publikationen/FGCEE/CAE_FGCEE_Joint_statement_250320.pdf.
12. Della Spina L., Lanteri C. A. A Collaborative Multi-Criteria Decision-Making Framework for the Adaptive Reuse Design of Disused Railways. *Land*. 2024; (13):851. doi: 10.3390/land13060851.

13. Stoilova S. Evaluation efficiency of intermodal transport using multi-criteria analysis. Engineering for Rural Development: Proceedings of the 17th International Scientific Conference, Jelgava., 23—25 May 2018. Jelgava, 2018: 2030—2039. doi: 10.22616/ERDev2018.17.N246. Available at: <https://www.iitf.lbtu.lv/conference/proceedings2018/Papers/N246.pdf> (: 11.08.2025).
14. The International Union of Railways, the International Union of Combined Rail and Road Transport Companies. Report on combined transport in Europe for 2024 / comp. SCI Verkehr GmbH. Paris; Brussels, 2024: 124 p. URL: https://uic.org/IMG/pdf/uic_uirr_report_2024-2.pdf.
15. Association of American Railroads Freight Railroads & Climate Change Report. March 2021 [Electronic resource] URL: <https://www.aslrra.org/environmental-impact/>.
16. Maduekwe V. C., Oke S.A. An Implementation of A Combined DEA-PROMETHEE Method for The Hull of A Ship Application. *International Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*. 2021; 3(1): 43—57. — DOI: 10.24002/ijieem.v3i1.4437.
17. Jafari H., Esmaeildoust M. Integrating the Balanced Scorecard and PROMETHEE Methods for Sea-ports Performance Evaluation. *American Journal of Marine Science*. 2013; 1(1): 38—43.
18. Butowski L. An integrated AHP and PROMETHEE approach to the evaluation of the attractiveness of European maritime areas for sailing tourism. *Moravian Geographical Reports*. 2018; 26(2):135—148. doi: 10.2478/mgr-2018-0011.
19. Brazovskaya Ya. E. Arkticheskoe sudokhodstvo: uchebnoe posobie = Arctic shipping: textbook. Moscow: MORKNIGA, 2025: 328 p. (In Russ.).
20. United Nations Conference on Trade and Development. Review of Maritime Transport. Navigating through strategic maritime corridors. Overview [Electronic resource] / United Nations. Geneva, 2024. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024overview_ru.pdf.
21. Li W., Hu Z. Pathways in the governance of shipping decarbonization from perspective of balancing the conflicting interests. *Frontiers in Marine Science*. 2024; 11: 1479528. doi: 10.3389/fmars.2024.1479528.

Информация об авторах

Бразовская Яна Евгеньевна, помощник ректора по вопросам Арктики, Российский государственный гидрометеорологический университет, y.brazovskaya@rshu.ru.

Адыш Денис Максимович, ООО «Агентство морского права», юрист, avdysh.denis@mail.ru.

Information about authors

Brazovskaya Yana E., Assistant rector for Arctic affairs of Russian state hydrometeorological university

Avdysh Denis M., LLC «Maritime Law Agency», lawyer.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 14.08.2025

Принята к печати после доработки 23.11.2025

The article was received on 14.08.2025

The article was accepted after revision on 23.11.2025

ХРОНИКА**CHRONICLE**

УДК 378.4(09)

РГГМУ — 95 лет

*Мы в ответе с тобой, чтоб через тысячу лет
От морозного сна просыпалась весною природа.
И пока над Невой, как прежде, стоит Гидромет —
Над планетою нашей хорошая будет погода.*

Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ) — единственный в мире вуз, готовящий специалистов в области наук об атмосфере, океане и водах суши, и имеющий длительную и славную историю. Университет, основанный в 1930 г., вот уже 95 лет служит делу воспитания квалифицированных научных кадров не только для России, но и для многих зарубежных стран. В 1930 г. небольшое геофизическое отделение Московского государственного университета (МГУ) превратилось в Московский гидрометеорологический институт (МГМИ). В начале своего развития он состоял всего из двух небольших факультетов — метеорологического и гидрологического. В нем начинали деятельность многие преподаватели, ставшие впоследствии гордостью советской науки. Это академики М. Л. Лаврентьев, Н. Е. Кочин, В. В. Шулейкин и М. В. Келдыш — будущий Президент АН СССР с 1961 г. по 1975 г., под непосредственным руководством которого началось освоение космического пространства в нашей стране.

В начале Великой Отечественной войны МГМИ стал Высшим военным гидрометеорологическим институтом Красной армии (ВВГМИ КА), который был эвакуирован в ноябре 1941 г. в Ленинабад Таджикской ССР. Весной 1943 г. институт в полном составе возвратился в Москву и продолжил занятия в своих родных зданиях. Однако продолжались они недолго, чуть более года. В ноябре 1944 г. произошел переезд института в Ленинград, который в мирное время стал главным вузом по подготовке гидрометеорологов в нашей стране — Ленинградским гидрометеорологическим институтом (ЛГМИ). Со временем он превратился в РГГМУ, являющийся региональным метеорологическим учебным центром Всемирной метеорологической организации (ВМО).

В настоящее время РГГМУ активно развивается и готовит специалистов по мониторингу, изучению физических процессов и прогнозу состояния всех сфер постоянно изменяющейся природной среды. Увеличение числа факультетов Университета и количества обучающихся в нем студентов свидетельствует о непрерывном расширении круга задач, которые общество ставит перед гидрометеорологами. Жизнь давно доказала, что с ростом научно-технического прогресса наша зависимость от стихийных явлений не уменьшается, а возрастает. Действительно, в условиях современного глобального потепления из-за разбалансированности

климатической системы резко выросло число опасных гидрометеорологических явлений. Число таких явлений, наносящих значительный экономический ущерб, за последние 20 лет на территории России увеличилось более, чем в вдвое. К последствиям стихийных явлений добавляются результаты антропогенного воздействия на природные процессы, далеко не всегда позитивные. Все это также требует детального изучения, дальнейшей разработки методов прогноза стихийных явлений и способов защиты от них, выработки рекомендаций по снижению антропогенной нагрузки на природу. Именно в этих направлениях ведется комплексная подготовка специалистов в Университете. И нет сомнений в том, что выпускники РГГМУ способны внести свой вклад в решение основной глобальной задачи — обеспечения устойчивого развития человеческого общества.

РГГМУ остается единственным высшим учебным заведением широкого гидрометеорологического профиля в России. В его составе 4 института и 4 факультета, несколько научных центров, филиал в Туапсе, уникальная научная библиотека, военный учебный центр, база отдыха и учебные базы в д. Даймище и на о. Валаам. В вузе ежегодно обучаются на всех отделениях 5500 российских и зарубежных студентов, аспирантов и докторантов. Учебный процесс обеспечивают свыше 250 преподавателей, в том числе 40 профессоров и докторов наук.

17 сентября 2025 г. в стенах исторического парка «Россия — моя история» состоялось торжественное мероприятие по случаю 95-летия со дня основания



Рис. 1. Зал во время гимна РГГМУ.

Российского государственного гидрометеорологического университета. В фойе исторического парка была обустроена фотозона, открытая студия, размещены цифровые панели, отражающие историю и основные достижения институтов и факультетов, организована выставка работ профессорско-преподавательского состава и обучающихся кафедры декоративно-прикладного искусства и реставрации живописи, также любой желающий мог посетить выставку Правительства Санкт-Петербурга «Мой Петербург».

Торжественную часть открывали почетные гости:

Максимов Андрей Станиславович — Председатель Комитета по науке и высшей школе;

Кобицкий Дмитрий Аркадьевич — Генеральный секретарь, руководитель Секретариата Совета Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств;

Муратова Надежда Анатольевна — Заместитель начальника Департамента Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды по Северо-Западному федеральному округу;

Горшечников Андрей Алексеевич — Депутат Законодательного Собрания Санкт-Петербурга VII созыва, Заместитель председателя постоянной комиссии по экологии и природопользованию, член постоянной комиссии по молодежной политике, делам общественных объединений и цифровизации;



Рис. 2. Выступает Председатель Комитета по науке и высшей школе Андрей Станиславович Максимов.

Соловейчик Кирилл Александрович — Председатель Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности;

Самусевич Андрей Владимирович — заместитель Председателя Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности;

Капитанов Олег Александрович — председатель Комитета по международным отношениям и реализации миграционной политики в Санкт-Петербурге;

Серов Константин Николаевич — глава Администрации Фрунзенского района Санкт-Петербурга;

Рожков Александр Анатольевич — заместитель главы Администрации Красногвардейского района Санкт-Петербурга;

Николаев Сергей Сергеевич — начальник управления Арктики Комитета по внешним связям;

Широков Герман Германович — советник Губернатора Санкт-Петербурга;

Протоиерей Андрей — Санкт-Петербургская митрополия Русской Православной Церкви.

Коллектив РГГМУ был награжден:

— Почетной грамотой Министерства науки и высшего образования Российской Федерации;



Рис. 3. Выступает ректор РГГМУ Валерий Леонидович Михеев.

- Почетной грамотой Губернатора Санкт-Петербурга;
- Почетной грамотой Межпарламентской Ассамблеи государств — участников Содружества Независимых Государств;
- Почетной грамотой Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности;
- Благодарностью Комитета Санкт-Петербурга по делам Арктики;
- Почетной грамотой Национального исследовательского Курчатовского центра «Курчатовский институт».

Ректор РГГМУ Михеев В. Л. был награжден медалью Министерства науки и высшего образования «За безупречный труд и отличие», Почетной грамотой Губернатора Санкт-Петербурга, Почетной грамотой Комитета Санкт-Петербурга по делам Арктики, Почетной грамотой Комитета по межнациональным отношениям и реализации миграционной политики в Санкт-Петербурге.

Почетные гости вручили работникам РГГМУ Почетные грамоты, благодарственные письма, награды и медали за многолетний добросовестный труд и по случаю празднования 95-летия со дня основания ФГБОУ ВО «РГГМУ».

В продолжении мероприятия прошел торжественный концерт, основной тематикой которого было строительство университета: от момента основания через веки военных лет до современной истории и развития уникального университета в области гидрометеорологии.



Рис. 4. Старейшие сотрудники университета.



Рис. 5. Концерт студентов университета.

УДК 001(092)

Отто Юльевич Шмидт — человек-символ

Алла Олеговна Волгушева

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия, Volgusheva_irbis@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена члену-корреспонденту, академику АН УССР, математику, геофизику, человеку-символу эпохи. Уделяется внимание его личностным качествам, научной карьере, экспедициям, в которых он участвовал и которыми руководил. Подчеркивается необходимость дальнейшего изучения его наследия.

Ключевые слова: Отто Юльевич Шмидт, математик, геофизик, Северный морской путь, главный редактор Большой Советской энциклопедии, Челюскинская эпопея.

Otto Yulievich Schmidt — a symbolic man

Alla O. Volgusheva

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

Введение

Отто Юльевич Шмидт — личность многогранная: математик и геофизик, географ и альпинист, психоаналитик и политик, исследователь и вице-президент АН СССР. Он сделал ряд значимых открытий, ему принадлежит космогоническая гипотеза, также он внес вклад в развитие просвещения и культуры. О О. Ю. Шмидте написано несколько монографий [1—9], большое количество научных статей, а его научные труды составляют четыре тома.

Начало жизненного пути

Отто Юльевич Шмидт родился 18 (30) сентября в г. Могилеве. Родители — выходцы из прибалтийских крестьян. В семье говорили на русском, латышском и немецком языках, что в дальнейшем очень помогло будущему ученому в изучении иностранных языков.

Его семья была небогатой, поэтому на семейном совете было принято решение, что из 5 детей гимназическое образование должен получить Отто, который был на редкость одаренным мальчиком, отчего его сразу приняли во второй класс гимназии, а закончил он ее — с золотой медалью.

Основные вехи научной и организаторской работы

Высшее образование О. Ю. Шмидт получил в Киевском университете на физико-математическом факультете (1909—1913 гг.). В самом начале он имел от родителей 100 рублей единовременно, все остальное время рассчитывал только на свои силы, сюда входила и оплата учебы и расходы на все необходимое. Он



Рис. 1. Отто Юльевич Шмидт в молодые годы.

подрабатывал репетиторством и умение зарабатывать укрепляло его веру в свои силы. Отто Юльевич Шмидт с юности ставил цели, умел планировать и достигать намеченное.

Обучаясь на первом курсе, он стал активным участником семинара по алгебре и теории чисел профессора Д. А. Граве. Научной деятельностью он начал заниматься во время учебы, а к окончанию университета был автором уже трех печатных работ по математике. В 22 года уже была написана книга «Абстрактная теория групп», ставшая наиболее читаемой среди изучающих математические дисциплины в советское время, да и в настоящее время она не потеряла своей актуальности.

После окончания учебы талантливого выпускника О. Ю. Шмидта оставили в стенах *Alma mater*, где он начал подготовку к получению профессорского звания, ему начислили стипендию, но началась Первая мировая война, и университет эвакуировали в Саратов, где О. Ю. Шмидт готовился и сдавал магистерские экзамены.

После реэвакуации Университета в Киев О. Ю. Шмидт стал приват-доцентом, ему дали возможность не только проводить практические занятия по математическим дисциплинам, но и читать лекции по математике.

Вместе с научной работой О. Ю. Шмидт раскрылся как прекрасный организатор:

— В 1915 г., в период эвакуации Университета в Саратов, его избрали председателем общества преподавателей киевских высших учебных заведений.

— В 1916 г. он участвовал в организации и управлении университетским кооперативом.

— В 1917 г. стал заместителем заведующего отделом карточной системы при продовольственной части Киевской городской управы, при этом в подчинении

у такого молодого человека было 150 служащих. Удивительно то, что, проработав на этой должности всего три с половиной месяца, он стал незаменимым, что заставило заведующего отделом, написать ему письмо, в котором он отметил выдающиеся способности, энергию, преданность общественной деятельности, а также его сердечные качества [из архива Российской академии наук].

— После февральской революции он возглавил совет младших преподавателей, который провел огромную работу по восстановлению мирной коммуникации между профессурой и студенчеством, поскольку в период самой революции возникли разногласия, беспорядки и недопонимание. [6, с. 34].

— В период военного коммунизма участвовал в работе Центральной комиссии по улучшению быта ученых.

— Во время НЭПа был членом Социалистической (с 1924 г. Коммунистической) академии общественных наук. Шмидт считал, что существует связь между естественными науками и философией, а в академии ему представилась возможность изучать проблемы естествознания с точки зрения диалектического материализма.

— В период Сталинской модернизации в 1933 г. был избран членом-корреспондентом Академии Наук СССР, в 1934 г. — почетным членом Института математики Академии наук Украины и через месяц стал его академиком, в 1939 г. — первый вице-президентом АН СССР.

— Во время Великой Отечественной войны являлся уполномоченным Совета по эвакуации АН СССР, которую перевели в Казань, а после реэвакуации работал в бюро Отделения физико-математических наук, возглавлял Геофизический институт, был членом Комиссии по физическим методам разведки полезных ископаемых, принимал участие в Экспертной комиссии по выборам в Академию наук [из архива Российской академии наук].

Государственная служба: Петроград-Москва

В 1917 г. О. Ю. Шмидт переехал в Петроград, чтобы участвовать во Всероссийском съезде по делам высшей школы. По его словам, съезд был причиной, целью же было желание работать в министерстве продовольствия.

Оставаясь приват-доцентом Киевского университета, в Петрограде он стал директором департамента по заведованию распределению тканей в России в обмен на хлеб [6, с. 39]. После Октября 1917 г. он стал начальником Управления по продуктообмену, собирая сведения по регионам для принятия решений.

При переезде Совнаркома из Петрограда в Москву О. Ю. Шмидт также переехал в новую столицу. Не вдаваясь в подробности его работы в государственных органах, следует отметить, что, обладая критическим мышлением как истинный ученый, он ясно понимал противоречия теории и практики в большевистской политике. Попытки донести до руководства свою позицию оказались тщетными, поэтому он принял решение перейти в Наркомат финансов Совнаркома в 1920 г., где он возглавил налоговое управление, а в 1921 г. встал во главе Института экономических исследований в системе Народного комиссариата финансов (Наркомфина),

работая по специальности и осуществляя исследования экономической и финансовой ситуации в государстве.

Следующим этапом его деятельности была работа заместителем главы Главного комитета профессионально-технического образования (Главпрофобр), где занимались тем, что разрабатывали модели подготовки квалифицированной рабочей силы, поскольку революционные события и потери в Гражданской войне привели к определенному кадровому голоду.

Кроме того, О. Ю. Шмидт стал членом коллегии Народного комиссариата просвещения (Наркомпрос), который контролировал культурно-гуманитарную сферу. Здесь у него также возникли разногласия, а его оппонентами на этот раз стали Н. К. Крупская и сам нарком просвещения А. В. Луначарский. В это время высказывать свое мнение было еще возможно и О. Ю. Шмидт даже выступил в 1921 г. на партийном совещании с докладами: «О высшей школе» и «О задачах профессионального образования», которые были полностью раскритикованы как В. И. Лениным, так и Н. К. Крупской. О. Ю. Шмидт был против политехнического образования и настаивал на монотехническом [11].

Сохраняя за собой членство в коллегии Наркомфина, О. Ю. Шмидт возглавил Госиздат. В период с 1920 г. по 1924 г. тиражи Госиздата увеличились в десять раз, хотя техническая база была крайне изношенной и катастрофически не хватало бумаги. По инициативе И. В. Сталина он был освобожден от занимаемой должности, поскольку Госиздат публиковал работы Л. Троцкого.

Более успешной явилась его работа в качестве главного редактора Большой Советской энциклопедии с 1925 г. по 1941 г. Он так организовал дело, что даже когда находился в арктических экспедициях, работа в редакции продолжалась.

Таким образом, поддержав революционную идеологию, но не приняв ее практическое воплощение, О. Ю. Шмидт старался привнести логику в свою работу.

Шмидт — путешественник

Человек с такой энергией не мог долго находиться на одном месте, даже будучи на государственной службе, он менял не только места работы, но и города. Все началось с экспедиции на Памир в 1928 г., которая была посвящена, с одной стороны, юбилею Академии наук, с другой стороны, налаживанию научных контактов с западными учеными. Академия наук вместе с *Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft* (Германия) были ее учредителями, а во главе стоял П. Горбунов — химик, биолог, бывший революционер и работник советского правительства.

О. Ю. Шмидт в этой экспедиции имел очень небольшой альпинистский опыт, но как любой альпинист он не переставал восхищаться природными ландшафтами, оставляя дневниковые записи, причем в них нет упоминаний о разного рода бытовых неудобствах, об естественной усталости людей — закономерных спутниках всех экспедиций [8, с. 19]. Памирская экспедиция длилась чуть больше месяца и была насыщена событиями и помогла О. Ю. Шмидту переформатироваться из чиновника в исследователя-путешественника, с которым у большинства и ассоциируется его фамилия.

Возможно, О. Ю. Шмидт и дальше бы продолжал восхождения на Памир, по крайней мере, планы у него были именно таковы, но судьба распорядилась иначе. В правительственных кругах появилась идея освоения Земли Франца-Иосифа, где предполагалось строительство радиостанции, метеорологической станции, где должны были остаться семь зимовщиков. Осуществление проекта было поручено Институту по изучению Севера в Ленинграде. Начальником экспедиции был назначен О. Ю. Шмидт. Стали искать добровольцев, которые согласились бы провести 128 дней посреди необъятной ледяной пустыни.

Самым старшим участником экспедиции стал В. Ю. Визе, который уже бывал в этих краях во время экспедиции лейтенанта Г. Седова на парусно-паровом судне «Св. Фока» в 1912—1914 гг. События того путешествия он отразил в своем дневнике, который хранится в Санкт-Петербургском филиале архива Российской академии наук (СПбФ АРАН) [12, с. 339].

Помощником начальника экспедиции стал Р. Л. Самойлович. Еще одним членом экспедиции был П. Я. Илляшевич — бывалый полярник, два года зимовавший на Новой Земле. В качестве метеоролога был направлен молодой ученый Ленинградской обсерватории Г. А. Шашковский, уже зимовавший в Арктике ранее. Врачом поехал Георгиевский, поваром — Знахарев, служителем при собаках — Алексин, механиком-мотористом — Муров, особым почетом пользовался жизнерадостный радист Кренкель [13, с. 15].

Поле торжественного отплытия парохода «Георгий Седов» 20 июля 1929 г. уже через месяц — 30 августа была открыта новая советская радиостанция и метеорологический форпост. 12 сентября экспедиция вернулась в Архангельск, она имела огромное значение. Благодаря результативной работе гидрологов и зоологов появилась возможность долгосрочного исследования северных территорий в созданном для этой цели Арктическом институте, директором которого стал О. Ю. Шмидт. 15 июля 1930 г. состоялась вторая Арктическая экспедиция на «Седов», но задач стояло намного больше: необходимо было забрать зимовщиков с Земли Франца-Иосифа и расширить станцию.

Следующей экспедицией, где начальником был О. Ю. Шмидт, а его заместителем — В. Ю. Визе, была экспедиция на ледокольном пароходе «Александр Сибиряков» в июле — октябре 1932 года. Впервые в истории было совершено сквозное плавание по Северному морскому пути за одну навигацию.

Челюскинская эпопея, цель которой — доказать возможность доставки грузов и людей по Северному морскому пути и сменить людей на острове Врангеля, которые четыре года из-за льдов были отрезаны от цивилизации, — подробно описана в научной и популярной литературе.

Организация и руководство экспедицией осуществлялась О. Ю. Шмидтом, который в то время возглавлял Главное управление Северного морского пути при Совнаркомe СССР. Как писал Михаил Кольцов: «Меня восхитил высокий уровень командования на «Челюскине». Руководить такой экспедицией, при таких событиях, которые она пережила, и руководить, ни разу не повысив голоса, ни разу не издав «Приказ за номером...», — это поистине торжество авторитета главы коллектива» [14, с. 70].



Рис. 2. О. Ю. Шмидт с группой участников похода на ледокольном пароходе «Георгий Седов».



Рис. 3. О. Ю. Шмидт на Северном полюсе (май 1937 г.).

Экспедиция на Северный полюс 22 мая 1937 г., за руководство которой О. Ю. Шмидт получил звание Героя Советского Союза, стала заключительной в его жизни.

Вместо заключения: многогранность натуры

В характере О. Ю. Шмидта сочетались любовь к точным наукам и тяга к классической музыке (играл на контрабасе, любил творчество Глинки, Мусоргского, романсы Грига). Он любил литературу XIX в. и произведения современников — В. Маяковского и С. Есенина [8, с. 8]. По воспоминанию Н. Ф. Яницкого, О. Ю. Шмидт овладевал иностранными языками не с целью постижения новых знаний, а из-за глубокого интереса к ним, ему удавалось быстро усваивать строй изучаемого языка [10, с. 19].

Увлечение философией сам О. Ю. Шмидт объяснял великой связью ее с математикой, он являлся членом научно-философского общества под руководством Е. В. Спекторского. Лекции и практики по философии он посещал не только будучи студентом, но и после окончания университета; его увлекала теория познания. Марксизм в те годы был необычайно популярным учением, и увлекающийся О. Ю. Шмидт не смог пройти мимо: «Мое мировоззрение, — писал он, — еще в студенческие годы складывалось под влиянием марксистской литературы, но в партии я тогда не был» [из архива Российской академии наук].

Биография Отто Юльевича Шмидта немыслима без его научного интереса к изучению происхождения Земли и планет Солнечной системы. Он стал одним из тех, кто пробудил интерес в научной среде к развитию планетарной космогонии. Сам он занялся этой наукой в 1930-х гг., когда она была в состоянии общего кризиса. Именно арктические экспедиции способствовали его растущему убеждению, что «без научных знаний о происхождении земли нельзя понять ее дальнейшее развитие, действующие в ней силы и их проявления» [15, с. 57].

Новую космогоническую теорию О. Ю. Шмидт представил научной общественности в 1944 г., она сопровождалась рядом его выступлений в Институте теоретической геофизики, Государственном астрономическом институте им. П. К. Штенберга, в Астрономическом обществе, Математическом обществе, на сессии Отделения физико-математических наук Академии наук. В 1944 г. его пригласил ректор Ленинградского университета для представления доклада. Везде отмечали его свежий взгляд, математическую разработанность, разнообразие способов проверки выводов теории, но вполне закономерной была и волна критики. О. Ю. Шмидт, понимая, что его теория далека от завершения, намеревался в дальнейшем опираться на новейшие достижения астрофизики, физики, геологии, геохимии, осознавая необходимость комплексного подхода. Его концепция образования Земли получила мировую известность, двенадцать лет своей жизни он отдал планетной космогонии, возглавил геофизическое отделение Московского университета, создал кафедру эволюции Земли, читал курс лекций по космогонии.

7 сентября 1956 г. после продолжительной болезни его жизнь оборвалась. Траурные флаги были развешаны на всех полярных станциях и зимовках, корабли

ледового флота провожали этого уникального человека гудками [6, с. 197]. Его именем назван Институт физики Земли Академии наук СССР, Подлетная равнина в Антарктиде, поселок городского типа в Иульгинском районе Чукотского автономного округа, остров в архипелаге Северная Земля, улицы во многих городах. С 1971 г. АН СССР (с 1991 г. — Российская академия наук) вручает Премию им. О. Ю. Шмидта за выдающиеся научные работы в области исследования и освоения Арктики.

Список литературы

1. Отто Юльевич Шмидт. Жизнь и деятельность. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 472 с.
2. Водопьянов М. В. Повесть о ледовом комиссаре. Москва: Географиз, 1959. 197 с.
3. Воскобойников В. М. Зов Арктики. Героическая хроника: Отто Юльевич Шмидт. — Москва: Молодая гвардия, 1975. 192 с.
4. Якушева Г. В. Отто Юльевич Шмидт — энциклопедист: Краткая иллюстрированная энциклопедия / Под ред. акад. А.М. Прохорова и Б. С. Соколова; консультант д. ист. наук С. О. Шмидт. М.: Советская энциклопедия, 1991. 155 с.
5. Никитенко Н. Ф. О. Ю. Шмидт. М.: Просвещение, 1992. 160 с.
6. Матвеева Л. В. Отто Юльевич Шмидт. 1891—1956. М.: Наука, 1993. 202 с.
7. Отто Юльевич Шмидт в истории России XX века и развитие его научных идей. М.: Физматлит, 2011. 680 с.
8. Корякин В. С. Отто Шмидт. Москва: Вече, 2011. 416 с.
9. Отто Юльевич Шмидт: 120 лет со дня рождения. — Ярославль.: Изд-во «РМП», 2011 г. 255 с.
10. Яницкий Н. Ф. Отто Юльевич Шмидт. Жизнь и деятельность. М.: Изд-во АН СССР, 1959.
11. Ленин. В.И. Полн. Собр. соч. в 45 т. М., 1968. Т. 42.
12. Волгушева А. О. Владимир Юльевич Визе — ученый-полярник, художник, писатель, честный человек // Гидрометеорология и экология. 2025. № 79. С. 337 — 343.
13. Громов Б. В. Поход «Седова»: экспедиция «Седова» на Землю Франца-Иосифа в 1929 году. М., Молодая гвардия, 1930. 94 с.
14. Канторович В. Глазами литератора: Социологические очерки. М.: Советский писатель, 1970. 319 с.
15. Шмидт О. Ю. Новая теория происхождения Земли. Избранные труды. Т. 3

Информация об авторе

Волгушева Алла Олеговна, кандидат исторических наук, доцент, кафедра социально-гуманитарных наук, Российский государственный гидрометеорологический университет, доцент, Volgusheva_irbis@mail.ru.

Information about author

Volgusheva Alla Olegovna, Ph.D. Historical Sciences, Associate Professor, Department of Social Sciences and Humanities, Russian State University of Humanities, Associate Professor, Volgusheva_irbis@mail.ru.

УДК 001(092)

Вениамин Петрович Семенов-Тянь-Шанский — уникальный исследователь с непростой судьбой

Владимир Леонович Семенов-Тянь-Шанский

Директор Фонда сохранения наследия Петра Петровича Семёнова-Тянь-Шанского и его потомков, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, p.p.semenovfoundation@gmail.com

Введение

В 2025 г. исполнилось 155 лет со дня рождения Вениамина Петровича Семёнова-Тянь-Шанского — уникального ученого, который был одновременно географом, статистиком, геологом, картографом, художником, писателем-мемуаристом, основателем и директором существовавшего в 20-30 гг. XX в. в СССР в Петрограде-Ленинграде Центрального Географического Музея — уникального учреждения о котором, к сожалению, в наше время, мало кто помнит.

Семья

Вениамин Петрович родился 27 марта (8 апреля) 1870 г. в Санкт-Петербурге, он был четвертым ребенком в семье ученого, путешественника, государственного и общественного деятеля Петра Петровича Семенова (1827 г. — 1914 г.), который вошел в историю как отважный исследователь хребта Тянь-Шань в Центральной Азии (1856 г. — 1857 г.), активный участник подготовки крестьянской реформы (1861 г.), директор центрального статистического комитета, инициатор



Портрет В. П. Семенова-Тянь-Шанского. В. Д. Семенова-Тянь-Шанская. 1924 г.
Цветной карандаш, картон. Из собрания Н. Д. Голубятниковой. Фото: Е. Елинер.

и организатор первой научной переписи населения Российской Империи (1897 г.), вице-председатель Императорского Русского Географического Общества, знаток искусства и коллекционер нидерландской живописи, чья коллекция из более 700 картин и 3500 гравюр пополнила собрание Эрмитажа. К пятидесятилетию отважной экспедиции на Тянь-Шань в 1906 году П. П. Семенов получил право со всем своим потомством добавить к своей фамилии «с нисходящим потомством» почетную приставку Тянь-Шанский.

Мать Вениамина Петровича — Елизавета Андреевна Заблоцкая-Десятовская (1842 г. — 1915 г.), дочь действительного тайного советника, статистика и экономиста Андрея Парфеновича Заблоцкого-Десятовского, с которым Петр Петрович познакомился, работая над подготовкой реформы 1861 г. Елизавета Андреевна была второй женой Петра Петровича и их счастливый брак продлился 53 года.

Петр Петрович был заботливым отцом. Он вырастил 7 детей и 15 внуков, всегда старался воспитать их собственным примером и поддерживал все их увлечения. Итогом такого воспитания стало то, что все дети выросли глубоко образованными и разносторонними людьми, и, как он сам писал, «разобрали» многочисленные профессиональные увлечения отца. Не стал исключением и В. П. Семенов-Тянь-Шанский.

Образование и начало научной деятельности

Вениамин Петрович в 1893 г. окончил естественное отделение физико-математического факультета Петербургского университета по кафедре геологии и палеонтологии, после чего приступил к работам в геологическом кабинете Университета, изучая палеонтологические коллекции, собранные им и его другом, коллегой Г. Г. Петцем, а также коллекцию юрских и меловых ископаемых животных Н. И. Андрусова, которые и по сей день можно увидеть в геологическом музее Государственного университета. Находясь под впечатлением лекций Д. И. Менделеева по химии, он написал рецензию на его книгу «К познанию России». Вскоре В. П. Семенов занялся геологическими исследованиями на северо-западе России, на Алтае, в Казахстане и других районах.

С 1891 г., будучи канцелярским служащим Главной переписной комиссии, он фактически стал личным секретарем своего отца. В 1897 г. вместе с отцом и братьями принимал деятельное участие в первой всеобщей переписи населения России, лично переписывая самый сложный, большой и людный участок на Васильевском острове в Санкт-Петербурге, от Среднего до Малого проспекта, остров Голодай и Смоленское кладбище.



С 1899 г. под общим руководством своего отца и тестя, профессора В. И. Ламанского, принялся за составление и редакцию многотомного издания «Россия. Полное географическое описание нашего отечества. Настольная и дорожная карта для русских людей». Из запланированных двадцати двух томов до 1914 г. вышли в свет одиннадцать.

В 1900 г. В. П. Семенов-Тянь-Шанский, к сожалению своих учителей А. П. Карпинского, А. А. Иностранцева и Н. И. Андрусова, возлагавших на него большие надежды, по семейным обстоятельствам завершил свои труды в геологическом кабинете университета и приступил к работе в отделении статистики Министерства финансов.

В 1908—1909 гг. вдохновленный трудами и личным знакомством с А. И. Воейковым он принялся за написание монографии «Город и деревня в Европейской России» — одной из географических книг, которую можно назвать классической, лежащей в основе русской географии населения. Работа над ней длилась около полутора лет. Книга вышла тиражом 1000 экземпляров в августе 1910 г. Следующая вышедшая в свет его работа «Торговля и промышленность Европейской России по районам» (1900—1911 гг.) после блестящего доклада в Географическом обществе была отправлена на международную выставку в Турин, где была удостоена «Гран-при». Общая часть этой работы была переведена на французский язык и представлена им в качестве доклада на X Международном географическом конгрессе в Риме, который состоялся в 1913 г., что принесло Вениамину Петровичу мировую известность в научных кругах.

Центральный географический музей

С 1919 г. В. П. Семенов-Тянь-Шанский переключился на преподавательскую деятельность в университетах Петрограда, а также получил возможность заняться созданием «Центрального географического музея», который стал его «любимым детищем». Создание музея требовало в послереволюционное время незаурядных организаторских способностей и большого энтузиазма. Помимо своей деятельности в роли директора музея, он активно принялся за пополнение экспонатами музея, в том числе сам начал писать пейзажи (по старым этюдам) и чертить карты. Официальное открытие музея состоялось 10 июня 1923 г. во время Петроградской губернской музейной конференции. В 1924 г. в журнале «Музей» вышла его статья о музее и его задачах. В музее побывали сотни ученых из Германии, Англии, Франции, США, Италии, Австрии,



Польши, Финляндии, Японии, Турции и других стран. Американский профессор Гибберт записал: «Побывать в этом музее — значит получить географическое образование».

За время своего существования музей трижды менял свое местоположение и в самом начале 1929 г. переехал последний раз — в бывший особняк графа Бобринского на Красной (Галерной) улице. Известно, что в начале 30 гг. XX в. рассматривались различные варианты развития, в частности организация в одном из пригородов Петрограда большого музея с географическим парком. Одной из проектируемых в 1934 г. площадок был парк во Всеволожской, для которого был подготовлен впечатляющий проект музея на двух этажах, однако этому проекту не суждено было претвориться в жизнь.

В 1936 г. бюджет музея достиг более полумиллиона рублей, фонды — 16 тыс. единиц хранения (по количеству экспонатов в эти годы музей занимал третье место в Ленинграде после Эрмитажа и Русского музея), коллектив — 50 сотрудников. В это время помимо воли директора в музее начал работать новый научный секретарь, деятельность которого сначала привела к тому, что музей покинул ряд наиболее знающих и опытных работников. Затем Ленинградский общегородской музейный совет наложил запрет на открытие тщательно готовившейся под руководством В. П. Семенова-Тян-Шанского экспозиции Кавказа в музее. Вместо разрешения на открытие экспозиции он получил в Москве указание о полной реэкспозиции музея в двухмесячный срок и был вынужден подать в отставку. Его место занял тот самый научный секретарь, «усилиями» которого к июню 1937 г. музей пришел в упадок, а сам он был снят «за развал работы музея», но восстановить музей уже не было возможности. Музей был закрыт, коллекции его частично перешли к различным учреждениям, частично были утрачены.

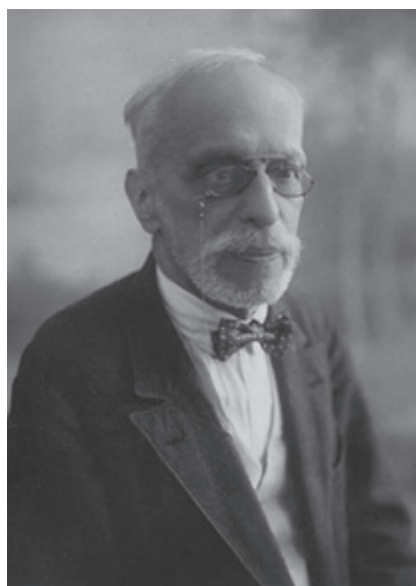


Дазиметрические карты, поздние научные труды и удары судьбы

С 1918 г. В. П. Семёнов-Тян-Шанский занимался подготовкой издания уникальных карт, показывающих плотность населения России, в которых использовался дазиметрический способ картографирования. При работе над впервые подготовленной в 1918 г. «Дазиметрической картой южных частей Обонежья и Приладожья» был выявлен новый колонизационный фонд площадью 200 тыс. десятин. Принципиально новый метод показа плотности населения был по достоинству оценен на практике. Директор НИИ «Поверхность и недра» инженер-экономист П. А. Пальчинский изыскал средства и предложил В. П. Семёнову-Тян-Шанскому взяться за составление дазиметрической карты территории европейской

части СССР и Кавказа на 127 листах (масштаб 1:420000) с текстом, содержащим анализ каждой карты. В течение 1923—1927 гг. 46 многокрасочных листов этой карты были напечатаны, а остальные подготовлены к печати. Издание получило мировую известность. Но, к сожалению, выпуск всех карт до конца осуществлен так и не был (в 1928 г. П. А. Пальчинский был арестован и расстрелян, а институт закрыт).

Еще одним уникальным и масштабным трудом В. П. Семёнова-Тян-Шанского, который нельзя не упомянуть, является многотомная рукопись «Основы страноведения», подготовкой которой он занимался долгие годы и которая должна была увенчать его тридцати пятилетний опыт занятия географической наукой. В 1928 г. в свет вышла первая часть объемного труда — монография «Район и страна», изданная тиражом 2000 экземпляров, которая вошла в число классических географических работ. В рецензии на книгу «Район и страна» Н. Н. Баранский писал: «Содержание книги значительно шире, чем это можно было бы заключить из заглавия. Это — энциклопедия географии, обнимающая собой все ее отделы — от математической географии до экономической и политической <...> По широте географической концепции и богатству мыслей книга едва ли имеет себе что-либо



равное в нашей географической литературе; ее с интересом и пользой прочтет не только каждый географ, но и вообще каждый образованный человек, который захочет ознакомиться с сущностью географии как науки. Следует пожелать скорейшего выхода дальнейших томов работы, согласно авторскому предисловию уже готовых к печати». Этому пожеланию основоположника советской экономико-географической школы, к сожалению, не суждено было сбыться.

С начала 1930 гг. географические исследования, учитывающие плотность населения, которые могли вскрыть демографические последствия коллективизации, оказались под запретом. Формальным предлогом к началу репрессий против учёного была его приверженность антропогеографии, которая в вульгарной трактовке официальных кругов того

времени сводилась исключительно к геополитике и соответствующим работам немецких авторов и была запрещена как научное направление в СССР. Несмотря на то, что последняя работа по геополитике была написана В. П. Семёновым-Тян-Шанским в 1915 г., а исследование политических вопросов в лекционных курсах профессора носило сугубо теоретический характер, его имя оказалось включено в список «прорабатываемых» ОГПУ учёных.

В 1932 г. В. П. Семёнов-Тян-Шанский был вынужден оставить преподавательскую деятельность и сосредоточил усилия на развитии Географического музея и активной работе в Русском географическом обществе, направленной на сохранение академических традиций географии. Упомянутый выше уход, или точнее его изгнание из «любимого детища» — Центрального географического музея в 1937 г., стал первым «ударом судьбы», как пишет он сам в воспоминаниях.

К началу 1939 г. преследования ученого поутихли, и он снова смог вернуться к активной деятельности на научном поприще, а 26 апреля 1940 г. в связи с семидесятилетием и за исключительные заслуги перед географической наукой и Географическим обществом он был единогласно избран почетным членом Географического общества.

Вторым «ударом судьбы» стала смерть 2 мая 1940 г. горячо любимой жены — Веры Владимировны Ламанской. Третий удар, от которого он уже не смог оправиться — это нападение 22 июня 1941 года на СССР вчерашнего союзника и последовавшая за ним блокада Ленинграда. Обратимся к воспоминаниям В. П. Семёнова-Тян-Шанского, которые он записывал до последних дней жизни:

«Эту главу я пишу на всякий случай, ни за что ни ручаясь. Вот как пошло дело. Гитлер вломился к нам, несмотря на непрерывное сопротивление, предвзительно накопив больше механических сил, чем было у нас. Но он просчитался, рассчитывая окончить войну до зимы и померз вроде французов 1812 года. <...> Во всяком случае, вторжение Гитлера в Россию, по своей дикости намного превзошло решительно все знаменитые средневековые вторжения, гуннов, готов, вандалов, аваров, алан, печенегов, мадьяр, половцев, монголов, татар, калмыков и других исторических страшилищ... В самом же начале оно произвело совершенно нелепую стихийную, паническую детскую эвакуацию из Ленинграда, печально закончившуюся и роковым образом помешавшую дальнейшей продуманной и планомерной эвакуации. <...> Между тем, немцы осадили Ленинград, отрезав его, в конце концов, временным занятием Тихвина. Начался голодный мор, от которого в декабре 1941 и январе 1942 года погибло много близких людей. <...> У брата Измаила дела сложились катастрофически. Он совершенно не заметил, что обрекая себя на величайшие добровольные самопожертвования Надя (*примечание автора: Надежда Владимировна — жена Измаила Петровича Семенова-Тян-Шанского*) приближалась к нервному удару. К счастью, он оказался легким. Но факт удара, с необходимостью во что бы то ни стало спасти жизнь Нади, заставили голодать брата Измаила настолько, что он незаметно для себя самого растерял свои личные силы и скончался от голода 3 января 1942 года. Я видел брата последний раз на Новый год 1 января и с ним попрощался. <...> Во время немецкой осады в Ленинграде скончались при сильнейших морозах, немилосердно уничтожавших

и немцев, такие массы народа, что их не успевали хоронить и вначале складывали штабелями покойников. Вот что значит вовремя не эвакуировать население. Тотчас после похорон брата Измаила несчастья стали прилагаться и непосредственно к моему лицу. Так...».

В этом месте на многоточии обрывается рукопись воспоминаний В. П. Семёнова-Тян-Шанского. Он умер от голодной дистрофии 10 февраля 1942 г. Его сын Владимир похоронил отца на Богословском кладбище в гробу, сколоченном из письменного стола.

Заключение

Научное наследие Вениамина Петровича Семенова-Тян-Шанского — это национальное российское достояние и гордость. К юбилею подготовлена рукопись двухтомного собрания сочинений ученого «Опыт высшей географии. Избранные труды по антропогеографии и теоретической географии», составителем которой и автором научного аппарата является многолетний историограф его жизни и творчества профессор Павел Маркович Полян. Большую часть текстов, собранных в готовящемся издании, составляют работы, не опубликованные при жизни автора. Впрочем, и напечатанные при жизни его труды малодоступны: ознакомиться с ними можно лишь в крупных или специализированных библиотеках.

В работу вошли также и статьи автора на природоохранную тематику, ставящие его в ряд основоположников заповедного движения в России: «О типах местностей, в которых необходимо учредить заповедник типа американских национальных парков» (1917) и «Сеть заповедников и заказников СССР как элемент охраны естественных производительных сил» (1928). Рукопись готовилась при поддержке Российского географического общества (РГО), а также Института географии РАН (ИГРАН) и нашего Фонда. Издание фундаментального труда готовится в ближайшее время, и мы надеемся, что оно вызовет интерес как со стороны специалистов, так и широкой общественности, интересующейся вопросами географии.

В сочетании с подготовленным и изданным Михаилом Арсеньевичем Семеновым-Тян-Шанским и Павлом Марковичем Поляном двухтомником воспоминаний ученого «То, что прошло» (Москва, Новый хронограф, 2009) готовящийся труд даст полное представление о личной и профессиональной сферах жизненного пути В. П. Семенова-Тян-Шанского.

Еще его одной стороной, которая недавно была изучена и получила достойное признание, является его художественное наследие. Как и все дети Петра Петровича, Вениамин Петрович с детства брал уроки живописи. Это детское увлечение он пронес через всю жизнь и, можно сказать, сделал одной из своих профессий. В вышедший в 2024 г. каталог «Художественное наследие семьи П. П. Семенова-Тян-Шанского» вошли 192 его художественные работы, преимущественно пейзажи карандашом, акварелью и пастелью. Большинство работ педантично подписаны географическими названиями мест и датированы, что позволяет сопоставлять их с воспоминаниями ученого и получать объемную картину. Здесь приводится рисунок дома в имении Гремячка, Рязанской области, где Петр Петрович



Имение «Гремячка». 1899.» бумага, акварель. 24х16. Инв. #93.
Фонд наследия П. П. Семенова-Тян-Шанского.

ежегодно проводил лето со всей семьёй, и которое так любили его дети. А также цитату из воспоминаний В. П. Семенова-Тян-Шанского, прекрасно дополняющую данный рисунок: *«У Гремячкинского дома, расположенного на длинном пологом скате к реке Ранове, со стороны парка была посредине небольшая, сначала деревянная, а потом каменная открытая терраса с клумбами и мраморными вазами с цветами, на которой самовольно несимметрично выросли березки, моя мать Елизавета Андреевна не позволяла их уничтожать. А со стороны двора, окруженного куртинами сирени, был большой крытый балкон, увитый диким виноградом, и по бокам фасада два крыльца с примыкавшими к ним рядами старых, развалистых желтых акаций Caragana. Левое крыльцо было высокое с массой ступенек, а правое — низкое».*

В. П. Семенов-Тян-Шанский написал около 50 художественных работ для Центрального географического музея, но, к сожалению, судьба не всех работ известна. Его ландшафтная живопись полна любви к природе и очень точно передает её детали, а самым захватывающим для себя автор считал изображение неба.

В 2020 г. наш Фонд выступил с инициативой установки мемориальной доски ученому на доме №12 по 3-й линии Васильевского острова в Санкт-Петербурге, где В. П. Семенов-Тян-Шанский жил, работал и умер в блокаду. Однако, при том, что дизайн доски был согласован городом, нам до настоящего момента не удалось



Дорога в Усыкирко. 1905. Бумага, пастель. 34.5x20.
Собрание Н. В. Семенов-Тянь-Шанской.

завершить этот процесс. На недавно проходившем в Москве съезде, посвященном 180-летию Русского Географического Общества, Президент РФ В. В. Путин в своем выступлении упомянул о грядущем 200-летнем юбилее П. П. Семенова-Тянь-Шанского и о «любимом детище» В. П. Семенова-Тянь-Шанского — Центральном географическом музее. Президент не без сожаления сделал акцент на том, что «созданный в Петрограде в 1919 г. географический музей через 20 лет был ликвидирован по непонятным совершенно политическим соображениям» и предложил создать новый географический музей, который «должен быть самым большим, красивым и разнообразным». Наш Фонд считает, что для сохранения преемственности истории страны очень важно, чтобы новый музей стал развитием идей, которые претворяли в жизнь В. П. Семенов-Тянь-Шанский и его сотрудники, чтобы сохранившееся наследие исторического музея было тщательно изучено и использовано при его создании. Воссоздание географического музея вместе с установкой мемориальной доски В. П. Семенову-Тянь-Шанскому могут стать достойными актами увековечивания его памяти к 2027 г.

Список литературы

1. Семенов-Тянь-Шанский В. П. «То, что прошло». М.: Новый хронограф, 2009. 1994 с.
2. Художественное наследие семьи Петра Петровича Семенова-Тянь-Шанского. Воронеж: Воронежская областная типография. Издательство им. Е. А. Болховитинова. 2024. 160 с.

Информация об авторе

Семенов-Тянь-Шанский Владимир Левонович, директор Фонда сохранения наследия Петра Петровича Семёнова-Тянь-Шанского и его потомков, p.p.semenovfoundation@gmail.

Information about author

Semenov-Tian-Shanskii Vladimir Levonovich, Director of Foundation of preservation of heritage of P. P. Semenov-Tian-Shanskii and his descendants.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 81

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Литературный редактор Л. В. Кипнес, канд. пед. наук, доцент
Технический редактор М. В. Иванова

Выход в свет 29.12.2025. Формат 70×100 1/16. Гарнитура Times New Roman.

Электронно-сетевое издание. Усл. печ. л. 12,27. Заказ № 1507.

Адрес издателя, редакции и типографии: РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет
