

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 78

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. № 78. Научно-теоретический журнал. Санкт-Петербург : РГГМУ, 2025. 175 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; **Орещенко 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, доцент (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 биолог. наук, проф.; **Лобанов 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.; **Прошутинский А. Ю.**, д-р физ.-мат. наук (США); **Репина И. А.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Румянцев В. А.**, д-р геогр. наук, проф., академик РАН; **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.

Подписной индекс 78576 в «Каталоге российской прессы "Почта России"».

ISSN 3034-4190

Журнал входит в Перечень ВАК по направлению науки о Земле и окружающей среде, имеет категорию К2, 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.

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

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

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2025

© Авторы публикаций, 2025

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

№ 78

A theoretical research journal

Published since October, 2005

4 issues a year

ISSN 3034-4190

St. Petersburg
RSHU
2025

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 speciality. 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 specialities.

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, Executive editor, 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*

Kondratev 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; **Proshutinskiĭ 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 № ФС77-79574 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.

Subscription index 78576 in «Catalogue of the Russian press "Post of Russia"».

ISSN 3034-4190

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>).

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

Содержание

Метеорология

- П. А. Голубкин, В. С. Коляда, Ю. Е. Смирнова.* Мезомасштабные полярные циклоны над Антарктикой по данным реанализа ERA5 7
- В. Ю. Жуков, А. Д. Кузнецов, В. С. Никитина, О. С. Сероухова, Т. Е. Симакина.* Построение траектории распространения СВЧ-излучения в неоднородной атмосфере 20

Океанология

- Я. И. Ангудович, Ю. А. Татаренко.* О применении нейронных сетей в задачах оперативного прогнозирования уровня воды в акватории Обской губы 42
- П. И. Бухарицин, Р. С. Орлов.* Оценка воздействия дрейфующих льдов Северного Каспия на дно и искусственные сооружения 66

Экология. Обзор

- С. А. Кондратьев.* Математическое моделирование как средство выхода за рамки возможного натурального эксперимента при изучении и прогнозировании изменений водных объектов и их экосистем. 80

Геоинформатика. Обзор

- Е. П. Истомин, И. Е. Истомин, В. Л. Михеев, С. И. Биденко, А. Г. Соколов.* Геоинформатика, геоинформационные технологии, геоинформационное управление. 113

Геоинформатика

- Д. Ф. Миляков.* Метод учета имплицитного окружения при проведении ситуационного анализа в ГИС. 128

Гидрология

- А. И. Баскакова, Д. И. Исаев.* Оценка скоростей деформаций меандрирующих рек Ямала 140

Гидрология. В порядке обсуждения

- А. А. Батмазова, Е. В. Гайдукова.* Построение регрессионных моделей для оценки уровня режима озер Северо-Западной части России. 151

Хроника. История. Персоналии

- А. О. Волгушева.* Жизнь, государственная и общественная деятельность выдающегося российского геофизика, академика Б. Б. Голицына 166
- Памяти А. Д. Егорова 173

Contents

Meteorology

- P. A. Golubkin, V. S. Kolyada, J. E. Smirnova.* Antarctic polar mesoscale cyclones based on ERA5 reanalysis data 7
- V. Yu. Zhukov, A. D. Kuznetsov, V. S. Nikitina, O. S. Seroukhova, T. E. Simakina.* Construction of the trajectory of microwave radiation propagation in an inhomogeneous atmosphere..... 20

Oceanology

- Ya. I. Angudovich, Yu. A. Tatarenko.* On the application of neural networks in the tasks of operational water level forecasting in the Gulf of Ob 42
- P. I. Bukharitsin, R. S. Orlov.* Assessment of the impact of the drifting ice of the Northern Caspian Sea on the bottom and artificial structures 66

Ecology. Review

- S. A. Kondratyev.* Mathematical modelling as a means of going beyond possible field experiments in research and forecasting of changes in water bodies 80

Geoinformatics. Review

- E. P. Istomin, I. E. Istomin, V. L. Mikheev, S. I. Bidenko, A. G. Sokolov.* Geoinformatics, geoinformation technologies, geoinformation management ... 113

Geoinformatics

- D. F. Milyakov.* Method for taking into account the implicit environment when conducting situational analysis in GIS 128

Hydrology

- A. I. Baskakova, D. I. Isaev.* Estimation of deformation rates of meandering rivers of Yamal 140

Hydrology. Discussion

- A. A. Batmazova, E. V. Gaidukova.* Construction of regression models for assessing the level regime of lakes in North-West Russia 151

- Chronicle. Story. Personalies** 166

Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 7—19.
Hydrometeorology and Ecology. 2025;(78):7—19.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК [551.515.1:551.515.6:004.9](99)
doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-7-19

Мезомасштабные полярные циклоны над Антарктикой по данным реанализа ERA5

***Павел Андреевич Голубкин^{1, 2}, Всеволод Сергеевич Коляда²,
Юлия Ефимовна Смирнова²***

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,
pgolubkin@gmail.com

² Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Статья посвящена оценке пространственно-временного распределения и характеристик мезомасштабных полярных циклонов над Антарктикой за период 2000—2020 гг. Детектирование и трекинг циклонов проводились с использованием автоматического алгоритма на основе спектрально фильтрованных полей относительной завихренности на уровне 850 гПа атмосферного реанализа ERA5. Выявлено 34 038 циклонов, из которых 2 650 отнесены к наиболее интенсивным на основе порогового значения относительной завихренности. Межгодовая изменчивость общего количества циклонов выражена слабо, но для наиболее интенсивных циклонов наблюдаются значительные колебания. Основные районы циклонической активности сосредоточены над морями Беллинсгаузена и Амундсена, над морем Росса выявлен регион со значимым трендом увеличения количества циклонов. Рассчитаны распределения обнаруженных циклонов по основным параметрам: время существования, пройденное расстояние и средняя скорость передвижения.

Ключевые слова: мезомасштабные полярные циклоны, Антарктика, атмосферный реанализ, ERA5

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и ННФИ в рамках научного проекта № 20-55-56051.

Для цитирования: Голубкин П. А., Коляда В. С., Смирнова Ю. Е. Мезомасштабные полярные циклоны над Антарктикой по данным реанализа ERA5 // Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 7—19. doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-7-19.

Original article

Antarctic polar mesoscale cyclones based on ERA5 reanalysis data

Pavel A. Golubkin^{1,2}, *Vsevolod S. Kolyada*², *Julia E. Smirnova*²

¹ St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia

² Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, St. Petersburg, Russia

Summary. In this study the spatio-temporal variability and key parameters of Antarctic polar mesoscale cyclones were analyzed for the period 2000—2020. Detection and tracking of cyclones were performed based on the 850 hPa relative vorticity fields from the ERA5 atmospheric reanalysis. These fields were filtered at T40—T100 spectral resolution to focus on scales typical for polar mesocyclone. The utilized automated tracking algorithm used 3-hourly fields to detect cyclones based on the magnitude of relative vorticity, with a base threshold of $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ and a stricter threshold of $-6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ to distinguish more intense cyclones. In total, 34038 polar mesoscale cyclones were identified, with 2650 classified as most intense based on the stricter threshold. Results indicate small interannual variability in the total number of cyclones, but considerably higher variability for the most intense cases. Most of the identified cyclones formed during the summer and autumn seasons. Relative to the overall distribution, more intense cyclones formed during winter season, which is most likely due to the stronger air-sea temperature contrast, which is required for intensification. The main identified regions of high cyclonic activity are the Bellingshausen and Amundsen Seas. A statistically significant positive trend in cyclone numbers was observed over the Ross Sea. Distributions of the detected cyclones by their main parameters, such as lifetime, distance travelled, and mean translation velocity were derived. Considering all identified cyclones, the mean lifetime is 16 hours, the mean distance travelled is 487 km, and the mean translation velocity is 8.7 m/s. The most intense cyclones exhibit higher mean values, i.e., 28 hours, 869 km, and 9.2 m/s for the lifetime, distance travelled, and translation velocity, respectively.

Keywords: polar mesoscale cyclone, polar low, Antarctic, atmospheric reanalysis, ERA5.

Acknowledgments: the reported study was funded by RFBR and INSF, project number 20-55-56051.

For citation: Golubkin P. A., Kolyada V. S., Smirnova J. E. Antarctic polar mesoscale cyclones based on ERA5 reanalysis data. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(78):(7—19). doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-7-19. (In Russ.).

Введение

Мезомасштабные полярные циклоны (МПЦ) являются атмосферными вихрями, которые наблюдаются в высоких широтах обоих полушарий Земли. Наиболее интенсивные из таких вихрей, называемые полярными циклонами (англ., polar lows), являются опасными явлениями, которые могут представлять угрозу для морской деятельности и прибрежных сооружений за счет развиваемых ими штормовых значений скорости ветра и высот волн [1].

Большая часть посвященных МПЦ работ исследует системы Северного полушария, чаще всего района Северо-Европейского бассейна, где наблюдается их наибольшая активность [2], и о котором существует ряд климатологических работ [3—8]. О пространственно-временном распределении МПЦ над Антарктикой известно меньше. Ряд ранних исследований 1990-х годов носил региональный

характер и основывался на использовании спутниковых инфракрасных снимков — основного инструмента для идентификации МПЦ и в настоящее время. Но промежутки между последовательными снимками в те годы могли быть слишком велики для отслеживания траекторий и характеристик МПЦ со временем существования, не превышающим 12—24 часа [9—11]. В более новой работе [12] проведен визуальный анализ спутниковых снимков для всей Антарктики, но только для периода, составляющего четыре месяца, что связано с высокой трудоемкостью процесса.

Другим типом работ являются исследования, основывающиеся на данных атмосферных реанализов или оперативных атмосферных моделей [13—15]. Такие данные предоставляют возможность проведения исследований для достаточно длинного временного периода для всей Антарктики. Однако за счет их относительно низкого пространственного разрешения (от $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ и ниже) существенная часть мезомасштабных циклонов, размер которых может не превышать 200—300 км, в таких данных может быть не воспроизведена. В связи с этим использование данных актуального атмосферного реанализа с улучшенным пространственным разрешением European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ReAnalysis 5 (ERA5) может дать более точные оценки циклонической активности над антарктическим регионом.

Целью данной работы является оценка пространственно-временного распределения и характеристик мезомасштабных полярных циклонов над Антарктикой за период 2000—2020 гг.

Исходные данные и методология

Исследование проводилось для антарктического региона с северной границей на 55° ю.ш. (рис. 1). Были использованы данные атмосферного реанализа ERA5 с пространственным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ [16]. Для детектирования циклонов использовались поля относительной завихренности на уровне 850 гПа. С целью исключения мелкомасштабного шума и систем синоптического масштаба предварительно проводилась спектральная фильтрация полей. Для этого исходные поля относительной завихренности были разложены через спектральные коэффициенты ψ_n^m и сферические гармоники $P_n^m(\mu)e^{im\lambda}$:

$$\psi(\lambda, \mu) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=|m|}^{N(m)} \psi_n^m P_n^m(\mu) e^{im\lambda},$$

где $\psi(\lambda, \mu)$ — исходное поле; λ — долгота; $\mu = \sin\varphi$, где φ — широта, n и m — степень и порядок сферических функций; P_n^m — присоединенный полином Лежандра. Далее поля были синтезированы с использованием спектральных коэффициентов со степенями сферических функций от 40 до 100, то есть со спектральным разрешением T40—T100, приблизительно соответствующим пространственной фильтрации 200—500 км. Процедура фильтрации полей относительной завихренности соответствует используемой в работе [17], где она описана более подробно.

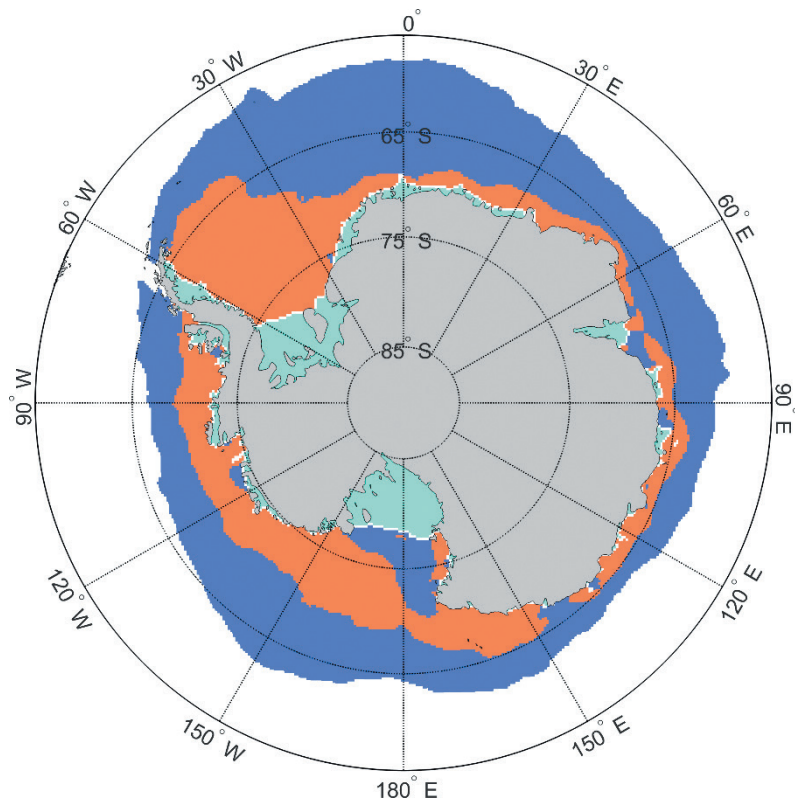


Рис. 1. Регион исследования.

Голубым цветом обозначены ледники, красным (синим) — медианное распространение ледяного покрова в летний (зимний) период за 2000—2020 гг.

Fig. 1. The study region.

Cyan color denotes glaciers, red (blue) color denotes median summer (winter) sea ice extent for 2000—2020.

Отфильтрованные поля относительной завихренности на уровне 850 гПа с временным разрешением 3 часа использовались для детектирования мезомасштабных циклонов с помощью автоматического алгоритма. Для каждого поля (временного шага) алгоритм включал нахождение локальных минимумов относительной завихренности со значениями ниже -3×10^{-5} 1/с, соответствующих центрам циклонов. После нахождения локальных минимумов на каждом последующем временном шаге проводилось сопоставление их местоположений с найденными на предыдущем временном шаге. При наличии найденного центра на следующем временном шаге на расстоянии не более 216 км от предыдущего (соответствует максимально допустимой скорости передвижения 20 м/с) трек циклона продлевался, а при его отсутствии — завершался. При работе алгоритма для включения случаев в итоговую базу были установлены следующие критерии:

максимальное время существования циклона — не более 5 суток, не более 2 суток нахождения над морским льдом или материком, минимальное время существования над свободной ото льда морской поверхностью — не менее 6 часов. Первые два критерия не оказали существенного влияния на результаты ввиду малого количества подобных случаев. Так, время существования, превышающее 4 суток, отмечено лишь в 6 случаях, в 84 % случаев — нет ни одного временного шага над морским льдом или материком, а в 95 % случаев — время нахождения над ними не превышает 12 ч.

Результаты и их обсуждение

Всего с использованием описанного выше метода было обнаружено 34038 мезомасштабных циклонов. Из них 2650 достигли за время своего существования значения отфильтрованной относительной завихренности на уровне 850 гПа ниже чем -6×10^{-5} 1/с хотя бы на одном временном шаге. Для краткости далее по тексту подобные случаи называются наиболее интенсивными МПЦ, и результаты приводятся как по всем случаям в целом, так и по таким случаям отдельно.

На рис. 2 представлено распределение обнаруженных МПЦ по годам. Среднее количество циклонов в год составило 1621. Межгодовая изменчивость выражена достаточно слабо и составляет около 10 % от среднего количества циклонов в год. В четырех из пяти последних лет исследуемого периода наблюдаются максимальные значения количества формирующихся циклонов. Схожее распределение наблюдается и для наиболее интенсивных МПЦ (рис. 2 б), однако их межгодовая изменчивость выражена сильнее, примерно до 30—40 % от среднего количества циклонов в год, которое составляет 126.

Распределение обнаруженных циклонов по месяцам их формирования представлено на рис. 3. Наиболее часто мезоциклоны формируются в марте, в этом

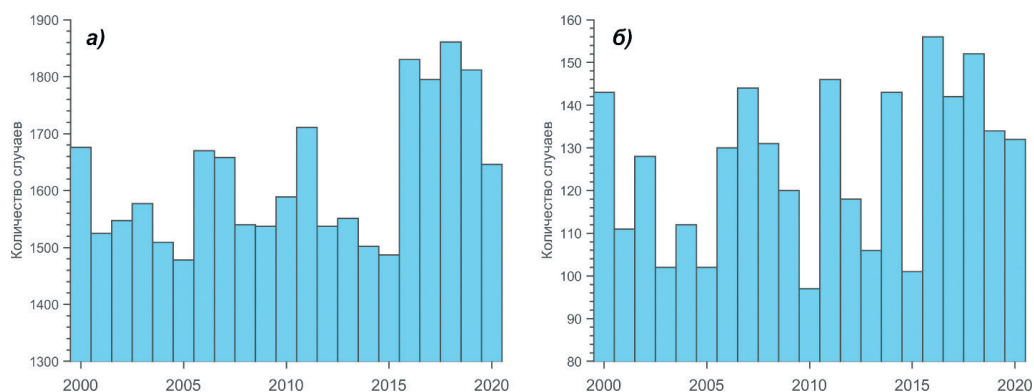


Рис. 2. Распределение обнаруженных МПЦ по годам.

a — для всех случаев, *б* — для наиболее интенсивных циклонов.

Fig. 2. Distribution of detected mesocyclones by years.

a — for all cases, *б* — for most intense cyclones.

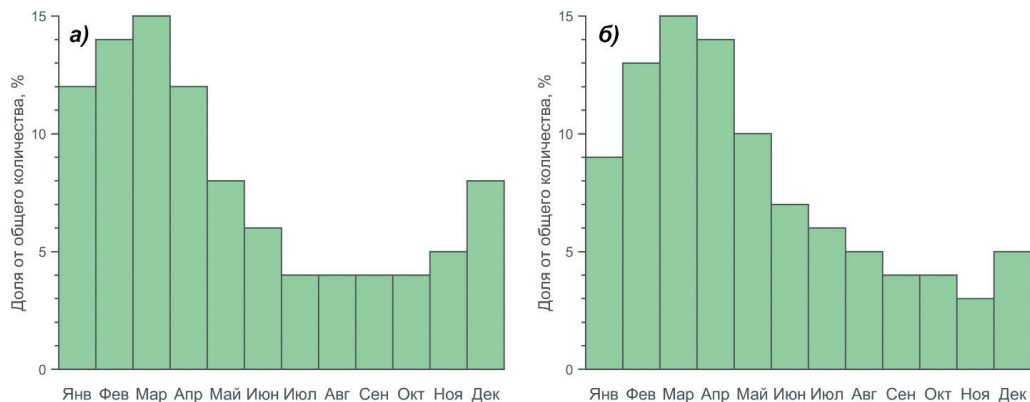


Рис. 3. Распределение обнаруженных МПЦ по месяцам.
а — для всех случаев, *б* — для наиболее интенсивных циклонов.

Fig. 3. Distribution of detected mesocyclones by months.
a — for all cases, *b* — for most intense cyclones.

месяце наблюдается около 15 % всех случаев. Большая часть случаев наблюдается в летний (декабрь—февраль, 35 %) и осенний (март—май, 36 %) периоды, что, вероятно, связано с существенно большей доступной свободной ото льда площадью акватории. Известно, что наиболее интенсивные мезомасштабные циклоны наблюдаются преимущественно в зимний период, поскольку для формирования и развития им необходим большой контраст между температурами воздуха и поверхности океана [1]. Этим может объясняться уменьшение количества в летний период и увеличение в зимний для наиболее интенсивных МПЦ, рассматриваемых в данной работе (рис. 3 б).

На рис. 4 показано пространственное распределение траекторий обнаруженных циклонов как количество пересечений ячеек сетки 100×100 км за год. Наблюдается ряд очагов повышенной циклонической активности со значениями до 10 циклонов в год, находящихся на некотором удалении от материка, и местоположение которых, в среднем, хорошо соотносится с положением контуров медианного распространения ледяного покрова (рис. 1). При этом в западной части региона активность выше, чем в восточной. Наиболее выраженные максимумы циклонической активности находятся над морями Беллингаузена и Амундсена. При рассмотрении наиболее интенсивных МПЦ отдельно результаты схожи, большая часть очагов сохраняется, хотя и менее выражена, но некоторые очаги отсутствуют, что свидетельствует о том, что в этих районах проходит много мезоциклонов, но практически все они незначительны. Максимальный пик активности наиболее интенсивных МПЦ находится над морем Беллингаузена.

На рис. 5 отображены тренды изменения количества траекторий мезомасштабных циклонов в ячейках сетки 500×500 км. На большей части региона отмечаются положительные тренды, которые в большинстве случаев статистически незначимы. Наибольший район с максимальными и значимыми трендами

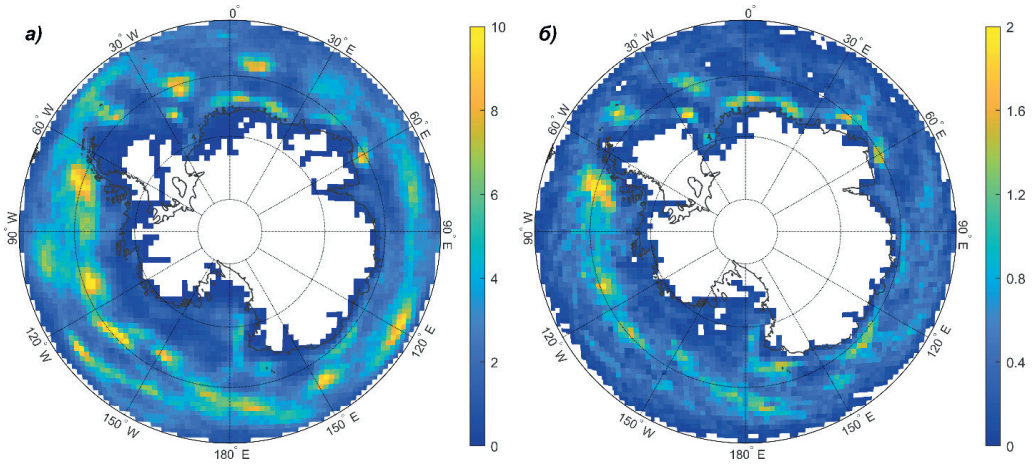


Рис. 4. Пространственное распределение обнаруженных МПЦ. Цветом показано количество пересечений ячеек размером 100×100 км траекториями МПЦ в год.

a — для всех случаев, *b* — для наиболее интенсивных циклонов.

Fig. 4. Spatial distribution of detected mesocyclones. Color represents the number of mesocyclone tracks which cross 100×100 km grid cells per year.

a — for all cases, *b* — for most intense cyclones.

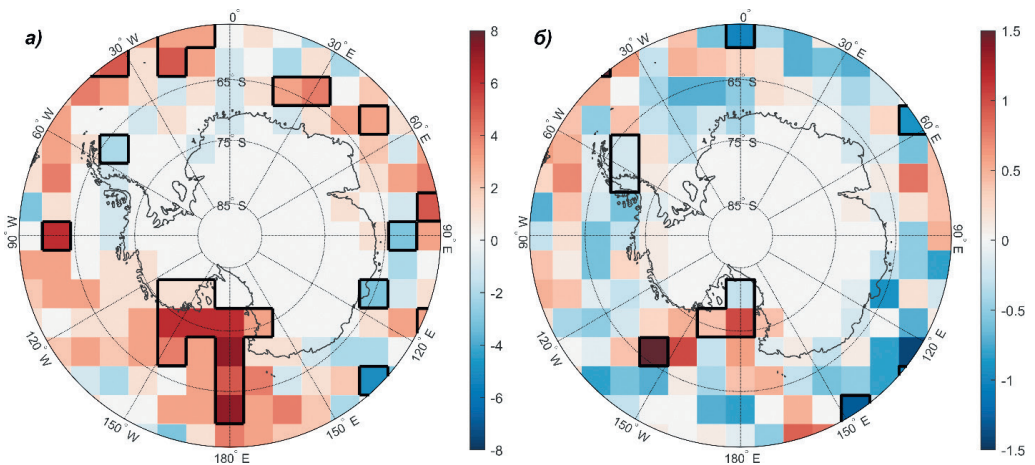


Рис. 5. Тренды изменения количества траекторий МПЦ (единиц за декаду), пересекающих ячейки сетки размером 500×500 км. Черным рамками отмечены ячейки, тренды в которых статистически значимы на уровне, превышающем 95 %.

a — для всех случаев, *b* — для наиболее интенсивных циклонов.

Fig. 5. Trends in the number mesocyclone tracks crossing 500×500 grid cells (number per decade). Framed grid cells represent statistically significant trends with a level exceeding 95 %.

a — for all cases, *b* — for most intense cyclones.

к увеличению количества циклонов находится над морем Росса, где их значения составляют до плюс 4—8 случаев за декаду.

Для наиболее интенсивных МПЦ большая часть наблюдаемых трендов отрицательна, но практически все они статистически незначимы. Несколько ячеек со значимыми отрицательными трендами находится в северных широтах, где количество интенсивных МПЦ мало (рис. 4 б). Небольшой район значимых положительных трендов находится над морем Росса и между морями Росса и Амундсена, где значения тренда составляют до плюс 1—1,5 случаев за декаду.

Распределение обнаруженных циклонов по времени существования представлено на рис. 6. Время существования большинства случаев (85 %) не превышало 1 суток, среднее время существования составляет около 16 часов. Для наиболее интенсивных МПЦ время существования значительно выше, их среднее значение составляет около 28 часов, причем только половина существовала не более 1 суток.

Малое время существования обнаруженных циклонов отображается и в небольшом пройденном ими расстоянии, в 63 % случаев оно составляет менее 500 км (рис. 7). Расстояние более 1000 км прошли лишь около 9 % циклонов. Среднее значение составило 487 км. Для наиболее интенсивных случаев среднее значение также выше и составляет 869 км, только 24 % таких циклонов прошли менее 500 км и 33 % — более 1000 км.

На рис. 8 представлено распределение обнаруженных циклонов по средней скорости передвижения. Наиболее характерные скорости составляют от 4 до 10 м/с, максимальные — до 20 м/с. Среднее значение составило 8,7 м/с. Наиболее интенсивные МПЦ передвигаются несколько быстрее — их средняя скорость составила 9,2 м/с. В остальном их распределение схоже с представленным для всех случаев.

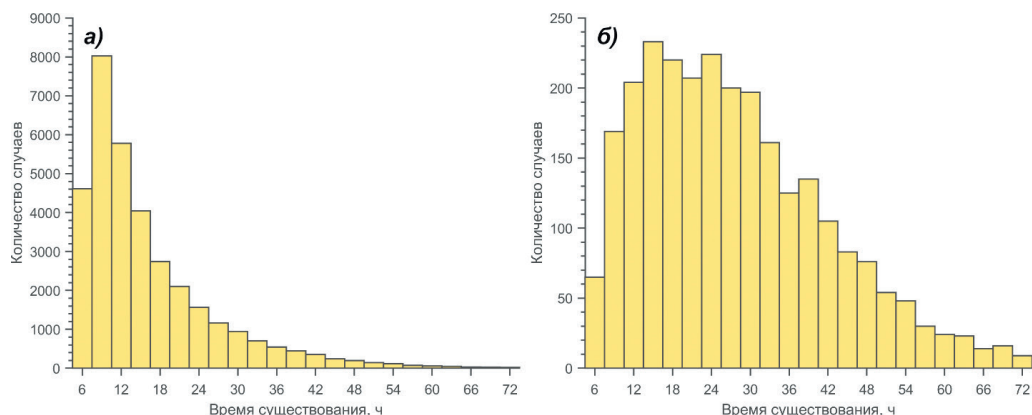


Рис. 6. Распределение обнаруженных МПЦ по времени существования.

а — для всех случаев, *б* — для наиболее интенсивных циклонов.

Fig. 6. Distribution of detected mesocyclones by lifetime.

a — for all cases, *b* — for most intense cyclones.

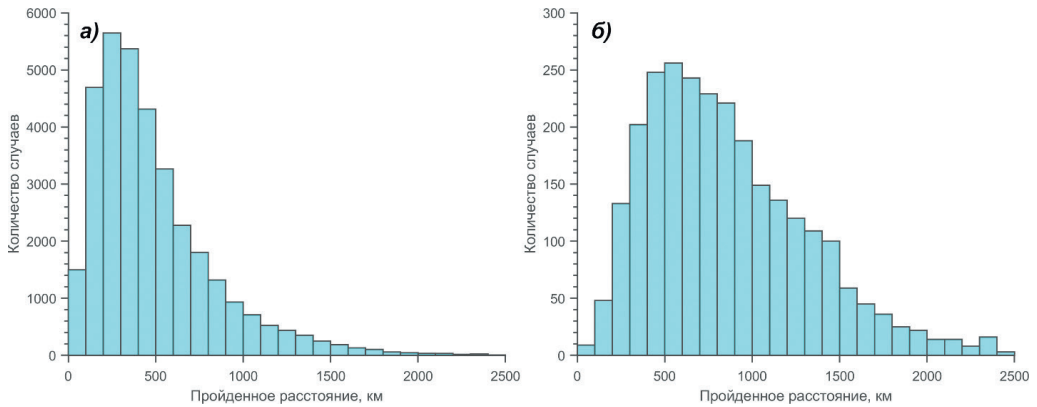


Рис. 7. Распределение обнаруженных МПЦ по пройденному расстоянию.

a — для всех случаев, *b* — для наиболее интенсивных циклонов.

Fig. 7. Distribution of detected mesocyclones by distance traveled.

a — for all cases, *b* — for most intense cyclones.

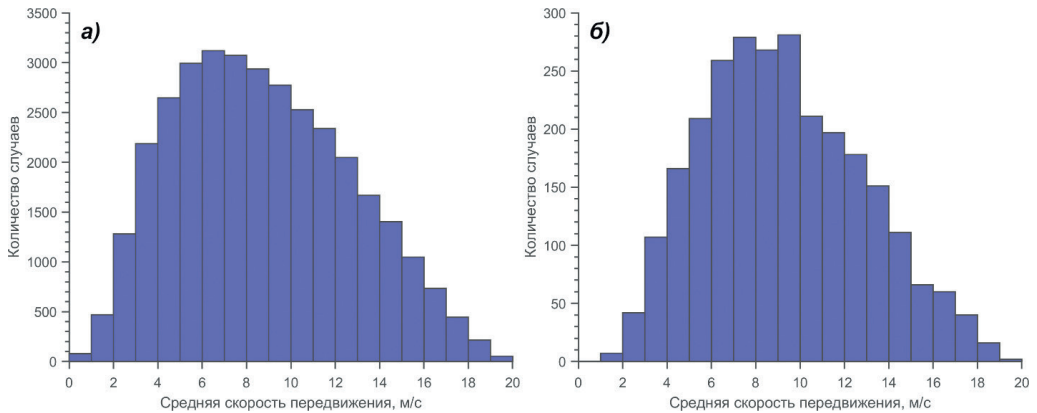


Рис. 8. Распределение обнаруженных МПЦ по средней скорости передвижения.

a — для всех случаев, *b* — для наиболее интенсивных циклонов.

Fig. 8. Distribution of detected mesocyclones by mean translation velocity.

a — for all cases, *b* — for most intense cyclones.

Заключение

В работе исследовалось пространственно-временное распределение и характеристики морских мезомасштабных полярных циклонов над Антарктикой за период 2000—2020 гг. Для этой цели использовались данные атмосферного реанализа ERA5. Циклоны находились в полях относительной завихренности на уровне 850 гПа, предварительно отфильтрованных со спектральным разрешением T40—T100. Детектирование и трекинг циклонов в таких полях осуществлялся с использованием автоматического алгоритма.

Всего за период исследования было найдено 34038 мезомасштабных полярных циклонов с использованием порогового критерия отфильтрованной относительной завихренности на уровне 850 гПа со значением -3×10^{-5} 1/с. Из них 2650 циклонов были выделены как наиболее интенсивные за счет того, что за время их существования были достигнуты значения относительной завихренности ниже, чем -6×10^{-5} 1/с. Межгодовая изменчивость количества всех циклонов составила около 10 %, а наиболее интенсивных — до 40 %. Большая часть найденных циклонов формировалась в летний и осенний периоды, что, вероятно, связано с существенно большей площадью свободной ото льда акватории в эти периоды. По сравнению с распределением, полученным для всех случаев, при рассмотрении наиболее интенсивных циклонов отдельно можно отметить, что доля циклонов, образующихся в зимний период, больше, что объясняется наличием больших контрастов между температурами воды и воздуха, необходимых для интенсификации циклонов.

Показано, что в западной части региона количество мезомасштабных циклонов больше, чем в восточной. Основные максимумы циклонической активности находятся над морями Беллингаузена и Амундсена. Для наиболее интенсивных МПЦ обнаружен основной максимум активности над морем Беллингаузена. Схожие районы максимальной активности циклонов отмечались ранее и в предыдущих работах [12, 14].

При анализе трендов изменения количества циклонов для различных регионов был выявлен ряд районов с положительными, но в большинстве случаев статистически незначимыми трендами. Основной район со значимыми величинами трендов до плюс 8 случаев за декаду расположен над морем Росса. В этом же районе, но меньше по площади, выявлены области со значимыми положительными трендами со значениями до 1,5 случаев за декаду и для наиболее интенсивных случаев.

Большая часть (85 %) из всех обнаруженных циклонов просуществовала не более 1 суток. Среднее время существования составило около 16 часов. Наиболее интенсивные случаи в среднем продолжались дольше — 28 часов. Среднее пройденное циклонами за время своего существования расстояние составило 487 км (869 км для наиболее интенсивных). Максимальная скорость передвижения обнаруженных циклонов составляет до 20 м/с, наиболее характерны значения от 4 до 10 м/с, среднее — 8,7 м/с (9,2 м/с для наиболее интенсивных).

В работе исследован достаточно длинный временной период, составляющий 21 год, но в последующих работах он может быть еще существенно продлен, в частности, данные реанализа ERA5 в настоящее время доступны с 1940 г. и регулярно обновляются. Кроме того, интерес для дальнейших исследований может представлять определение связи между количеством формирующихся мезомасштабных циклонов и значениями индексов антарктического и других климатических колебаний.

Список литературы

1. Rasmussen E. A., Turner J. Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions; Cambridge. UK. 2003. 612 p. doi: 10.1017/CBO9780511524974.

2. Stoll P., Graversen R. G., Noer G., et al. An objective global climatology of polar lows based on reanalysis data // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2018. Vol. 144(716). P. 2099—2117. doi: 10.1002/qj.3309.
3. Harold J. M., Bigg G. R., Turner J. Mesocyclone activity over the North-East Atlantic. Part 1: vortex distribution and variability // *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*. 1999. Vol. 19(11). P. 1187—1204. doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(199909)19:11<1187::AID-JOC419>3.0.CO;2-Q.
4. Noer G., Saetra Ø., Lien T., et al. Aclimatological study of polar lows in the Nordic Seas // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. Vol. 137(660). P. 1762—1772. doi: 10.1002/qj.846.
5. Rojo M., Claud C., Mallet P.-E., et al. Polar low tracks over the Nordic Seas: A 14-winter climatic analysis // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2015. Vol. 67(1). P. 24660. doi: 10.3402/tellusa.v67.24660.
6. Smirnova J., Golubkin P., Bobylev P., et al. Polar low climatology over the Nordic and Barents seas based on satellite passive microwave data // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42(13). P. 5603—5609. doi: 10.1002/2015GL063865.
7. Michel C., Terpstra A., Spengler T. Polar mesoscale cyclone climatology for the Nordic Seas based on ERA-Interim // *Journal of Climate*. 2018. Vol. 31(6). P. 2511—2532. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0890.1.
8. Golubkin P., Smirnova J., Bobylev L. Satellite-derived spatio-temporal distribution and parameters of North Atlantic polar lows for 2015—2017 // *Atmosphere*. 2021. Vol. 12(2). P. 224. doi: 10.3390/atmos12020224.
9. Heinemann G. Mesoscale vortices in the Weddell Sea region (Antarctica) // *Monthly Weather Review*. 1990. Vol. 118(3). P. 779—793. doi: 10.1175/1520-0493(1990)118<0779:MVITWS>2.0.CO;2.
10. Carrasco J. F., Bromwich D. H. Mesoscale cyclogenesis dynamics over the southwestern Ross Sea, Antarctica // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1993. Vol. 98(D7). P. 12973—12995. doi: 10.1029/92JD02821.
11. Carleton A. M., Song Y. Synoptic climatology, and intrahemispheric associations, of cold air mesocyclones in the Australasian sector // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1997. Vol. 102(D12). P. 13873—13887. doi: 10.1029/96JD03357.
12. Verezhenskaya P., Tilinina N., Gulev S., et al. Southern Ocean mesocyclones and polar lows from manually tracked satellite mosaics // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44(15). P. 7985—7993. doi: 10.1002/2017GL074053.
13. Uotila P., Pezza A. B., Cassano J. J., et al. A comparison of low pressure system statistics derived from a high-resolution NWP output and three reanalysis products over the Southern Ocean // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009. Vol. 114(D17). doi: 10.1029/2008JD011583.
14. Irving D., Simmonds I., Keay K. Mesoscale cyclone activity over the ice-free Southern Ocean: 1999—2008 // *Journal of Climate*. 2010. Vol. 23(20). P. 5404—5420. doi: 10.1175/2010JCLI3628.1.
15. Pezza A., Sadler K., Uotila P., et al. Southern Hemisphere strong polar mesoscale cyclones in high-resolution datasets // *Climate Dynamics*. 2016. Vol. 47. P. 1647—1660. doi: 10.1007/s00382-015-2925-2.
16. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146(730). P. 1999—2049. doi: 10.1002/qj.3803.
17. Смирнова Ю. Е., Голубкин П. А. Оценка доли полярных циклонов, воспроизводимых атмосферными реанализами, с использованием различных наборов данных. *Проблемы Арктики и Антарктики*, 2017. Т. 1. С. 97—108. doi: 10.30758/0555-2648-2017-0-1-97-108.

References

1. Rasmussen E. A., Turner J. *Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions*; Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003; 612 p. doi: 10.1017/CBO9780511524974.
2. Stoll P., Graversen R. G., Noer G., et al. An objective global climatology of polar lows based on reanalysis data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2018; 144(716): 2099—2117. doi: 10.1002/qj.3309.

3. Harold J. M., Bigg G. R., Turner J. Mesocyclone activity over the North-East Atlantic. Part 1: vortex distribution and variability. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*. 1999; 19(11): 1187—1204. doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(199909)19:11<1187::AID-JOC419>3.0.CO;2-Q.
4. Noer G., Saetra Ø., Lien T., et al. Aclimatological study of polar lows in the Nordic Seas. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011; 137(660): 1762—1772. doi: 10.1002/qj.846.
5. Rojo M., Claud C., Mallet P.-E., et al. Polar low tracks over the Nordic Seas: A 14-winter climatic analysis. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2015. 67(1): 24660. doi: 10.3402/tellusa.v67.24660.
6. Smirnova J., Golubkin P., Bobylev P., et al. Polar low climatology over the Nordic and Barents seas based on satellite passive microwave data. *Geophysical Research Letters*. 2015; 42(13): 5603—5609. doi: 10.1002/2015GL063865.
7. Michel C., Terpstra A., Spengler T. Polar mesoscale cyclone climatology for the Nordic Seas based on ERA-Interim. *Journal of Climate*. 2018; 31(6): 2511—2532. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0890.1.
8. Golubkin P., Smirnova J., Bobylev, L. Satellite-derived spatio-temporal distribution and parameters of North Atlantic polar lows for 2015—2017. *Atmosphere*. 2021; 12(2): 224. doi: 10.3390/atmos12020224.
9. Heinemann G. Mesoscale vortices in the Weddell Sea region (Antarctica). *Monthly Weather Review*. 1990; 118(3): 779—793. doi: 10.1175/1520-0493(1990)118<0779:MVITWS>2.0.CO;2.
10. Carrasco J. F., Bromwich D. H. Mesoscale cyclogenesis dynamics over the southwestern Ross Sea, Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1993; 98(D7): 12973—12995. doi: 10.1029/92JD02821.
11. Carleton A. M., Song Y. Synoptic climatology, and intrahemispheric associations, of cold air mesocyclones in the Australasian sector. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1997; 102(D12): 13873—13887. doi: 10.1029/96JD03357.
12. Verezemskaya P., Tilinina N., Gulev S., et al. Southern Ocean mesocyclones and polar lows from manually tracked satellite mosaics. *Geophysical Research Letters*. 2017; 44(15): 7985—7993. doi: 10.1002/2017GL074053.
13. Uotila P., Pezza A. B., Cassano J. J., et al. A comparison of low pressure system statistics derived from a high-resolution NWP output and three reanalysis products over the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009; 114(D17). doi: 10.1029/2008JD011583.
14. Irving, D., Simmonds, I., Keay, K. Mesoscale cyclone activity over the ice-free Southern Ocean: 1999—2008. *Journal of Climate*. 2010; 23(20): 5404—5420. doi: 10.1175/2010JCLI3628.1.
15. Pezza A., Sadler K., Uotila P., et al. Southern Hemisphere strong polar mesoscale cyclones in high-resolution datasets. *Climate Dynamics*. 2016; 47: 1647—1660. doi: 10.1007/s00382-015-2925-2.
16. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020; 146(730): 1999—2049. doi: 10.1002/qj.3803.
17. Smirnova J. E., Golubkin P. A. Estimating proportion of polar lows resolved by atmospheric reanalyses using different data sets. *Problemy Arktiki I Antarktiki = Problems of Arctic and Antarctic*. 2017; (1): (97—108). [In Russ]. doi: 10.30758/0555-2648-2017-0-1-97-108.

Информация об авторах

Голубкин Павел Андреевич, кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры океанологии Санкт-Петербургского государственного университета, научный сотрудник Научного фонда «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», pgo1ubkin@gmail.com.

Коляда Всеволод Сергеевич, младший научный сотрудник Научного фонда «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», jostersplus@gmail.com.

Смирнова Юлия Ефимовна, кандидат геогр. наук, научный сотрудник Научного фонда «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», julia.smirnova@niersc.spb.ru.

Information about authors

Golubkin Pavel Andreevich, PhD (Phys. Math. Sci.), St. Petersburg University, Associate Professor and Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, Researcher.

Kolyada Vsevolod Sergeevich, Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, Junior Researcher.

Smirnova Julia Efimovna, PhD (Geogr. Sci.), Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, Researcher.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 26.12.2024

Принята к печати после доработки 21.02.2025

The article was received on 26.12.2024

The article was accepted after revision on 21.02.2025

Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 20—41.
Hydrometeorology and Ecology. 2025;(78):20—41.

Научная статья
УДК 551.501.8:[551.593+535.3]:004.9
doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-20-41

Построение траектории распространения СВЧ-излучения в неоднородной атмосфере

*Владимир Юрьевич Жуков, Анатолий Дмитриевич Кузнецов,
Виктория Сергеевна Никитина, Ольга Станиславовна Сероухова,
Татьяна Евгеньевна Симакина*

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург,
Россия, kuznetsov1946@inbox.ru

Аннотация. В статье рассмотрены методика расчета вертикального профиля коэффициента преломления и его градиента, методики построения траектории распространения электромагнитного излучения в оптически неоднородной атмосфере с применением трех математических моделей, базирующихся на использовании закона распространения СВЧ-излучения в сферической оптически неоднородной атмосфере, на методах эффективного радиуса Земли и приведенного коэффициента преломления. Приведен алгоритм аппроксимации вертикальных профилей индекса коэффициента преломления. Произведена оценка временной изменчивости вертикального профиля индекса коэффициента преломления и повторяемости типов рефракции в тропосфере.

Ключевые слова: радиометеорология, рефракция, аппроксимация, метеорологические радиолокаторы.

Для цитирования: Жуков В. Ю., Кузнецов А. Д., Никитина В. С., Сероухова О. С., Симакина Т. Е. Построение траектории распространения СВЧ-излучения в неоднородной атмосфере // Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 20—41. doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-20-41.

Original article

Construction of the trajectory of microwave radiation propagation in an inhomogeneous atmosphere

*Vladimir Yu. Zhukov, Anatoly D. Kuznetsov, Victoria S. Nikitina,
Olga S. Seroukhova, Tatyana E. Simakina*

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Summary. The article discusses the calculation method of the vertical profile of the refractive index and its gradient, which determine the features of microwave radiation propagation in the troposphere. The methods for constructing the trajectory of electromagnetic radiation propagation in an optically inhomogeneous atmosphere and the approximation scheme for vertical profiles of the refractive index are investigated. The temporal variability of the vertical profile of the refractive index and the repeatability of refraction types in the troposphere are estimated based on the use of upper-air sounding data of the atmosphere at the

© Жуков В. Ю., Кузнецов А. Д., Никитина В. С., Сероухова О. С., Симакина Т. Е., 2025

Voeikovo station (St. Petersburg) for the period of 2019 (more than 700 soundings). It is shown that it is the variations in the vertical humidity profile that have the greatest impact on the type of refraction.

The article studies the method of constructing the trajectory of microwave radio wave propagation from meteorological radar stations in an inhomogeneous atmosphere using three mathematical models based on the law of microwave radiation propagation in a spherical optically inhomogeneous atmosphere, on the methods of the effective radius of the Earth and the reduced refractive index. Algorithms for their application to construct the trajectory of microwave radiation propagation in the troposphere are given.

Key words: radio meteorology, refraction, approximation, meteorological radars.

For citation: Zhukov V. Yu., Kuznetsov A. D., Nikitina V. S., Seroukhova O. S., Simakina T. E. Construction of the trajectory of microwave radiation propagation in an inhomogeneous atmosphere. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(78):(20—41). doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-20-41. (In Russ.).

Введение

Неоднородность и пространственно-временная изменчивость структуры атмосферы ограничивают возможности и точность радиотехнических систем дистанционного зондирования. Это в полном объеме относится и к системам радиометеорологического дистанционного зондирования. Среди факторов, влияющих на точность пространственной идентификации положения объектов при использовании метеорологических радиолокаторов, прежде всего, следует отметить такое явление как атмосферная рефракция.

Для повышения эффективности работы метеорологических радиолокационных станций СВЧ-диапазона и, в том числе, доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ) [1, 2], необходимо разработка методов (математических моделей) расчета фактического искривления траектории распространения радиолокационного импульса для повышения точности идентификации положения (координат) облачных образований. Такие модели призваны учесть характеристики рефракции над местом установки локатора на основе учета особенностей вертикальной стратификации атмосферы. Только в этом случае интерпретация метеорологической информации, полученной в процессе дистанционного радиолокационного зондирования, будет адекватно «привязана» к пространственным координатам объекта [3—6]. Параметры траектории, прежде всего, будут определяться вертикальным распределением градиента коэффициента преломления электромагнитного излучения в неоднородной атмосфере [7, 8].

Целью данной статьи является рассмотрение методики расчета вертикальных профилей индекса коэффициента преломления и его градиента, оценка их временной изменчивости и повторяемости типов рефракции в тропосфере. Для решения поставленных задач использовались данные аэрологического зондирования атмосферы на станции Воейково (Санкт-Петербург) за период 2019 г. (более чем 700 зондирований).

1. Траектория распространения радиолокационного импульса в атмосфере

Траектория распространения СВЧ-излучения зависит от фактического распределения с высотой градиента коэффициента преломления $dn(z)/dz$. В зависимости от среднего значения градиента коэффициента преломления в тропосфере

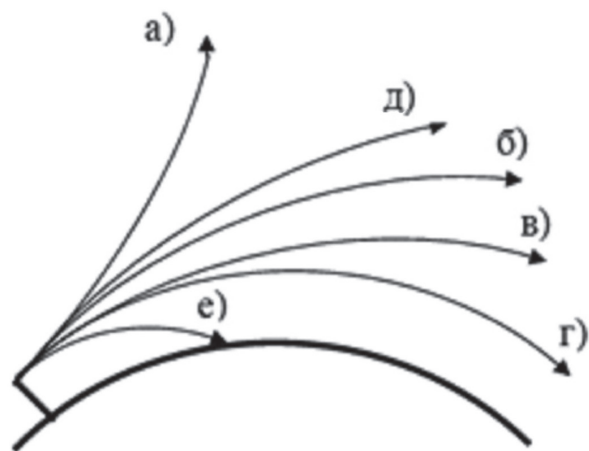


Рис. 1. Геометрия распространения электромагнитного излучения при различных видах рефракции в тропосфере.

Fig. 1. Geometry of electromagnetic radiation propagation with different types of refraction in the troposphere.

на рис. 1 схематически показаны наблюдаемые виды рефракции (здесь луч первоначально посылается при угле возвышения антенны, равном 0°) [8].

В табл. 1 дана расшифровка кода типа рефракции (рис. 1), соответствующее этому коду среднее значение градиента коэффициента преломления и названия типов рефракции.

Таблица 1

Значения буквенного кода и характеристика рефракции при различных значениях среднего градиента коэффициента преломления в тропосфере

Values of the letter code and the refraction characteristic at different values of the average gradient of the refractive index in the troposphere

| Код типа рефракции | Градиент коэффициента преломления $[dn/dz] = \text{м}^{-1}$ | Название рефракции |
|--------------------|---|--------------------|
| а | $dn/dz > 0$ | Отрицательная |
| д | $-4 \times 10^{-8} < dn/dz < 0$ | Пониженная |
| б | $dn/dz = -4 \times 10^{-8}$ | Нормальная |
| в | $-15,7 \times 10^{-8} < dn/dz < -4 \times 10^{-8}$ | Повышенная |
| г | $dn/dz = -15,7 \times 10^{-8}$ | Критическая |
| е | $dn/dz < -15,7 \times 10^{-8}$ | Сверхрефракция |

2. Расчет вертикального профиля коэффициента преломления и его градиента

Траектория распространения луча зависит от вертикального профиля градиента коэффициента преломления, который, в свою очередь, может быть определен

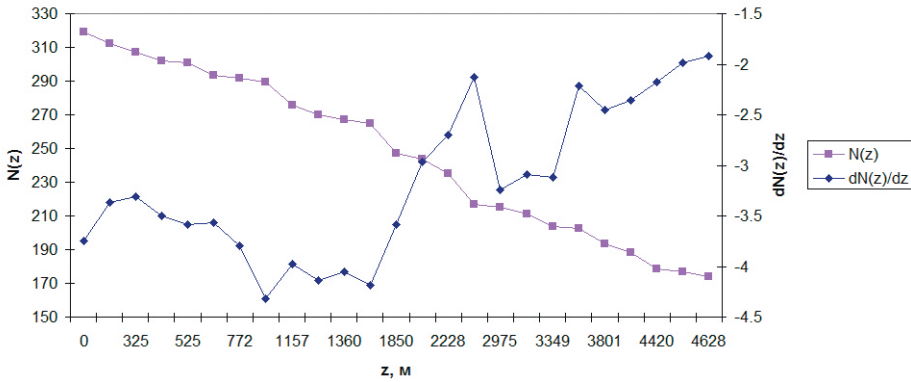


Рис. 2. Пример совместного представления вертикальных профилей индекса коэффициента преломления и его градиента.

Fig. 2. Example of joint representation of vertical profiles of refractive index and refractive index gradient.

только при известном вертикальном профиле коэффициента преломления $n(z)$ [1, 8 — 13], поэтому сначала рассмотрим методику расчета вертикального профиля $n(z)$.

Коэффициент преломления $n(z)$ в тропосфере определяется с помощью полуэмпирической формулы: [1, 12]

$$n(z) = 1 + \left[\frac{78.5}{T(z)} \left(p(z) + \frac{4800 e(z)}{T(z)} \right) \right] 10^{-6} = 1 + N(z) \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

где z — высота, p — атмосферное давление [гПа]; T — температура [°C]; e — парциальное давление водяного пара [гПа]; N — индекс коэффициента преломления.

При практическом использовании соотношения (1) для расчета вертикального профиля коэффициента преломления необходима информация о высотных профилях указанных выше метеорологических величин, полученная с помощью аэрологического зондирования атмосферы. При проведении расчетов использовались как непосредственно данные, получаемые на аэрологических станциях [14], так и вертикальные профили, задаваемые на регулярной вертикальной сетке с помощью сплайн-интерполяции [15].

На рис. 2 приведен пример вертикальных профилей индекса коэффициента преломления $N(z)$ и градиента индекса коэффициента преломления $dN(z)/dz$, рассчитанных по данным аэрологического зондирования атмосферы.

3. Оценка временной изменчивости вертикального профиля индекса коэффициента преломления и повторяемости типов рефракции в тропосфере

В реальной атмосфере вследствие изменений температуры, давления и влажности происходят сложные пространственно-временные изменения коэффициента

преломления [2, 4, 16, 17]. Рассмотрим производные уравнения (1), отражающие чувствительность индекса коэффициента преломления (ИКП) к изменению температуры, влажности и давления:

$$\frac{dN}{dT} = -\left[\frac{78,5p}{T^2} + \frac{2 \cdot 4800e}{T^3} \right], \quad \frac{dN}{de} = \frac{78,5 \cdot 4800}{T^2}, \quad \frac{dN}{dp} = \frac{78,5}{T}. \quad (2)$$

Количественные значения скорости изменения ИКП при подстановке характерных реальных значений температуры, влажности и давления представлены в виде диаграммы на рис. 3. Здесь приведены данные по «скорости» изменения ИКП на трех высотах в атмосфере: 0, 3 и 6 км. Цветными прямоугольниками показаны факторы влияния изменчивости температуры, давления и парциального давления водяного пара на индекс коэффициента преломления.

Зеленый прямоугольник отражает скорость изменения ИКП при изменении только влажности, тогда как температура и давление имеют значения, типичные для данной высоты. Цифры в прямоугольниках показывают насколько *N*-единиц изменится ИКП при изменении парциального давления на 1 гПа.

Красный и синий прямоугольники отражают влияние давления и температуры на «скорость» изменения коэффициента преломления. Понижение температуры с высотой вызывает небольшое уменьшение индекса преломления от 1 *N*-ед. на уровне моря до 0,7 *N*-ед. Изменение индекса преломления за счет падения давления наименьшее, и с высотой оно практически не меняется, составляя значение около 0,3 *N*-ед.

Из анализа рис. 3 следует, что наибольшее влияние на изменение величины ИКП оказывают вариации парциального давления водяного пара, причем это влияние несущественно увеличивается с высотой.

Высотное распределение метеорологических величин в тропосфере отличается большой изменчивостью. Следовательно, профиль градиента коэффициента преломления также будет испытывать резкие колебания. Это хорошо заметно при анализе высотного хода профилей, представленных на рис. 4. Графики построены

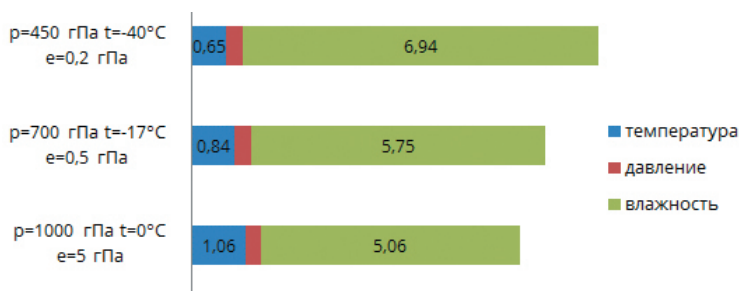


Рис. 3. Диаграмма распределения характерных значений dN/dT , dN/de и dN/dp для трех высот: 0, 3 и 6 км.

Fig. 3 Distribution diagram of characteristic values of dN/dT , dN/de and dN/dp for three altitudes: 0, 3 and 6 km.

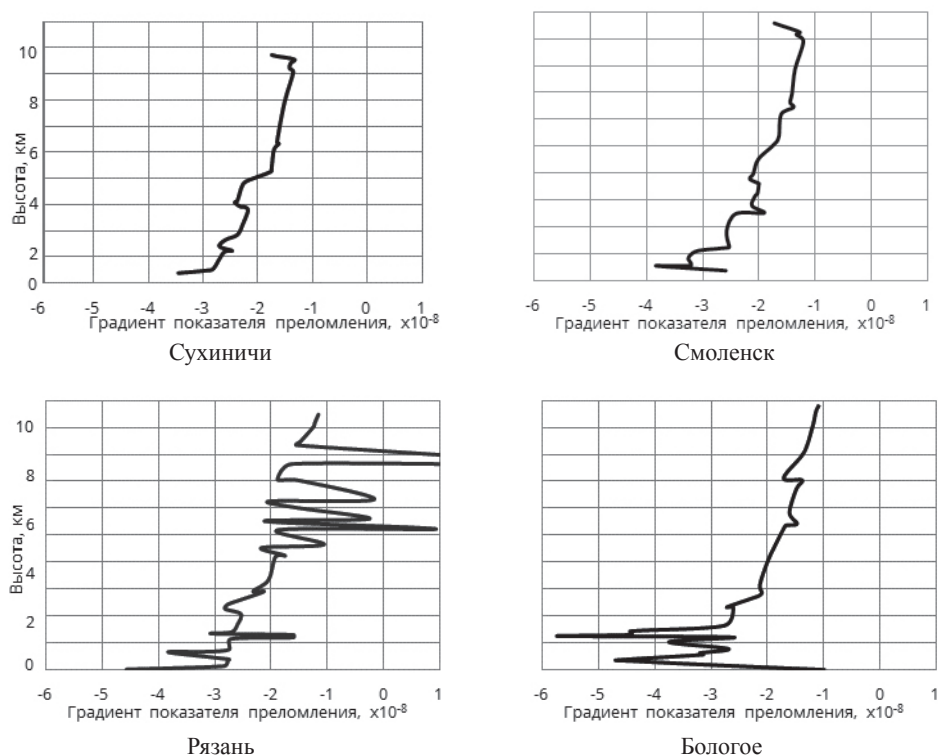


Рис. 4. Примеры вертикальных профилей градиента коэффициента преломления для 4-х станций аэрологического зондирования атмосферы.

Fig. 4 Examples of vertical profiles of the refractive index gradient for 4 aero logical atmospheric sounding stations.

по данным аэрологического зондирования на станциях Сухиничи, Смоленск, Рязань и Бологое [14].

Как видно из анализа кривых на рис. 4, среднее значение градиента коэффициента преломления во всей тропосфере не отражает всего многообразия вертикального распределения видов профилей градиента коэффициента преломления в этой области атмосферы. Для анализа повторяемости вертикального распределения видов рефракции в данной работе использовались результаты аэрологического зондирования на станции Воейково (Санкт-Петербург) за период 2019 г. (более чем 700 зондирований) [14].

Для определения типа рефракции использовались профили градиента индекса коэффициента преломления $N(z)$: dN/dz , где z — высота. Расчет этих профилей проводился на основе данных аэрологического зондирования атмосферы за 2019 г. (два зондирования в сутки), выполненного на станции Воейково (индекс *ULLI*), расположенной в Ленинградской области вблизи Санкт-Петербурга.

Таблица 2

Повторяемость различных видов тропосферной рефракции
Recurrence of different types of tropospheric refraction

| Вид рефракции | Повторяемость за год, % | Повторяемость за теплый период, % |
|----------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Отрицательная | 2,4 | 3,6 |
| Пониженная | 95,8 | 78 |
| Нормальная | 0,02 | 0,5 |
| Повышенная | 1,3 | 17,3 |
| Сверхрефракция | 0,4 | 0,6 |

Как видно из результатов анализа, в тропосфере в рассмотренном регионе градиенты, близкие к нормальной рефракции, наблюдаются редко: менее 0,02 % за весь год и 0,5 % в летний период. Градиенты подвержены сезонным изменениям. Так, например, пониженная рефракция хотя и преобладает, но ее повторяемость летом снижается с 95,8 % до 78 %. В летний период резко увеличивается количество слоев с повышенной рефракцией (с большей выпуклостью луча относительно нормальной рефракции) с 1,3 % до 17,3 %.

Для более детального анализа вертикальной структуры профиля рефракции для каждого зондирования просматривался весь профиль градиента коэффициента преломления и определялось число случаев наличия того или иного вида рефракции вне зависимости от высоты, на которой такой тип рефракции был обнаружен. Таким образом, во время одного зондирования может наблюдаться большое количество разных видов рефракции на разных высотах. Так, например, по результатам проведенного анализа количество наличия случаев нормальной рефракции на разных высотах составило менее 0,02 %. Распределение остальных случаев показано в табл. 3.

Таблица 3

Распределение градиента коэффициента преломления на высотах до 6 км по видам рефракции в Санкт-Петербурге

Distribution of the gradient of the refractive index at altitudes up to 6 km by types of refraction in St. Petersburg

| Вид рефракции | Градиент, 1/м | Количество случаев | Частота случаев, % |
|--------------------------|--|--------------------|--------------------|
| Отрицательная | > 0 | 909 | 2,4 |
| Положительная пониженная | < 0 и $> -4 \times 10^{-8}$ | 37019 | 95,8 |
| Нормальная | -4×10^{-8} | 7 | 0,02 |
| Положительная повышенная | $< -4 \times 10^{-8}$ и $> -15,7 \times 10^{-8}$ | 510 | 1,3 |
| Критическая | $-15,7 \times 10^{-8}$ | 0 | 0 |
| Сверхрефракция | $< -15,7 \times 10^{-8}$ | 140 | 0,4 |

Подавляющее большинство случаев, около 95 %, соответствует положительной пониженной рефракции. Около 1,3 % значений градиента коэффициента

преломления соответствуют наличию в вертикальных профилях слоев с положительной повышенной рефракцией, и только в 0,4 % случаев наблюдается наличие слоев со сверхрефракцией. В 2,4 % случаев было выявлено наличие слоев в атмосфере с отрицательной рефракцией.

Конечно, при рассмотрении тонкой структуры профиля градиента коэффициента преломления нужно учесть изменение вертикального сечения зондирующего импульса по мере его удаления от РЛС (для ДМРЛ уже на расстоянии 50 км такое сечение составляет около 1 км). Это приводит к «естественному» сглаживанию вертикального профиля градиента коэффициента преломления. Такое сглаживание с переменным размером по вертикали уменьшит флуктуации профиля и снизит их влияние на траекторию луча.

4. Аппроксимации вертикальных профилей индекса коэффициента преломления в атмосфере

Радиоклиматический режим тропосферы над определенной территорией влияет на точность расчета наклонной дальности до объекта в программном обеспечении радиолокационных систем. В связи с этим радиометеорологическое моделирование тропосферы в зоне обзора метеорологических радиолокаторов является одной из важных задач повышения эффективности и достоверности зондирования облачности и обнаружения опасных атмосферных явлений. Моделирование подразумевает аппроксимацию вертикального профиля коэффициента преломления, на основе которого может быть учтена рефракция в тропосфере.

При отсутствии информации о высотных профилях метеорологических величин для задания вертикального профиля коэффициента преломления используется стандартная радиоатмосфера, в которой наблюдается нормальная рефракция и коэффициент преломления изменяется с высотой по линейному закону, а его вертикальный градиент (dn/dz) оказывается равным $-4 \times 10^{-8} \text{ м}^{-1}$ во всей тропосфере [7].

При отличии вертикального распределения профилей метеорологических величин от стандартной радиоатмосферы закон изменения индекса коэффициента преломления с высотой может существенно отличаться от нормальной рефракции. В этом случае фактический профиль индекса коэффициента преломления можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью [7, 12]:

$$N(z) = N_0 e^{-\alpha z}. \quad (3)$$

При такой аппроксимации фактическая величина индекса коэффициента преломления N_0 может быть рассчитана по данным измерения значений p_0 , T_0 и e_0 , выполненным в месте расположения локатора (см. формулу (1)). Следовательно, численное значение N_0 можно считать известным. Тогда для аппроксимации вертикального профиля необходимо задать оптимальное значение коэффициента α с учетом его возможных пространственно-временных вариаций.

Рассмотрим методику определения оптимального значения коэффициента α в уравнении (3) для аппроксимации вертикальных профилей ИКП. Понятно, что

вследствие пространственно-временной изменчивости атмосферы оптимальное значение коэффициента α будет различаться для разных сезонов и разных пунктов. Рассмотрим алгоритм определения оптимального значения коэффициента α на примере двух пунктов размещения радиолокатора: в Санкт-Петербурге и Москве [16].

Методика определения оптимального значения коэффициента α будет основана на использовании ансамблей профилей аэрологического зондирования атмосферы с их пространственной и сезонной дифференциацией. По ансамблю данных аэрологического зондирования (вертикальные профили температуры, давления и влажности) производился расчет ансамбля вертикальных профилей индекса коэффициента преломления $N(z)$ [8, 12]:

$$N_v(z_j) = \left[\frac{78,5}{T(z_j)} \left(p(z_j) + \frac{4800 e(z_j)}{T(z_j)} \right) \right] \quad v=1, 2, \dots, n; \quad j=1, 2, \dots, m, \quad (4)$$

где v — число профилей метеорологических величин в ансамбле; m — число уровней, на которых заданы значения метеорологических величин.

Задавались максимальное значение коэффициента α_{\max} , минимальное значение α_{\min} и параметр k для определения шага изменения коэффициента $\Delta\alpha$

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{k}, \quad (5)$$

по формуле:

$$\alpha_i = \alpha_{\min} + \Delta\alpha \times i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, k. \quad (6)$$

Затем многократно рассчитывалась аппроксимация вертикальных профилей $N(z)$ со значениями коэффициентов α_i (ансамбль аппроксимационных профилей):

$$\hat{N}_i(z_j) = N_0 e^{-\alpha_i z_j}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, k; \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

После проведения расчетов со всеми $(k+1)$ значениями коэффициентов α_i производилось сравнение первого вертикального профиля $N_1(z)$ согласно (4) с $(k+1)$ значениями $\hat{N}_i(z)$ (см. формулу (7)). Для этого рассчитывались $(k+1)$ значений невязок между фактическим профилем $N(z)$ и его аппроксимацией:

$$E_i = \sum_{j=1}^m \left[N(z_j) - N_0 \times \exp(-\alpha_i z_j) \right]^2, \quad i = 0, 1, 2, \dots, k; \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (8)$$

Анализ невязок выполнялся по графику зависимости функции E_i в формуле (8) от аргумента i в диапазоне изменения коэффициента α в диапазоне $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$. При таком сравнении возможны три случая:

- рост значений функции E_i на всем отрезке $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$;
- убывание значений функции E_i без приближения к нулю;
- наличие выраженного одного или нескольких минимумов в значениях функции E_i на отрезке $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$.

В первом и втором случаях расчет повторялся с новым диапазоном коэффициентов $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$, сдвинутым вправо или влево в сторону ожидаемого минимума. Минимальное значение функции E_k можно уменьшить, если сузить диапазон изменения α и (или) уменьшить шаг изменения аргумента $\Delta\alpha$, и, тем самым, повысить точность аппроксимации.

Понятно, что при этом подходе оптимальные значения $\alpha_{\text{опт}}$ будут представлять собой ансамбль, состоящий из n значений (отдельно для каждого пункта и сезона), поэтому такой ансамбль усреднялся и оптимальное значение для каждого сезона и пункта определялось как:

$$\alpha_{\text{опт}}^{\text{ср}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \alpha_{\text{опт},j}. \quad (9)$$

В качестве примера рассмотрим результаты определения оптимальных значений коэффициента $\alpha_{\text{опт}}$ для двух пунктов: Санкт-Петербург и Москва. Были использованы данные аэрологического зондирования для слоя 0—6000 м за 2019 г. Результаты аппроксимации профилей ИКП по сезонам и по времени суток представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты аппроксимации профилей индекса коэффициента преломления по сезонам в двух пунктах

Results of approximation of refractive index profiles by seasons at two points

| Месяц | Срок | Санкт-Петербург | | | Москва | | |
|---------|------|------------------|-------------------------------|---------------|------------------|-------------------------------|---------------|
| | | $N(z)$ | СКО для $\alpha_{\text{опт}}$ | СКО для N_0 | $N(z)$ | СКО для $\alpha_{\text{опт}}$ | СКО для N_0 |
| январь | день | $314 e^{-0,12z}$ | 0,004 | 2,1 | $308 e^{-0,12z}$ | 0,003 | 1,7 |
| | ночь | $314 e^{-0,13z}$ | 0,004 | 1,3 | $308 e^{-0,12z}$ | 0,001 | 1,5 |
| апрель | день | $301 e^{-0,11z}$ | 0,008 | 9,5 | $303 e^{-0,12z}$ | 0,009 | 9,8 |
| | ночь | $311 e^{-0,12z}$ | 0,006 | 6,5 | $310 e^{-0,12z}$ | 0,009 | 5,0 |
| июль | день | $325 e^{-0,14z}$ | 0,008 | 7,2 | $312 e^{-0,13z}$ | 0,015 | 13,5 |
| | ночь | $330 e^{-0,14z}$ | 0,006 | 5,3 | $323 e^{-0,14z}$ | 0,010 | 6,5 |
| октябрь | день | $316 e^{-0,13z}$ | 0,005 | 4,5 | $317 e^{-0,13z}$ | 0,010 | 4,1 |
| | ночь | $319 e^{-0,13z}$ | 0,005 | 4,3 | $321 e^{-0,14z}$ | 0,009 | 5,5 |

Интервал изменения N_0 на высоте станции (начальный уровень) заключается в диапазоне 301—325 N-ед, т.е. очень близок на двух станциях. Значение параметра $\alpha_{\text{опт}}$ колеблется для различных сезонов в более широких пределах. Для Санкт-Петербурга этот диапазон составляет 0,11—0,16, что немногим больше, чем для Москвы (0,11—0,14). На рис. 5 представлен спектр распределения коэффициента для двух станций.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что рассмотренная методика дает возможность восстановить профиль ИКП в различных пунктах расположения радиолокатора по наземным данным о температуре, влажности и давлении в различные сезоны в отсутствие аэрологических данных после проведения соответствующего исследования для определения оптимальных значений коэффициента α в формуле (3).

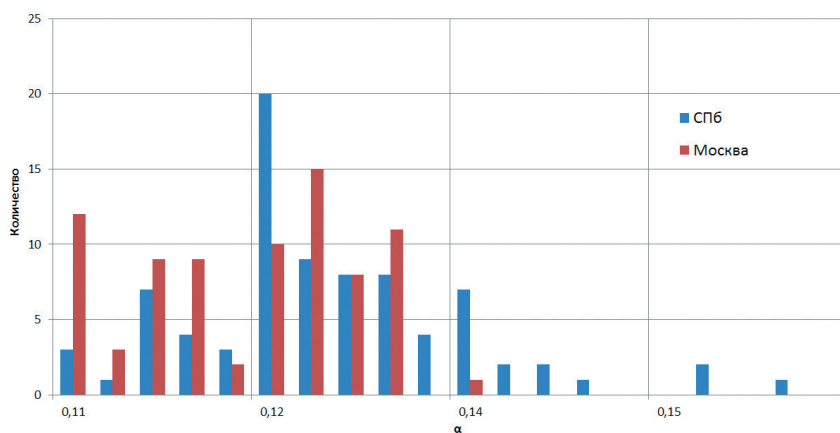


Рис. 5. Распределение значений параметра $\alpha_{\text{опт}}$ на двух станциях.

Fig. 5. Distribution of parameter values $\alpha_{\text{опт}}$ at two stations.

5. Построение математической модели траектории распространения электромагнитного импульса в неоднородной атмосфере

5.1. Расчет траектории распространения СВЧ-излучения в сферической атмосфере

Использовалась аналитическая модель распространения луча, означающая закон преломления для сферически слоистой среды и включающая в себя геометрию распространения луча (рис. 6) [4, 8].

На рис. 6 использованы следующие обозначения: α — угол места антенны; φ — угол преломления радиолуча; γ — угол падения радиолуча; l — длина луча в каждом слое атмосферы; dR — добавка к радиусу Земли R (в данном случае составляет 100 м); n — значение коэффициента преломления в каждом слое; β — угол между радиус-вектором и направлением луча в каждом слое; B, C, D — точки перехода радиолуча между границами двух слоев атмосферы.

Траектория луча в сферически слоистой атмосфере, согласно закону преломления, определяется уравнением [1, 4, 8]:

$$n(r) \cdot r \cdot \sin \gamma(r) = \text{const}, \quad (10)$$

где n — коэффициент преломления; r — радиус-вектор, проведенный из центра Земли в точку преломления луча; γ — угол преломления луча на границе двух слоев.

Правая часть данного уравнения у поверхности Земли принимает следующий вид:

$$n(r) \cdot r \cdot \sin \gamma(r) = n(R_3) \cdot R_3 \cdot \sin \gamma(R_3), \quad (11)$$

где R_3 — радиус Земли; $n(R_3) = n_0$ — значения коэффициента преломления у поверхности Земли; $\gamma(R_3) = \gamma_0$ — угол между нормалью к поверхности Земли и направлением луча.

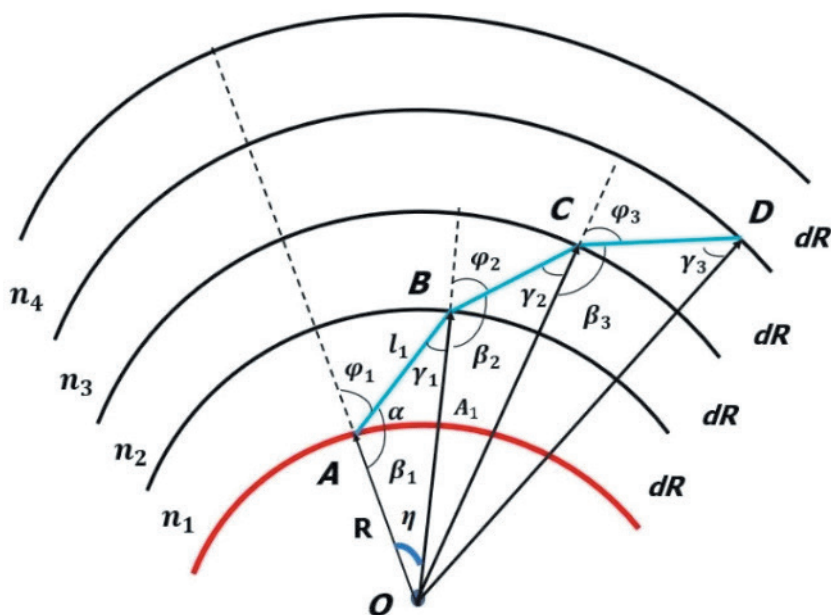


Рис. 6. Геометрическая модель распространения радиолуча в сферически слоистой атмосфере (пояснения в тексте).

Fig. 6. Geometric model of radio beam propagation in a spherically layered atmosphere (explanations in the text).

Уравнение (11) позволяет построить аналитическую модель распространения радиолуча в слоях атмосферы, которая сводится к решению простейшей геометрической задачи. За основу была взята геометрия распространения луча, изображенная на рис. 6. Далее для решения данной задачи атмосфера определялась в виде последовательных слоев по вертикали с шагом 100 м. В каждом из слоев коэффициент преломления предполагался равным константе.

Моделируемый луч выходил из гипотетического источника (антенны), находящегося под определенным углом места: $\gamma(R_3)$, который впоследствии изменялся на $\gamma(r)$, $r > R_3$. Затем с помощью геометрических преобразований определялись углы падения и преломления радиолуча при переходе через границу двух соседних слоев с различными значениями коэффициентов преломления.

Структура такой модели, подробно рассмотренная в работе [4], позволяет произвести расчет углов падения и преломления радиолуча при изменении коэффициентов преломления в различных слоях атмосферы. Такой подход позволяет определить траекторию распространения луча в атмосферных слоях при наличии фактического вида радиорефракции в каждом слое.

С помощью рис. 6 и путем соответствующих геометрических преобразований можно показать, что в каждом k -м слое атмосферы угол преломления радиолуча будет определяться в соответствии со следующим выражением:

$$\sin \phi_k = \frac{n_{k-1}}{n_k} \frac{[R + (k-2)dR] \sin \phi_{k-1}}{R + (k-1)dR}. \quad (12)$$

Для расчета погрешностей, которые различные типы рефракции вносят в определение координат цели, определялась наклонная дальность, которая складывалась из суммы длин луча в каждом слое атмосферы. Длина луча в каждом k -ом слое может быть найдена по формуле:

$$l_k = \frac{[R + (k-1)dR] \sin(\beta_k + \gamma_k)}{\sin \gamma_k}. \quad (13)$$

Тогда наклонная дальность имеет вид:

$$L = l_1 + l_2 + \dots + l_n = L = \sum_{i=1}^n l_i. \quad (14)$$

Высота точек перехода луча через границу двух последовательных слоев атмосферы может быть определена следующим образом:

$$H_k = kdR. \quad (15)$$

где k — порядковый номер слоя атмосферы. Представленная модель позволяет производить расчеты влияния различных типов рефракции на разных высотах в атмосфере на искривление траектории распространения луча.

Остановимся на рассмотрении полученных в этом случае результатах.

Для оценки погрешностей, которые различные типы рефракции вносят в определение координат исследуемой цели, был построен высотный профиль распределения коэффициента преломления от 0 до 10 км, при котором наблюдалось искривление траектории луча, соответствующее нормальной рефракции. В дальнейшем относительно данной модели рассчитывались погрешности при изменении типа рефракции в различных слоях атмосферы.

В процессе расчета искусственно изменялись значения углов места источника луча, а также было сделано предположение о том, что истинная наклонная дальность L для исследуемой цели составляет 200 км.

Прежде всего, путем линейной интерполяции было определено, что при стандартной рефракции и наклонной дальности 200 км при угле места 2° высота обнаружения цели $H_{об}$ составила 9224 м. Затем стандартная рефракция заменялась на три типа рефракции (соответственно — пониженная, сверхрефракция или отрицательная) в указанных в таблицах 5 и 6 слоях атмосферы по следующему принципу:

- в нижнем слое от 0 до 1500 м (три типа рефракции), далее — стандартная;
- средний слой от 1600 до 3500 м (три типа рефракции), выше и ниже — стандартная;
- верхний слой от 3600 до 5500 (три типа рефракции), выше и ниже — стандартная.

Затем определялась высота обнаружения цели при фиксированной наклонной дальности 200 км при двух значениях угла места: $0,5^\circ$ и 2° . Погрешность

вычислялась как разница между эталонным значением, соответствующим стандартной рефракции, и ее текущим значением. Результаты этого исследования отражены в приведенных ниже таблицах 5 и 6.

Таблица 5

Погрешности высоты обнаружения цели для угла места антенны $0,5^\circ$ ($H_{об} = 4029$ м)

Target detection altitude errors for antenna elevation angle of 0.5° ($H_{cl} = 4029$ м)

| Тип рефракции в изменяемом слое | $dN/dz, \text{ м}^{-1}$ | Слой, м | Высота, м | Погрешность $\Delta H, \text{ м}$ |
|---------------------------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------------------------------|
| Пониженная | -2×10^{-6} | 0—1500 | 4303 | +274 |
| | | 1600—3500 | 4117 | +88 |
| | | 3600—5500 | 4031 | +2 |
| Сверхрефракция | -20×10^{-6} | 0—1500 | — | — |
| | | 1600—3500 | 3283 | -716 |
| | | 3600—5500 | 4018 | -11 |
| Отрицательная | 4×10^{-6} | 0—500 | 5050 | +1021 |
| | | 1600—3500 | 4374 | +345 |
| | | 3600—5500 | 4033 | +4 |

Таблица 6

Погрешности высоты обнаружения цели для угла места антенны 2° ($H_{об} = 9258$ м)

Target detection altitude errors for antenna elevation angle 2° ($H_{cl} = 9258$ м)

| Тип рефракции в изменяемом слое | $dN/dz, \text{ м}^{-1}$ | Слой, м | Высота, м | Погрешность $\Delta H, \text{ м}$ |
|---------------------------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------------------------------|
| Пониженная | -2×10^{-6} | 0—1500 | 9364 | +140 |
| | | 160—03500 | 9353 | +129 |
| | | 3800—5500 | 9248 | +24 |
| Сверхрефракция | -20×10^{-6} | 0—1500 | 7995 | -1269 |
| | | 1600—3500 | 8130 | -1094 |
| | | 3800—5500 | 8668 | -556 |
| Отрицательная | 4×10^{-6} | 0—1500 | 9781 | +557 |
| | | 1600—3500 | 9718 | +494 |
| | | 3800—5500 | 9482 | +258 |

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при отличии рефракции от стандартного типа, погрешности высоты обнаружения цели наблюдаются во всех слоях атмосферы, причем в случае сверхрефракции значения погрешностей максимальны.

Однако, следует отметить, что максимальное значение погрешностей при каждом типе рефракции наблюдается в нижнем слое атмосферы. Из этого можно сделать вывод, что тропосфера, являющаяся «фабрикой погоды» и отличающаяся большими градиентами метеорологических величин, оказывает наибольшее влияние на трансформацию радиолуча. Следовательно, при производстве радиолокационных наблюдений рефракция и метеопараметры, на нее главным образом влияющие, должны быть учтены, особенно в нижних слоях атмосферы.

5.2. Расчет траектории распространения СВЧ-излучения с использованием метода эквивалентного радиуса Земли

Рефракцию в атмосфере можно учесть введением эквивалентного радиуса Земли R_3 . Метод эквивалентного радиуса сводит задачу криволинейного распространения радиоволн к задаче с прямолинейным распространением [8]. Для этого криволинейную траекторию луча как бы «разгибают», изменяя радиус Земли до тех пор, пока траектория луча не станет прямолинейной. Полученный таким образом радиус сферы называют эквивалентным радиусом Земли R_3 , который представлен на рис. 7.

Значение эквивалентного радиуса Земли определяет следующее соотношение:

$$R_{\text{эkv}} = \left[\frac{1}{R_3} + \frac{1}{n_0} \frac{dn}{dz} \right]^{-1}, \quad (16)$$

где $R_3 = 6373$ км — радиус Земли, n_0 — значение коэффициента преломления у поверхности, dn/dz — средний градиент коэффициента преломления в тропосфере [8].

Введение эквивалентного радиуса Земли позволяет записать закон преломления в следующем виде:

$$\sin \phi_0 = \left[1 + z(1/R_3) \right] \sin \phi(z). \quad (17)$$

Если луч послан параллельно Земле (нулевой угол возвышения антенны, а высота антенны над Землей равна нулю), то

$$(R_3 + z_{\text{об}})^2 = R_3^2 + L_{\text{накл.д.}}^2, \quad (18)$$

где R_3 — эквивалентный радиус Земли, $z_{\text{об}}$ — высота объекта, $L_{\text{накл.д.}}$ — наклонная дальность (расстояние от локатора до объекта).

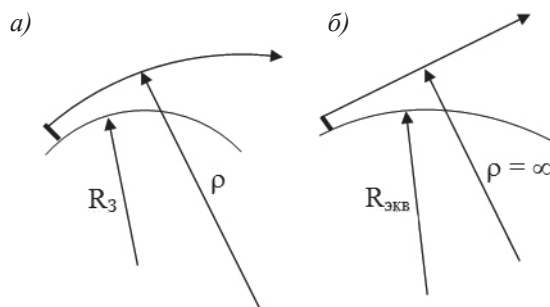


Рис. 7. Геометрическая модель распространения радиолуча в сферически слоистой атмосфере (а) и в сферически слоистой атмосфере при использовании метода эквивалентного радиуса Земли (б); ρ — радиус кривизны траектории.

Fig. 7. Geometric model of radio beam propagation in a spherically layered atmosphere (a) and in a spherically layered atmosphere using the equivalent Earth radius method (b); ρ is the radius of curvature of the trajectory.

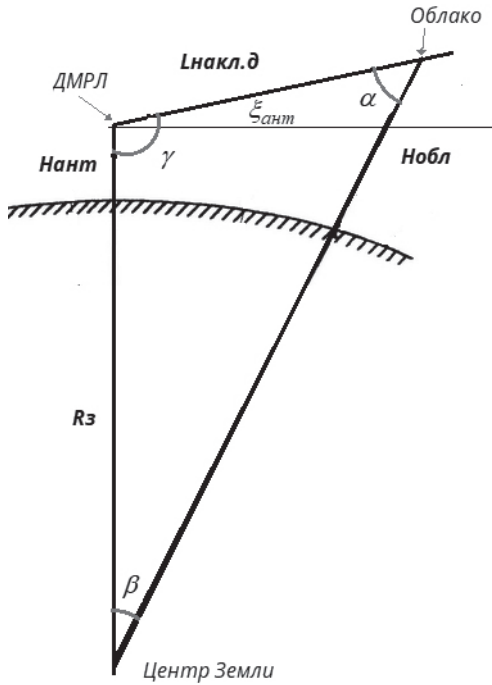


Рис. 8. К расчету наклонной дальности без учета рефракции.

Fig. 8 To the calculation of slant range in the absence of refraction.

При отсутствии рефракции путь луча от ДМРЛ до облака, т.е. наклонная дальность, определяется следующим соотношением:

$$L_{\text{накл.д.}} = (R_з + H_{\text{обл}}) \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}, \quad (19)$$

где α , β – углы, показанные на рис. 8.

При этом выполняются следующие соотношения:

$$\beta = 180^\circ - (\gamma + \alpha), \quad (20)$$

$$\gamma = 90^\circ + \xi_{\text{ант}}, \quad (21)$$

$$\sin \alpha = \frac{R_з + H_{\text{ант}}}{R_з + H_{\text{обл}}} \sin \gamma, \quad (22)$$

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{R_з + H_{\text{ант}}}{R_з + H_{\text{обл}}} \sin \gamma \right), \quad (23)$$

где $\xi_{\text{ант}}$ — угол места антенны; $H_{\text{ант}}$, $H_{\text{обл}}$ — высоты антенны и облака соответственно. При учете рефракции длина искривленной траектории радиолокационного

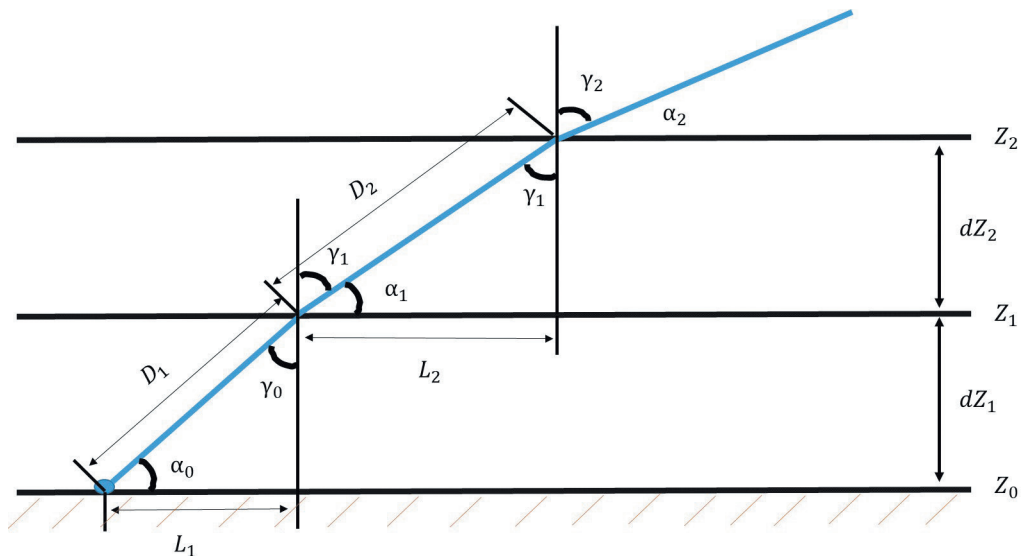


Рис. 9. Геометрическая модель распространения радиолуча в слоистой плоскопараллельной атмосфере при использовании метода приведенного коэффициента преломления.

Fig. 9. Geometric model of radio beam propagation in a layered plane-parallel atmosphere using the reduced refractive index method.

импульса от ДМРЛ до облака будет определяться теми же соотношениями, но в них радиус Земли R_z необходимо заменить на эквивалентный радиус R_s (см. формулу (16)).

5.3. Расчет траектории распространения СВЧ-излучения с использованием метода приведенного коэффициента преломления

Еще одним подходом к построению траектории распространения луча в оптически неоднородной атмосфере является использование приведенного коэффициента преломления [8]. В этом случае появляется возможность построения траектории не над сферической, а над плоской земной поверхностью. Такой подход к построению траектории в целом ряде случаев является более удобным для дальнейшей интерпретации.

Метод приведенного коэффициента преломления заключается в переходе от использования закона преломления для сферической атмосферы (см. формулу (2) и рис. 3) к закону преломления для плоскопараллельной слоистой атмосферы, в которой отсутствуют горизонтальные неоднородности (см. рис. 9). В этом случае вместо соотношения (2) будет использоваться следующее уравнение:

$$n_p \sin \gamma = \text{const}, \tag{24}$$

где n_p — приведенный коэффициент преломления; γ — угол преломления луча на границе двух слоев. Прохождение лучом различных слоев атмосферы для этого случая представлено на рис. 9.

Расчет профиля приведенного коэффициента преломления производится по следующей формуле:

$$n_p(z) = n(z) + \frac{z}{R_3}, \quad (25)$$

где $n(z)$ — коэффициент преломления атмосферы на высоте z , R_3 — радиус Земли.

Структура такой модели позволяет построить траекторию распространения луча, но уже над плоской поверхностью.

1. Разбиваем плоскопараллельную атмосферу (см рис. 9) на $(n+1)$ слой толщиной dz_i , $i = 0, 1, \dots, n$.

2. Находим высоту границ каждого слоя z_i : $z_0 = 0$,

$$z_i = \sum_{j=1}^i dz_j; \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (26)$$

3. По формуле (1) рассчитываем среднее значение коэффициента преломления для каждого слоя с границами по высоте $[z_i, z_{i+1}]$, $i = 0, 1, \dots, n$: $n(z_i, z_{i+1})$, используя средние значения $p(z_i, z_{i+1})$, $T(z_i, z_{i+1})$ и $e(z_i, z_{i+1})$ в этом слое.

4. По формуле (25) пересчитываем среднее значение коэффициента преломления для каждого слоя $n(z_i, z_{i+1})$ в приведенное значение коэффициента преломления $n_p(z_i, z_{i+1})$.

5. Траектория распространения излучения в плоскопараллельной неоднородной атмосфере представлена на рис. 9.

Для первого слоя будет выполняться следующее соотношение:

$$n_p(z_0, z_1) \sin \gamma_0 = n_p(z_1, z_2) \sin \gamma_1. \quad (27)$$

Тогда для угла преломления получаем:

$$\gamma_1 = \arcsin \left[\frac{n_p(z_0, z_1) \sin \gamma_0}{n_p(z_1, z_2)} \right], \quad (28)$$

а для наклонной дальности D_1 и удаления точки пересечения границы второго слоя от начальной точки L_1

$$D_1 = \frac{dz_1}{\cos \gamma_0}, \quad L_1 = D_1 \sin \gamma_0. \quad (29)$$

Угол падения на границу второго слоя α_1 будет равен:

$$\alpha_1 = 90^\circ - \gamma_1. \quad (30)$$

Для последующих слоев (рассмотрим только второй слой) схема расчетов будет следующей:

$$n_p(z_1, z_2) \sin \alpha_1 = n_p(z_2, z_3) \sin \gamma_2, \quad (31)$$

$$\gamma_2 = \arcsin \left[\frac{n_p(z_1, z_2) \sin \alpha_1}{n_p(z_2, z_3)} \right], \quad (32)$$

$$D_2 = \frac{dz_2}{\cos \alpha_1}, \quad L_1 = D_2 \sin \alpha_1, \quad (33)$$

$$\alpha_2 = 90^\circ - \gamma_2. \quad (34)$$

Для иллюстрации возможностей рассмотренного подхода для построения траектории луча в неоднородной атмосфере была создана программа для ПЭВМ, реализующая рассмотренный ранее алгоритм. На рис. 10 представлены изменения траектории луча при трех постоянных значениях градиента коэффициента преломления. На горизонтальном удалении в 300 км за счет искривления траектории луча различие в высоте его нахождения составляет более 3,5 км.

Заклучение

Проведенные исследования позволили обосновать влияние различных типов рефракции на траекторию распространения луча и, как следствие, на погрешности при определении координат интересующей цели, установить зависимости между величинами вышеупомянутых погрешностей от угла места источника луча и типов рефракции.

Предложенные в работе методики построения траектории распространения луча в неоднородной атмосфере позволили наглядно продемонстрировать влияние различных видов рефракции на изменение высоты луча над земной поверхностью по мере его удаления от МРЛ, проводить моделирование траектории распространения радиолуча в сферически слоистой атмосфере при различных типах рефракции.

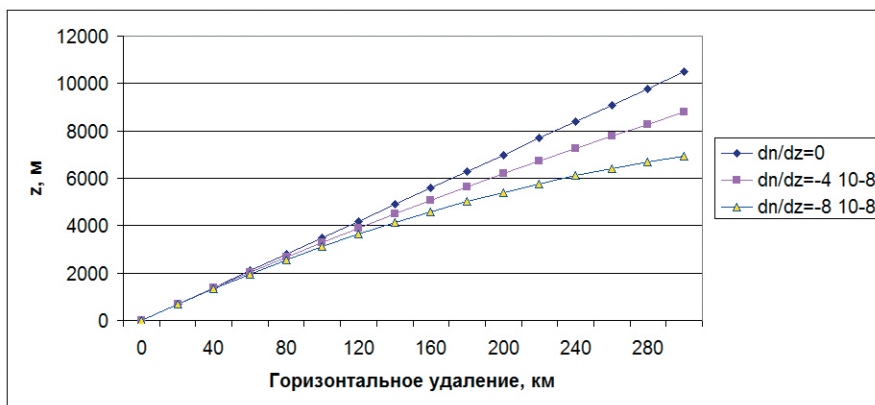


Рис. 10. Траектория луча при трех постоянных градиентах коэффициента преломления.

Fig. 10. Ray trajectory for three constant refractive index gradients.

Кроме того, рассмотренные подходы к учету рефракции могут существенно упростить и решение других прикладных задач радиометеорологии: оценку влияния рефракции на траекторию распространения в атмосфере импульсного объема, оценку влияния погрешностей в задании количественных характеристик рефракции на точность определения радиолокационными средствами высоты метеорологических объектов и др.

Список литературы

1. Zen Y, Blahak U., Neuper M., Jerger D. Radar Beam Tracing Methods Based on Atmospheric Refractive Index. // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2014. Vol. 31. Issue 12. P. 2650—2670.
2. Жуков В. Ю., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С. Интерпретация данных доплеровских метеорологических радиолокаторов. СПб.: изд. РГГМУ. 2016. 118 с.
3. Кузнецов А. Д., Симакина Т. Е., Крюкова С. В., Саенко А. Г. Влияние погрешностей радиолокационной пеленгации аэрологических радиозондов на точность ветрового зондирования // Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 407—419. doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-407-419.
4. Жуков В. Ю., Кузнецов А. Д., Никитина В. С. Моделирование влияния рефракции на определение координат цели при производстве радиолокационных наблюдений // Труды ВКА А. Ф. Можайского. 2023. Вып. 688. С. 55—61.
5. Базлова Т. А., Бочарников Н. В., Брылёв Г. Б. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети. СПб.: Гидрометеоздат. 2002. 331 с.
6. Базлова Т. А., Бочарников Н. В., Брылёв Г. Б. Радиолокационные метеорологические наблюдения. СПб.: Наука, 2010. 516 с.
7. Мещеряков А. А., Госенченко С. Г., Кижнер Л. И. Влияние изменчивости индекса преломления тропосферы на дальность прямой видимости и погрешности измерения координат радиолокационных целей // Известия Томского государственного университета. Математика и механика. Физика. 2011. Т. 318. № 2. С. 59—63.
8. Восканян К. Л., Жуков В. Ю., Крюкова С. В. и др. Атмосферная рефракция радиоволн СВЧ-диапазона. СПб.: изд. РГГМУ. 2024. 102 с.
9. Dettwiller L. Study of the lateral shift due to atmospheric refraction: alternative analytical methods // Journal of the Optical Society of America. 2024. Vol. 41. Issue 7. P. 1310—1318/ <https://doi.org/10.1364/JOSAA.522962>.
10. Lewis O., Brunt C., Kitchen M. A new method of retrieving atmospheric refractivity structure. // International Journal of Remote Sensing 2023. Vol. 44. P. 749—785.
11. Elhassan I. M. Practical evaluation of atmospheric refraction effect on surveying observations // World Journal of Engineering Research and Technology. 2022. Vol. 8, Issue 12. P. 20—28.
12. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии (Радиометеорология). Л.: Гидрометиздат. 1966. 350 с.
13. Заболотный Н. С., Голдина В. Н. Использование математических моделей для определения показателя преломления атмосферы // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1987. № 2. С. 30—33.
14. University of Wyoming. College of Engineering. Department of Atmospheric Science. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://weather.uwyo.edu/> (дата обращения: 05.09.2023).
15. Гурский Д. А., Турбина Е. С. Вычисления в Mathcad 12. СПб.: Питер. 2006. 544 с.
16. Kuznetsov A., Seroukhova O., Simakina T., Kryukova S. The vertical profile of the refraction coefficient for microwave radiation in the troposphere and its variability // Journal of Physics: Conference Series. 2021. P. 74—83. 012008, IOP Publishing. doi: 10.1088/1742-6596/1991/1/012008.
17. Островский Е. В., Фридзон М. Б. Тонкая структура вертикального профиля влажности, влияющая на распространение радиоволн в тропосфере // Научный вестник МГТУ ГА. Серия «Радиофизика и радиотехника». 2008. № 133. С. 30—39.

References

1. Zeng Y., Blahak U., Neuper M. et al. Radar Beam Tracing Methods Based on Atmospheric Refractive Index. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2014; (31): 2650—2670.
2. Zhukov V. Yu., Kuznetsov A. D., Seroukhova O. S. *Interpretaciya dannyx doplerovskix meteorologicheskix radiolokatorov = Interpretation of Doppler Weather Radar Data*. St. Petersburg. RSHU Publishing House, 2016: 118 p. (In Russ.).
3. Kuznetsov A. D., Simakina T. E., Kryukova S. V. et al. Influence of Errors in Radar Direction Finding of Aerological Radiosondes on the Accuracy of Wind Sounding. *Gidrometeorologiya i e'kologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2023; (72): (407—419). (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-407—419.
4. Zhukov V. Y., Kuznetsov A. D., Nikitina V. S. Modeling the influence of refraction on the determination of target coordinates during radar observations. *Trudy VKA A. F. Mozhajskogo = Proceedings of the A. F. Mozhaisky Military Space Academy*. 2023; (688): (55—61). (In Russ.).
5. Bazlova T. A. Bocharnikov N. V., Brilev G. B. *Meteorologicheskie avtomatizirovannye radiolokacionnye seti = Meteorological automated radar networks*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2002: 331 p. (In Russ.).
6. Bazlova T. A., Bocharnikov N. V., Brilev G. B. *Radiolokacionnye meteorologicheskie nablyudeniya = Radar meteorological observations*. SPb.: Nauka, 2010: 516 p. (In Russ.).
7. Meshcheryakov A. A., Gosenchenko S. G., Kizhner L. I. The influence of variability of the refractive index of the troposphere on the line-of-sight range and errors in measuring the coordinates of radar targets. *Izvestiya Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mexanika. Fizika = Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and Mechanics. Physics*. 2011; 318(2): (59—63). (In Russ.).
8. Voskanyan K. L., Zhukov V. Yu., Kryukova S. V. et al. *Atmosfera'naya refrakciya radiovoln SVCh-diapazona = Atmospheric refraction of microwave radio waves*. St. Petersburg: RSHU, 2024: 102 p. (In Russ.).
9. Dettwiller L. Study of the lateral shift due to atmospheric refraction: alternative analytical methods, and new results. *Journal of the Optical Society of America*. 2024; 41(7): 1310—1318 doi: 10.1364/JOSAA.522962.
10. Lewis O., Brunt C., Kitchen M. A new method of retrieving atmospheric refractivity structure. *International Journal of Remote Sensing*. 2023; (44): 749—785.
11. Ismat M. E. Practical evaluation of atmospheric refraction effect on surveying observations. *World Journal of Engineering Research and Technology*. 2022; 8(12): 20—28.
12. Stepanenko V. D. *Radiolokaciya v meteorologii (Radiometeorologiya) = Radar in meteorology (Radiometeorology)*. L.: Gidrometizdat, 1966: 350 p. (In Russ.).
13. Zabolotny N. S., Goldina V. N. Using mathematical models to determine the refractive index of the atmosphere. *News of universities. Geodesy and aerial photography*. 1987; (2): (30—33).
14. University of Wyoming. *College of Engineering. Department of Atmospheric Science*. Available at: <http://weather.uwyo.edu/> (accessed on: 9.05.2023).
15. Gursky D. A., Turbina E. S. *Vychisleniya v Mathcad 12 = Calculations in Mathcad 12*. St. Petersburg: Piter, 2006: 544 p. (In Russ.).
16. Kuznetsov A., Seroukhova O., Simakina T. et al. The vertical profile of the refraction coefficient for microwave radiation in the troposphere and its variability. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 74—83. doi:10.1088/1742-6596/1991/1/012008.
17. Ostrovsky E. V., Fridzon M. B. Fine structure of the vertical humidity profile affecting the propagation of radio waves in the troposphere. *Nauchnyj vestnik MGTU GA, seriya Radiofizika i radiotekhnika = Scientific Bulletin of MSTU GA, Radiophysics and Radio Engineering series*. 2008; (133): (30—39). (In Russ.).

Сведения об авторах

Жуков Владимир Юрьевич, д-р физ.-мат. наук, доцент, Российский государственный гидрометеорологический университет, профессор, vuzhukov2002@list.ru.

Кузнецов Анатолий Дмитриевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Российский государственный гидрометеорологический университет, профессор, kuznetsov1946@inbox.ru.

Никитина Виктория Сергеевна, аспирант, Российский государственный гидрометеорологический университет», victoriaflint01@gmail.com.

Сероухова Ольга Станиславовна, канд. физ.-мат. наук, доцент, Российский государственный гидрометеорологический университет, доцент, serouhova@inbox.ru.

Симакина Татьяна Евгеньевна, канд. физ.-мат. наук, доцент, Российский государственный гидрометеорологический университет, доцент, tatiana.simakina@gmail.com.

Information about authors

Zhukov Vladimir Yuryevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor. Russian State Hydrometeorological University, Professor, vuzhukov2002@list.ru.

Kuznetsov Anatoly Dmitrievich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor. Russian State Hydrometeorological University, Professor, kuznetsov1946@inbox.ru.

Nikitina Victoria Sergeevna, Postgraduate Student. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State Hydrometeorological University, Postgraduate Student, victoriaflint01@gmail.com.

Seroukhova Olga Stanislavovna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Russian State Hydrometeorological University, Associate Professor, serouhova@inbox.ru.

Simakina Tatyana Evgenyevna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Russian State Hydrometeorological University, Associate Professor, tatiana.simakina@gmail.com.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 22.01.2025

Принята к печати 25.02.2025

The article was received on 22.01.2025

The article was accepted on 25.02.2025

Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 42—65.
Hydrometeorology and Ecology. 2025;(78):42—65.

ОКЕАНОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 004.8:[556.54:551.461.2](268.52)
doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-42-65

О применении нейронных сетей в задачах оперативного прогнозирования уровня воды в акватории Обской губы

Яромир Игоревич Ангулович, Юрий Алексеевич Татаренко

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
Россия, yaromir.angudovich@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке и применению новой модели для прогнозирования колебаний уровня воды в акватории Обской губы — ключевой зоны транспортировки нефтепродуктов по Северному морскому пути. Модель SSA-LR-LSTM объединяет методы сингулярного спектрального анализа, линейной регрессии и нейронных сетей с долгой краткосрочной памятью (LSTM). Гибридный метод позволяет учитывать сложные взаимосвязи между метеорологическими параметрами и уровнем воды. Выполнено моделирование гидрологического режима Обской губы с ежечасной дискретностью, что позволило прогнозировать уровень воды с заблаговременностью до 12 часов. Результаты показали, что нейронная модель точно описывает основные тенденции и закономерности исходного ряда, значительно снижает ошибку и повышает точность прогнозирования.

Ключевые слова: нейронные сети, машинное обучение, уровень воды, прогнозирование, компьютерное моделирование, Обская губа.

Для цитирования: Ангулович Я. И., Татаренко Ю. А. О применении нейронных сетей в задачах оперативного прогнозирования уровня в акватории Обской губы // Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 42—65. doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-42-65.

OCEANOLOGY

Original article

On the application of neural networks in the tasks of operational water level forecasting in the Gulf of Ob

Yaromir I. Angudovich, Yuri A. Tatarenko

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

Summary. The article is devoted to the development and application of a new model for predicting water level fluctuations in the Gulf of Ob, a key area for the transportation of petroleum products in the

© Ангулович Я. И., Татаренко Ю. А., 2025

Northern Sea Route. The SSA-LR-LSTM model combines methods of singular spectral analysis (Caterpillar-SSA), linear regression, and long-term short-term memory (LSTM) neural networks. The hybrid method allows for the consideration of complex relationships between meteorological parameters and water levels. The use of a bidirectional layer (BiLSTM) allowed the network to better assimilate information and describe complex patterns between input variables. The model was tested in real conditions and implemented for operational support of navigation in the area of the village of cape Kamenny. The hydrological regime of the Gulf of Ob was modeled with hourly discreteness, which made it possible to predict the water level up to 12 hours in advance. It is shown that the use of the Caterpillar-SSA method works effectively to smooth out meteorological characteristics and highlight the trend and periodic component in daily fluctuations in water levels. Refinement of forecast values using linear regression minimizes the amplitude error of tidal and surge fluctuations. The results showed that the neural model accurately describes the main trends and patterns of the initial series, and the use of modern machine learning technologies significantly reduces error and improves prediction accuracy. The experiments performed showed the smallest model validation error when using 3 hidden LSTM layers and one BiLSTM layer with 128 neurons. It has been shown that when the lead time is increased by more than 12 hours, the validation error increases significantly.

Keywords: neural networks, machine learning, water level, forecasting, computer modeling, gulf of Ob.

For citation: Angudovich Ya. I., Tatarenko Yu. A. On the application of neural networks in the tasks of operational level forecasting in the Gulf of Ob. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(78):(42—65). doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-42-65. (In Russ.).

Введение

В условиях современных глобальных климатических изменений Арктика с каждым годом приобретает всё большее экономическое значение. Новые методы сбора, обработки и анализа данных все чаще используются для решения различных задач арктических районов, в том числе более широкое распространение получают нейросетевые алгоритмы. Несмотря на то, что самым ценным в Арктике остаётся человеческий потенциал, современные технологии позволяют в значительной степени упростить расчеты и сделать их эффективнее. В настоящее время нейронные сети используются во многих сферах человеческой деятельности: от информационных систем до промышленного производства. Одним из ключевых направлений в Арктике, имеющим наиболее важное экономическое значение, является непрерывное обеспечение судового транспортного коридора. Ежегодно по Северному морскому пути (СМП) перевозят огромные запасы нефтепродуктов, сжиженный природный газ, полезные ископаемые и различное продовольствие. Обеспечение эффективности в судовых грузоперевозках во многом зависит от заблаговременного принятия грамотного решения в транспортно-логистических операциях и от достоверности гидрометеорологических прогнозов, в том числе оперативных прогнозов колебаний уровня воды.

В акватории Обской губы, у поселка мыс Каменный, круглогодично с 2016 г. проводятся наблюдения за уровнем моря с целью оперативного обеспечения судоходства и функционирования терминала беспричальной отгрузки нефти «*Ворота Арктики*». Разработка прогностической модели уровня для Обской губы является нетривиальной задачей. На ее результат влияет мелководность района, сильная внутрисезонная изменчивость уровня и мощные стонно-нагонные явления, в три раза превышающие по амплитуде приливные колебания [1]. Прогнозированию колебаний уровня в Обской губе посвящено довольно много работ.

Одной из фундаментальных для настоящего исследования является работа [2], в которой описан комбинированный метод оперативного прогнозирования с использованием трехмерной гидродинамической совместной модели циркуляции и льдов Северного Ледовитого океана AARI—IOCM [3] и предвычисления приливных колебаний по методике [4]. Использование данной модели получило широкое распространение в полярных широтах благодаря её адаптированности к системе циркуляции вод Северного Ледовитого океана. По мнению авторов модели, вероятность того, что ошибка прогнозируемого уровня в районе мыса Каменный с заблаговременностью прогноза 12 часов не превысит ± 5 см, составляет 44 %. С увеличением допустимой ошибки до ± 10 см, вероятность ошибки увеличивается примерно в полтора раза и составляет 74 %.

Фундаментальные работы [5—6] посвящены исследованию структуры непериодических колебаний уровня в арктических морях. Авторами выявлены типы барических образований над акваторией Обской Губы, а также предложена методология расчета сгонно-нагонных колебаний в различных пунктах СМП на основе эмпирических прогностических уравнений. В основе методологии лежит использование эмпирических зависимостей колебаний уровня с анемобарическим режимом. Весьма успешно модель проявила себя у мыса Ям-Сале, расположенного в южной части Обской губы, вблизи устья реки Обь. Позже результаты были подтверждены в работе [7]. Авторы, применив гармонический анализ приливов по МНК [8—9], выявили связь уровня на гидрологическом посту Ям-Сале с градиентами атмосферного давления между о. Белый и Усть-Енисейским портом. Результаты показали существенный прогностический потенциал такой связи с заблаговременностью до 18 часов.

В основу исследований [10] легла также работа [5]. Использование ежечасных наблюдений за колебаниями уровня показало, что изменчивость непериодических колебаний в Обской губе у мыса Каменный варьируется в широких пределах. Однако попытка авторов построить модель на статистической основе с точностью до ± 5 см и заблаговременностью до 3—9 часов оказалась неудачной. Градиентный метод прогнозирования уровня с помощью осциляции давления в различных точках, подробно описанный в работе [6], также существенно не улучшил оправдываемость прогнозов. Отметим, что авторы [10] заметили высокую инерционность колебаний уровня Обской губы, однако применение инерционного метода прогнозирования показало, что он способен воспроизвести будущие колебания уровня с оправдываемостью 90 % только на первые 2 часа.

Помимо гидродинамического моделирования и статистического подхода к решению прогнозов колебаний уровня в Обской губе, активно проводились исследования по внедрению комплексных систем, одной из которых является CARDINAL [11]. Комплекс позволяет моделировать нестационарные гидродинамические процессы, распространение растворенных и взвешенных загрязняющих веществ, температуру, соленость и транспорт донных наносов. Для решения гидродинамических моделей система использует численные конечно-разностные методы. Использование данной системы во многом обосновано простотой реализации двумерной задачи по прогнозированию колебаний уровня, а также удобным

развитым интерфейсом. Попытка реализации комплекса CARDINAL в работе [12] позволила достаточно неплохо смоделировать основные тенденции хода уровня и фазовые переходы приливных колебаний. Поочередное включение атмосферного воздействия и касательного напряжения ветра значительно улучшало результаты. Однако при моделировании сгонно-нагонных колебаний модель выдавала серьезную ошибку. Кроме того, реализация комплекса CARDINAL нуждалась в высоком разрешении сетки, что практически невозможно при отсутствии больших вычислительных мощностей. Вследствие этого результаты, полученные в ходе исследований, не позволяют оперативно обеспечивать судоходство в районе мыса Каменный.

Похожий модельный комплекс Delft3D был адаптирован для акватории Обской губы в работе [13]. Комплекс представляет собой модульную структуру, позволяющую подключать к расчету различные блоки в зависимости от решаемой задачи. Для акватории Обской губы авторами построена расчетная сетка с пространственным разрешением до 50 м, а также были заданы поля метеорологических элементов, включающих в себя атмосферный форсинг. Валидация расчетов колебаний уровня проводилась за летний период 2016 г. При этом модельные расчеты приливных колебаний полностью совпали по фазе с фактическими значениями. Несмотря на различия в амплитуде колебаний, комплекс Delft3D оказался приемлемым для навигационных нужд. Однако авторы отметили, что максимальная ошибка в 30 см не обеспечивает достаточной точности для оперативного обеспечения судоходства и модель требует дополнительного подбора управляющих параметров.

В связи с этим разработка новой модели колебаний уровня для акватории Обской губы является бесспорно актуальной задачей. Весьма перспективной представляется идея применения нейронных моделей в прогнозировании уровня, хотя она до настоящего времени не имеет строгой методологии, а большинство исследований выполняется в экспериментальных рамках. Так, работа [14] направлена на повышение точности прогнозирования уровня в прилегающих морях Китая. Авторам удалось существенно добиться увеличения точности прогнозирования, применяя методику гибридной модели сингулярного спектрального анализа (англ. SSA — Singular spectrum analysis), известного также как метод «Гусеница» [15—16], совместно с рекуррентными нейронными сетями с длинной краткосрочной памятью (Long Short-Term Memory — LSTM) [17—19].

Аналогичным образом сети LSTM применялись и в настоящей работе. С помощью метода SSA авторы преобразовали исходный одномерный ряд в многомерный вектор данных с последующим применением метода главных компонент [20]. Результаты показали, что использование данного метода разложения при прогнозировании одномерного ряда колебаний уровня существенно увеличивает оправдываемость прогнозов в сравнении с классическим применением моделей LSTM для одномерного ряда. После проведения многочисленных экспериментов модельные расчеты смогли описать 98 % дисперсии исходного ряда. Однако полученная авторами модель характеризуется малой заблаговременностью, всего на 1 шаг вперед, а увеличение заблаговременности сильно сказывается

на оправдываемости прогнозов. Авторами работы [21] проводились успешные эксперименты по воспроизведению с помощью модели LSTM динамической системы атмосфера-океан, которая представляет собой нелинейную, хаотичную динамику модели Lorenz63. В ходе экспериментов установлена очевидная зависимость увеличения ошибки валидации модели при увеличении заблаговременности.

Аналогичный метод составления гибридных моделей был описан в работе [22]. Авторы дополнили свёрточную нейронную сеть CNN (англ. Convolution Neural Network) [23—25] моделью LSTM для анализа пространственных зависимостей колебаний уровня в северной и экваториальной частях Тихого океана. Это позволило получить наименьшую ошибку при валидации. Разработанная модель на основе матрицы колебаний уровня исследуемого района прогнозирует будущие значения для каждого установленного узла сетки. Выходным прогнозом является карта распределения средних для следующего месяца значений колебаний уровня. При этом в сравнении с классическим методом LSTM время, затрачиваемое на машинное обучение, более чем в 2 раза больше при использовании разработанной гибридной модели и составляет 18 часов. По мнению авторов, разработанный метод может быть применен не только в других локальных регионах, но и в глобальном масштабе, что, несомненно, повышает ее значимость для арктического сектора.

В задачах гидрометеорологии высокий приоритет имеет прогноз траектории движения исследуемой характеристики для анализа ее изменчивости в будущем с заданной дискретностью и заблаговременностью. В работе [26] перед авторами стояла цель тестирования алгоритмов машинного обучения по среднесуточным колебаниям уровня воды в реке Тисе в центральной Европе за период 2006—2020 гг. для составления прогностической траектории изменчивости уровня в течение последующих семи дней. Применение модели LSTM позволило получить наилучшие результаты для заданных временных диапазонов, чем классическая модель персептрона [27—28]. Так, 68,5—76,1 % прогнозов оправдались в заданных интервалах точности.

Целью работы является построение гибридной модели, основанной на совмещенном применении метода сингулярного спектрального анализа (SSA), линейной регрессии и нейронной модели долгой-краткосрочной памяти LSTM (англ. Long Short—Term Memory), а также реализация её для акватории Обской губы в районе мыса Каменного. Отметим, что полученная в данном исследовании модель уже является рабочим прототипом, помогающим в составлении ежедневных оперативных прогнозов с заблаговременностью 12 часов с декабря 2023 г.

1. Материалы и методы

1.1. Гидрографические особенности Обской губы

Объект исследования — акватория Обской губы в районе поселка мыс Каменный (рис. 1), которая является крупным эстуарием Оби и заливом Карского моря, расположенным между полуостровами Ямал и Гыданский на северо-западе

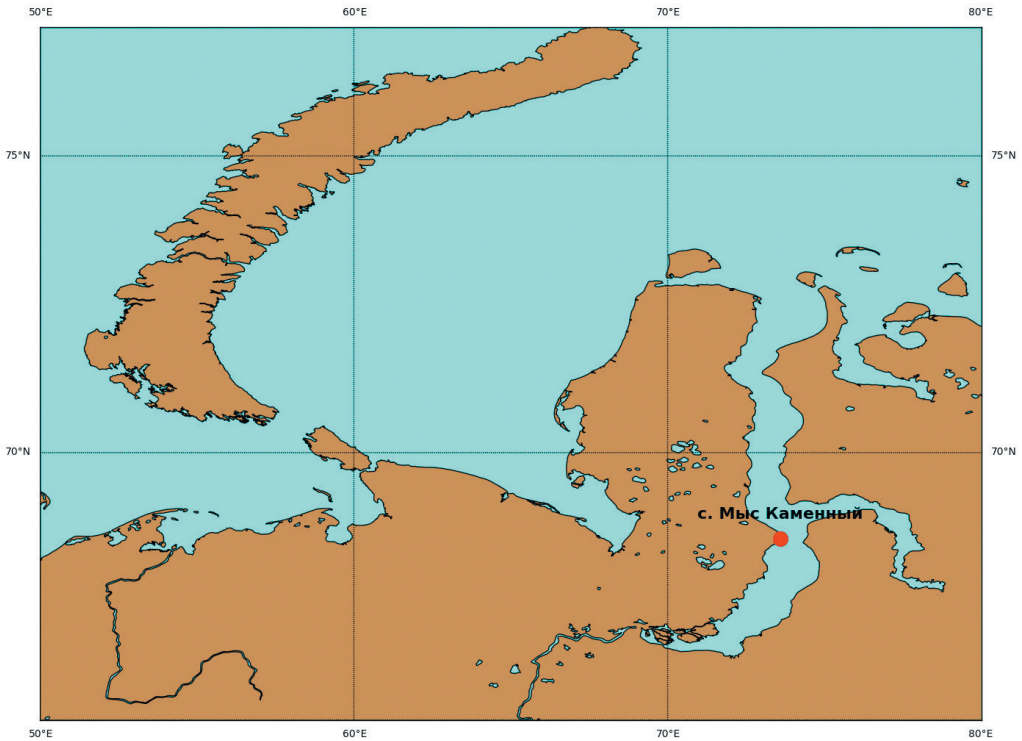


Рис. 1. Район исследования. Село мыс Каменный. Обская губа.

Fig. 1. The research area. The village of cape Kamenny. The Gulf of Ob.

Сибири. Обская губа омывает берега Ямало-Ненецкого автономного округа и простирается примерно на 800 км вдоль побережья. Максимальная ширина залива составляет около 50—60 км, а берега покрыты тундрой и заболочены, что характерно для арктической зоны. Данный регион характеризуется суровым арктическим климатом. Зимние температуры могут опускаться до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, а летом редко превышают $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Обская губа является одним из важнейших источников пресноводного стока в Арктике. Вода имеет низкую соленость из-за большого притока пресной воды р. Оби, причем ежегодный объем стока в Карское море достигает 530 км^3 [29—31]. Гидрологический режим во многом осложнен системой взаимодействия речного стока, морских приливов и ветровых воздействий, что делает данный регион особенно сложным для реализации прогностической модели. Тем не менее, амплитуда самих приливных колебаний невелика и обычно не превышает одного метра.

Важной особенностью гидрологического режима Обской губы является сильная внутрисезонная изменчивость. Её основными факторами служат речной сток, приливные явления, значительный атмосферный форсинг, проявляющийся в виде стонно-нагонных явлений, которые по амплитуде в 2—3 раза превышают

приливные колебания [1]. Формирование сгонно-нагонных колебаний в Обской губе сильно зависит от барических образований над акваторией. Центры циклонов, расположенных к востоку от губы, вызывают нагонные северные ветра, а антициклоны, центры которых находятся к западу, — сгонные южные ветра [32]. Бесспорно, одним из важнейших факторов, влияющих на внутрисезонную изменчивость, является ледовый покров. Большую часть года акватория Обской губы покрыта однолетним льдом. Формирование устойчивого ледового покрова начинается в первой половине октября, а его окончательное становление в среднем приходится на ноябрь [33]. Максимальное развитие припайного льда наблюдается в апреле-мае, а средняя толщина льда на конец апреля достигает 1,4—1,7 м [34]. Разрушение ледового покрова начинается в южной части Обской губы и приходится на конец мая. Только в начале июня в северной части под воздействием сильных ветров и волнения взламывается припай [35]. После становления устойчивого льда формируется подлёдный пограничный слой, который замедляет приливную волну и делает её значительно слабее. За счёт этого уменьшается как высота самого прилива, так и скорость приливных течений [2].

Отметим, что Обская губа имеет важное экономическое значение. Через неё проходит Северный морской путь, связывающий порты Европы и Азии через окраинные моря Северного Ледовитого океана. Залив также служит базой для рыболовства и добычи полезных ископаемых, таких как нефть и газ. В последние годы наблюдается увеличение интереса к развитию инфраструктуры в регионе, включая строительство портов и терминалов для транспортировки углеводородов, одним из которых как раз и является нефтеналивной терминал «*Ворота Арктики*» у поселка мыс Каменный.

1.2. Исходные данные

В качестве входных данных для нейронной модели использовались показания гидрометеорологических приборов, установленных в районе поселка мыс Каменный. Беспроводная метеостанция DAVIS Instruments Vantage Pro 2, предназначенная для измерения и мониторинга погодных условий, передаёт основные метеорологические характеристики на специально разработанный портал. Метеостанция фиксирует множество параметров атмосферы и выбор тех или иных параметров зависит от поставленной задачи. В числе основных предикторов использовались ежечасные измерения направления и скорости ветра, давления и температуры воздуха (табл. 1). Отметим, что учитывались только максимальные порывы скорости ветра за час наблюдений, так как они отражают динамические изменения в атмосфере, которые могут быть связаны с турбулентностью, фронтальными зонами, конвективными процессами и другими атмосферными явлениями. Средняя скорость ветра сглаживает эти изменения, за счёт чего теряется часть важной информации по внутренней структуре ряда, которая могла быть полезной для повышения точности прогнозирования.

Мгновенные данные уровня воды поступали с регистрационно-передающей системы МП-РПС-01 на специальный web-портал. Датчик установлен на жесткой

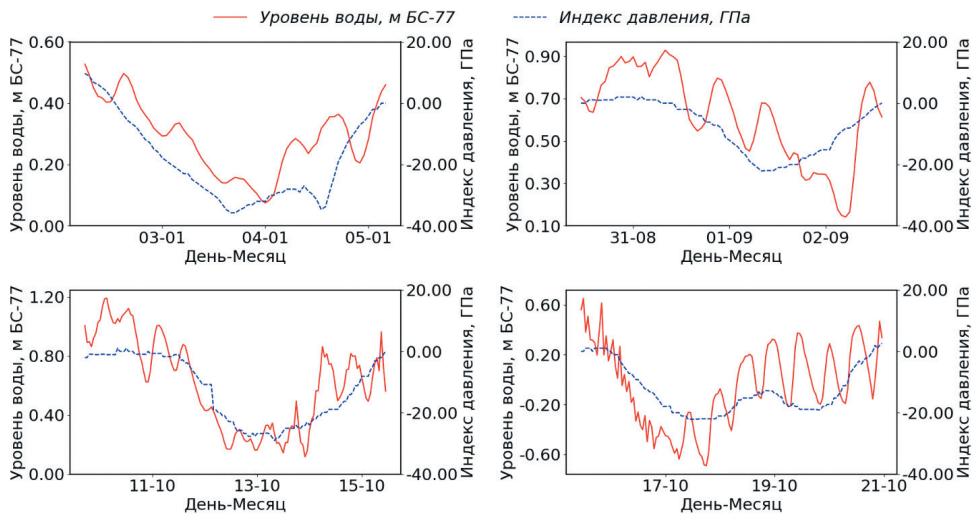


Рис. 2. Сопоставление взаимосвязи колебаний уровня в Обской губе с градиентом давления между Ханты-Мансийском и портом Сабетта при его отрицательной фазе.

Fig. 2. Comparison of the relationship of the level fluctuations in the Gulf of Ob with the pressure gradient between Khanty-Mansiysk and the port of Sabetta during its negative phase.

причальной стенке в защитной металлической трубе для предотвращения его повреждения в периоды ледостава, что позволило получить бесперебойное поступление данных в период с 23 декабря 2023 г. по настоящее время. Измеренные данные приводятся к балтийской системе высот (БСВ-77) с учётом поправки к наименьшему теоретическому уровню (НТУ). Размер выборки наблюдений за колебанием уровня и метеорологическими характеристиками составляет более 7 тыс. значений. Отметим, что колебания уровня воды использовались также в качестве предиктора, что существенно помогло нейронной модели распознать сложные внутренние связи и закономерности временного ряда.

Поскольку колебания уровня в Обской губе подвержены атмосферному форсингу, то в качестве дополнительных предикторов использован градиент давления между портом Сабетта и Ханты-Мансийском. Значения давления в этих точках находятся в открытом доступе на портале RP5 [36—37]. Было выявлено, что переход его в отрицательную фазу (увеличение давления на юге и уменьшение его на севере), сопровождается формированием устойчивых южных ветров, что приводит к сгонным явлениям в районе мыса Каменный. На рис. 2 представлены оценки взаимосвязи колебаний уровня в Обской губе с градиентом давления между Ханты-Мансийском и портом Сабетта при его отрицательной фазе. Действительно, при повышении отрицательного градиента давления уровень понижается.

Метеорологические параметры использованные
для построения модели колебаний уровня в Обской губе

Meteorological parameters used to build a model of level fluctuations in the Gulf of Ob

| Предикторы модели SSA-LR-LSTM | Ед. изм. | Описание |
|--------------------------------------|----------|--|
| Направление ветра | град. | Среднее значение направления ветра за час измерений |
| Атмосферное давление | гПа | Среднее значение атмосферного давления за час измерений |
| Температура воздуха | °С | Минимальное значение температуры за час измерений |
| Скорость ветра | м/с | Максимальные порывы скорости ветра за час измерений |
| Индекс давления | гПа | Разность давления между пунктами Ханты-Мансийск и Сабетга |
| Фактический уровень воды | м | Мгновенный уровень воды с уровнемера в БСВ с учетом поправки к НТУ |
| Трендовая компонента уровня воды | м | Трендовая компонента, рассчитанная методом «Гусеница-SSA» |
| Периодическая компонента уровня воды | м | Периодическая компонента рассчитанная методом «Гусеница-SSA» |

1.3. Метод сингулярного спектрального анализа Гусеница-SSA

«Гусеница-SSA» (англ. SSA — Singular spectrum analysis) является мощным методом анализа временных рядов. Например, методика совместного использования гусеницы и рекуррентных нейронных моделей для прогнозирования колебаний уровня воды успешно применялась авторами в работе [14]. Подробно данный метод изложен в работах [15—16]. Он получил широкое распространение благодаря своей эффективности при анализе нелинейных и недетерминированных временных рядов. Суть его состоит в следующем: сначала из исходного одномерного временного ряда составляется многомерный вектор данных; выбирается «длина окна» (или глубина вложения) L ($1 < L < N$) для выборки $X = (X_1, X_2, \dots, X_N)$ длиной N , где $N > 1$, а X — не нулевая последовательность. Обычно длина окна выбирается исходя из особенностей временного ряда, в частности, основываясь на его периодической составляющей, которую можно легко выделить вейвлет-разложением или же любыми другими стандартными статистическими методами. Для среднемесячных данных длина окна выбирается обычно равной 12 мес. Ширина окна вычисляется, как $K = N - L + 1$. Таким образом, одномерный временной ряд преобразуется в многомерный вектор данных, также называемый траекторной матрицей:

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_N) = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & \dots & X_L \\ X_2 & X_3 & \dots & X_{L+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_K & X_{L+1} & \dots & X_N \end{bmatrix}.$$

Аналогично методу главных компонент создается подобие автокорреляционной матрицы $S = X \cdot X^T$. Далее происходит сингулярное разложение этой матрицы:

$$X = \sum V_i,$$

где $V_i = U_i \cdot U_i^T \cdot X$, $i = 1, \dots, L$. U_i — ортонормированная система собственных векторов матрицы S . Результатом этого этапа являются собственные числа и соответствующие им собственные векторы, которые используются для выделения значимых компонент временного ряда. Их последующая группировка позволяет выделить в исходных данных такие составляющие как тренд, сезонные колебания и шум. Таким образом, выбираются наиболее значимые матрицы V_i и переводятся в ряд длины N . Результатом является разложение временного ряда на интерпретируемые аддитивные составляющие [38]. Метод «Гусеница-SSA» нашел широкое применение в таких задачах, как выделение тренда, периодических компонент, сглаживание нестационарных рядов и т. д.

1.4. Нейронные сети

В работе для построения нейронной модели Обской губы в районе поселка мыс Каменный использовалось машинное обучение [39—44]. Основная идея машинного обучения заключается в том, чтобы позволить компьютеру автоматически находить закономерности в данных и использовать их для решения задач без явного программирования. В работе применялось обучение с учителем (supervised learning) [43], где на основе известных входных и выходных данных строится функция, аппроксимирующая зависимость $f: X \rightarrow Y$. Проверкой степени аппроксимации является наименьшая величина ошибки между фактическими и модельными значениями. Оптимизация сложных функций осуществляется с помощью метода градиентного спуска, широко используемого в нейронных сетях [45—47].

Построение архитектуры нейронной сети — нетривиальная задача, особенно для нелинейных гидрометеорологических характеристик. Существующие нейронные сети имеют различную структуру обучения, способы определения весовых коэффициентов, параметры, определяющие отклик нейронов сети на входные данные (функции активации) и т.д. [48]. В работе использовались рекуррентные нейронные сети (RNN) [49] и их модификации, такие как долгая краткосрочная память (LSTM) [17, 50] и двунаправленная LSTM (BiLSTM) [51]. Эти архитектуры эффективны для обработки временных рядов, так как способны учитывать долговременные зависимости и обрабатывать данные в двух направлениях. В работе [21] было показано, что применение слоя BiLSTM способствует снижению ошибки валидации модели.

Для повышения устойчивости моделей применяются методы регуляризации, такие как Dropout, который случайным образом отключает нейроны, предотвращая переобучение [52]. Однако применение метода Dropout не всегда улучшает результаты. Эксперименты в настоящей работе показали, что использование Dropout не улучшило результаты, а лишь увеличило время обучения.

Функция активации напрямую определяет то, как нейроны сети будут реагировать на входные данные [53]. Наиболее часто используются линейная функция, гиперболический тангенс и сигмоида. В настоящей работе в скрытых слоях использовался гиперболический тангенс, который центрирует данные вокруг нуля и упрощает обучение. В выходном слое применялась сигмоидная функция, нормализующая данные в диапазоне от 0 до 1. Стоит отметить, что выбор функций активации и параметров архитектуры не имеет строгой методологии и осуществлялся индивидуально, исходя из задач исследования.

2. Результаты и их обсуждение

Моделирование прогностических колебаний уровня воды в Обской губе можно разделить на несколько этапов. В начале первого этапа происходит первичная обработка исходного ряда. Поскольку в расчетах используются натурные характеристики с ежечасной дискретностью, то выборки данных сильно зашумлены и имеют многочисленные выбросы. Для сглаживания значений успешно применялся статистический метод Гусеница-SSA. Благодаря известной библиотеке «pyts» (Python) и её модулю Singular-Spectrum-Analysis исходную выборку можно легко разбить на три основные статистические составляющие: тренд, периодические колебания и шум.

Преимущество метода «Гусеница-SSA» заключается в способности эффективно справляться с нелинейными и недетерминированными временными рядами, что позволяет реконструировать любую выборку данных с удаленным в ней шумом. Как правило, к сглаженной группе компонент относятся первые собственные векторы, определяющие тренд или тенденцию временного ряда, поэтому на первом этапе моделирования необходимо избавиться от лишнего шума, который может привести к существенным ошибкам во время машинного обучения нейронной сети. При малой величине длины окна L , метод «Гусеница-SSA» позволил получить сглаженный ежечасный ход метеорологических характеристик. В качестве примера на рис. 3 представлен график температуры воздуха на мысе Каменный за первые три недели с начала наблюдений. Отметим, что глубина вложения L соответствует величине заблаговременности модели и полусуточной динамике колебаний уровня воды, которая составляет 12 ч. Действительно, сглаженный ряд очень хорошо аппроксимирует фактические значения температуры, отсекая шумовую компоненту.

Аналогичным образом из фактических данных колебаний уровня воды выделяются трендовая и циклическая компоненты, которые в последующем используются в качестве предикторов модели. На рис. 4 представлен пример разложения колебаний уровня воды на отдельные составляющие методом сингулярного спектрального анализа с длиной окна $L = 12$. По сути, было выполнено разложение МНК матрицы размером 12×7089 . Из рис. 4 видно, что 1 ГК отражает в основном длительную тенденцию изменений уровня, 2 ГК — полусуточную периодичность приливных колебаний, а 3 ГК — шумовую компоненту. Сумма первых двух компонент описывает 97 % дисперсии временного ряда, 3 ГК — 3 % дисперсии, поэтому она не учитывалась в дальнейших расчётах.



Рис. 3. Сопоставление фактических срочных значений температуры воздуха на м. Каменном с их сглаженными значениями метода «Гусеница-SSA» за 25.12.2023—13.01.2024.

Fig. 3. Comparison of actual urgent air temperature values at Cape Kamennoye with their smoothed values using the “Caterpillar-SSA” method for 12.25.2023—01.13.2024.

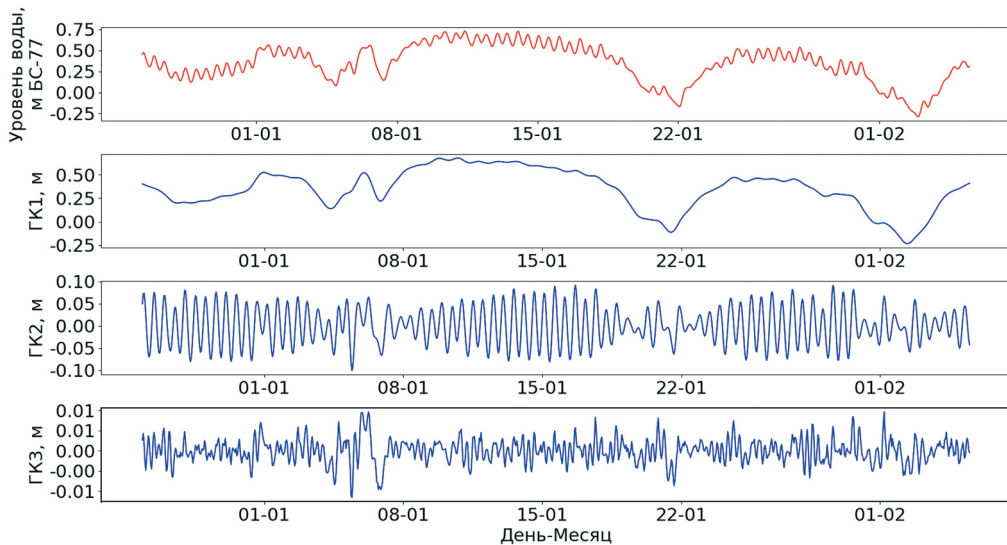


Рис. 4. Результаты разложения фактических ежечасных значений уровня воды на м. Каменном за январь 2024 г. методом главных компонент:

a) — фактический уровень, *б)* — 1ГК, *в)* — 2ГК, *г)* — 3ГК.

Fig. 4. The results of the decomposition of the actual hourly values of the water level at cape Kamenny in January 2024 by the method of main components:

a) — the actual level, *b)* — 1PC, *c)* — 2PC, *d)* — 3PC.

Перед созданием архитектуры нейронной сети следует этап препроцессинга, который включает в себя нормирование входных данных. Функция `MinMaxScaler` (Python) нормализует исходные данные в промежутке от 0 до 1. Масштабирование данных можно представить следующей формулой:

$$x' = \frac{(X - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})}.$$

Далее формируется матрица входных данных, которая используется в машинном обучении. Матрица включает в себя пять сглаженных методом «Гусеница-SSA» метеорологических параметров, задающих основные тенденции атмосферного воздействия, исходный ряд колебаний уровня воды и его трендовые и периодические аддитивные составляющие. Исходная матрица данных (7100 значений) разделяется на обучающую (5700) и валидационную (1420) выборки в отношении 8:2. Эксперименты показали, что гидрологический блок Обской губы достаточно быстро реагирует на изменчивость атмосферы. Для прогнозирования колебаний уровня с заблаговременностью 12 часов достаточно использовать всего 12 предшествующих гидрометеорологических значений. Увеличение количества данных, подаваемых на вход модели, приводит к усложнению архитектуры и созданию более сложных внутренних зависимостей, которые увеличивают ошибки валидации.

Этап реализации архитектуры нейронной сети состоит в правильном выборе количества нейронов, скрытых слоёв, методов регуляризации и оптимизации данных. В настоящей работе построена сеть LSTM, которая включает в себя входной слой, три скрытых слоя LSTM, один скрытый слой BiLSTM с функцией гиперболического тангенса и выходной слой с сигмоидной функцией активации. В ходе многочисленных экспериментов установлено, что такое количество скрытых слоёв является оптимальным для описания исходной функции. На рис. 5 представлена схема архитектуры нейронной модели LSTM.

На производительность нейронной сети влияет применение подходящего оптимизатора, роль которого заключается в поиске наилучших весов нейронной сети и в минимизации функции потерь путем настраивания параметров модели. Одним из наиболее эффективных алгоритмов оптимизации для обучения рекуррентных нейронных сетей служит оптимизатор «adam», который использовался в настоящей работе. Он эффективно работает с большими и малыми градиентами, помогает ускорить сходимость и является достаточно устойчивым [54].

Выбор числа эпох необходимого для машинного обучения напрямую определяет качество итоговой модели. Однако до сих пор не существует чёткого ответа на вопрос о правильном выборе оптимального количества эпох. Небольшое их количество может привести к недообучению, так как в этом случае модель будет слишком простой для усвоения всех закономерностей и внутренних связей между предикторами. И, наоборот, большое количество эпох может привести к переобучению, поскольку модель, кроме основных закономерностей, будет усваивать случайный шум в данных. Как правило, такие модели хорошо обучаются, однако при работе с тестовой выборкой создаются большие ошибки. Единственной мерой,

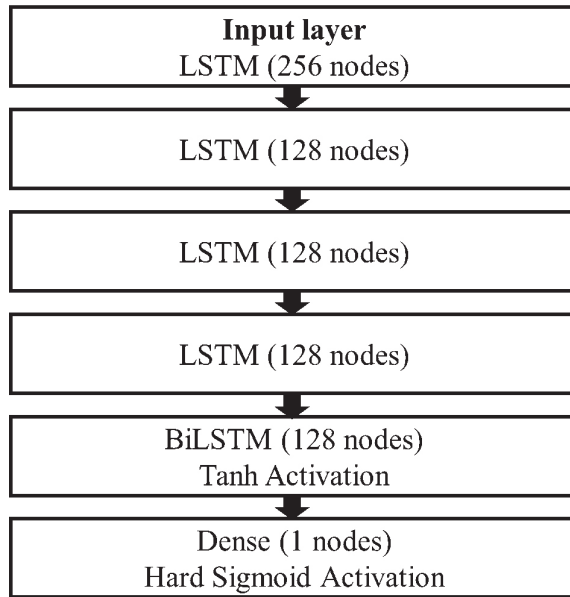


Рис. 5. Схематичное представление архитектуры нейронной сети LSTM.

Fig. 5. Schematic representation of the architecture of the LSTM neural network.

позволяющей определять оптимальное количество эпох, является анализ графика функции потерь. Обычно он состоит из двух функций: потери во время обучения и потери во время валидации, которые находятся вычислением среднеквадратической ошибки в конце каждой эпохи. В настоящей работе было установлено, что наличие 50 эпох для машинного обучения является более чем достаточным. На рис. 6 представлен совмещенный график распределения функций потерь. Видно, что к концу обучающего периода веса модели обновляются на достаточно малую величину. Итоговая модель выбирались с помощью метода ModelCheckpoint (Python), который позволяет сохранять веса во время обучения с наименьшим значением ошибки валидации.

Количество нейронов напрямую определяет взаимодействие модели с данными. Обычно входной слой имеет число нейронов, соответствующее размерности входных данных. Однако в случаях, когда нужно распознать более сложные взаимосвязи между предикторами, число нейронов повышают. Отметим, что создаваемая модель имеет дело с мелкой дискретностью реальных гидрометеорологических параметров, которые по своей природе являются недетерминированными. Рассматривая ежечасную взаимосвязь колебаний уровня с параметрами атмосферы, коэффициент корреляции не сможет выявить наличие связи, так как атмосфера является нелинейной динамической системой. Анализ наличия линейной связи ежечасных колебаний уровня с атмосферными параметрами показал её отсутствие. Данная связь проявляется только в отдельных локальных случаях. Таким образом, эмпирически было выявлено, что для входного слоя оптимальным будет

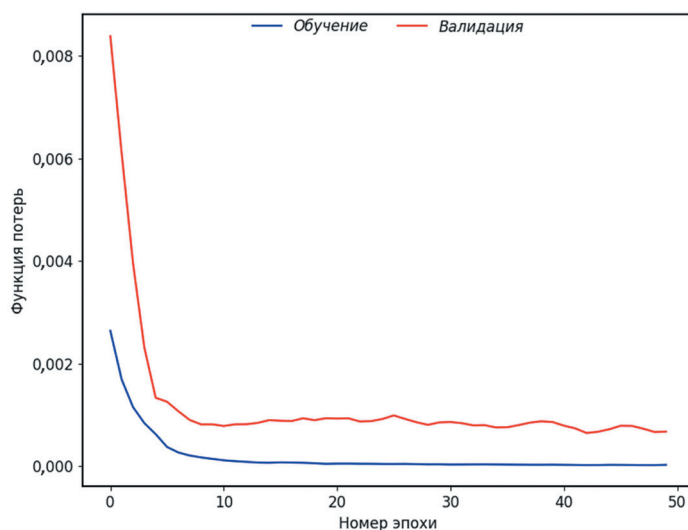


Рис. 6. Зависимость функций потерь от количества эпох в процессе машинного обучения. Модель имеет 3 скрытых слоя LSTM, 1 скрытый слой BiLSTM, 128 нейронов в скрытых слоях.

Fig. 6. The dependence of loss functions on the number of epochs in the machine learning process. The model has 3 hidden LSTM layers, 1 hidden BiLSTM layer, 128 neurons in hidden layers.

наличие 256 нейронов. Это позволяет лучше усвоить сложные структуры входных переменных и оценить их взаимосвязи с прогнозируемой функцией. Отметим, что дальнейшее увеличение нейронов не приводит к улучшению результатов, а даже ухудшает их, создавая случайные нежелательные связи. Выходной слой имеет только 1 нейрон, отвечающий за формирование интервального прогноза на 12 часов вперёд. Наиболее неопределенным остается количество нейронов в скрытых слоях. В табл. 2 показано, как меняется ошибки валидации модели в зависимости от числа нейронов и количества скрытых слоев.

Таблица 2

Средняя квадратическая (RMSE) и средняя абсолютная (MAE) ошибки масштабированных колебаний уровня воды, рассчитанные по валидационным данным. Заблаговременность прогнозов составляет 12 часов

The mean square (RMSE) and mean absolute (MAE) errors of scaled water level fluctuations calculated from validation data. The lead time for the run-through is 12 hours

| Кол-во скрытых слоёв | 16 нейронов | | 128 нейронов | |
|----------------------|-------------|-------|--------------|-------|
| | RMSE | MAE | RMSE | MAE |
| BiLSTM | 0,023 | 0,015 | 0,020 | 0,014 |
| LSTM, BiLSTM | 0,020 | 0,013 | 0,019 | 0,014 |
| LSTM (x2), BiLSTM | 0,018 | 0,012 | 0,017 | 0,011 |
| LSTM (x3), BiLSTM | 0,018 | 0,012 | 0,015 | 0,010 |

Выявлено, что наличие 128 нейронов в четырех скрытых слоях даёт наименьшую ошибку валидации модели. Мерой ошибки служит функция потерь, которая представляет собой средний квадрат ошибки прогноза (англ. Mean Squared Error, MSE). Дополнительно для анализа результатов оценивалась средняя абсолютная ошибка (англ. Mean Absolute Error, MAE) и среднеквадратическая ошибка (англ. Root Mean Squared Error, RMSE). Это наиболее популярные метрики для оценки точности моделей машинного обучения, особенно в задачах регрессии. Их можно представить следующими формулами:

$$MSE = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\phi_{A,i} - \hat{\phi}_{A,i})^2, \quad RMSE = \sqrt{MSE}, \quad MAE = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |\phi_{A,i} - \hat{\phi}_{A,i}|.$$

На рис. 7 а представлено распределение фактических значений колебаний уровня и модельных значений, полученных при валидации модели. Отметим, что колебания уровня для удобства представлены относительно Балтийской системы высот (БСВ-77). Как и следовало ожидать, наибольшие трудности модель испытывает при описании сгонно-нагонных явлений. Однако, использование совмещенного метода SSA и LSTM позволяет хорошо описать основные закономерности и тенденции исходного ряда за счет дополнительного учета трендовой и периодической компонент колебаний уровня воды, минимизируя ошибку. На сегодняшний день, основной и наиболее актуальной проблемой является увеличение заблаговременности. Наибольшие ошибки приходится на период с ноября по декабрь. Связано это с еще несформированным на Обской губе ледовым покровом, который в значительной степени снижает атмосферное воздействие на поверхность воды и уменьшает амплитуды приливных колебаний. Отметим, что большая часть данных, подаваемых модели на обучение, характеризовались наличием устойчивого однолетнего льда в области проводимых исследований. Очевидно, увеличение размера выборки в будущем позволит лучше усваивать эти взаимосвязи и уменьшит ошибку модели в летний период.

Итоговым этапом расчета прогностических значений колебаний уровня, является использования статистического метода парной линейной регрессии, который в общем виде можно представить как $y = ax + b + \varepsilon$, где y — зависимая переменная, в качестве которой используются фактические значения уровня, x — независимая переменная, полученная по модельным расчетам уровня. Рассчитанные для каждого прогноза коэффициенты регрессии a и b учитываются для их корректировки. Использование регрессионного анализа существенно снижает образование случайных выбросов в прогнозах, а также минимизирует ошибку. На рис. 7 б показано, что с учетом корректировки итогового прогноза методом парной линейной регрессии повысилась точность описания сгонно-нагонных явлений, а также предсказания амплитуды приливных колебаний воды. Так, среднеквадратическая ошибка (RMSE) уменьшилась почти в полтора раза и составила 0,012.

В прогнозирование гидрометеорологических параметров решающую роль имеет максимально возможный прогностический потенциал модели. Повышение заблаговременности особенно в таком экономически значимом районе, как Обская губа может играть критическую роль для своевременного планирования судовых

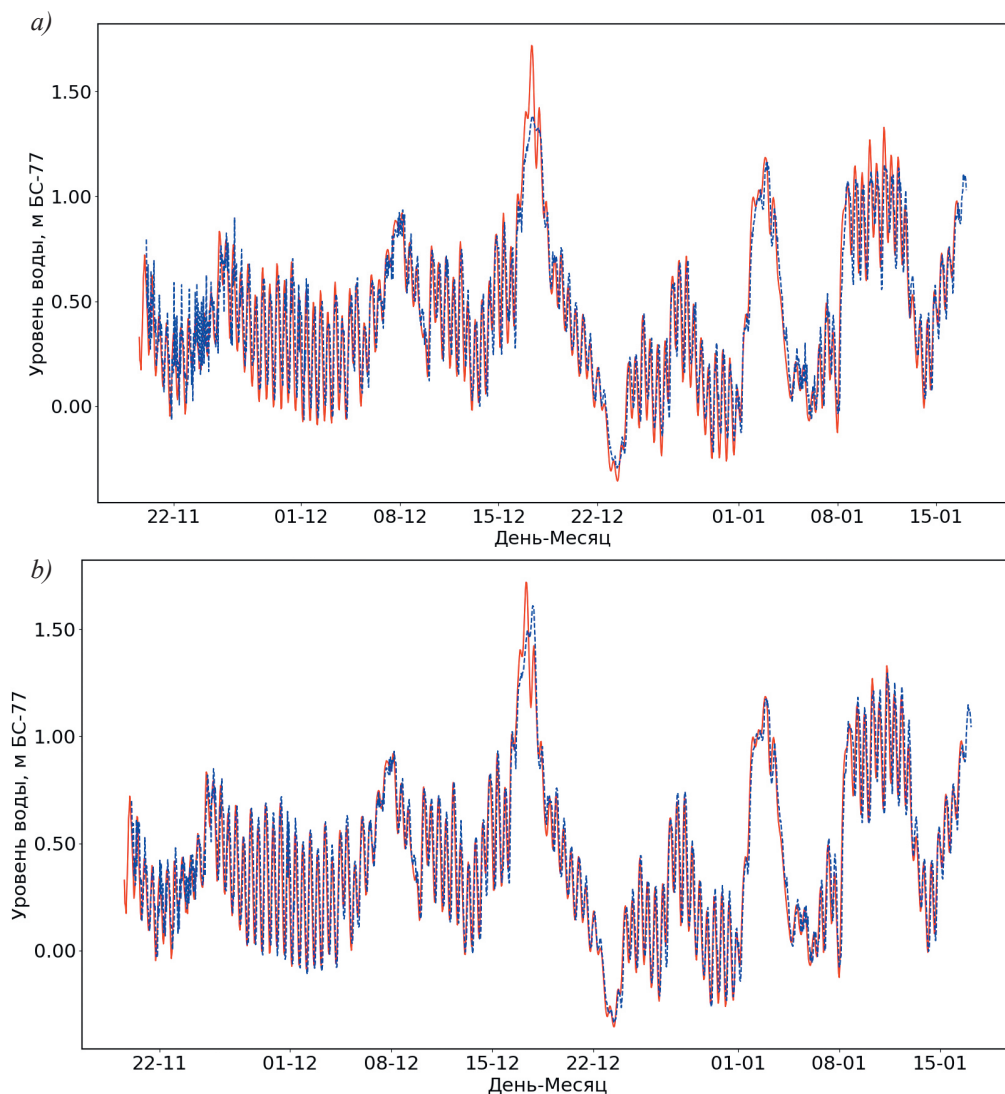


Рис. 7. Временной ход фактических и модельных значений колебаний уровня, приведенного к БС-77 в районе мыса Каменного до применения парной линейной регрессии (а) и после (б).

Fig. 7. Distribution of actual and model values of fluctuations in the level reduced to BS-77 in the cape Kamenny area before the application of paired linear regression (a) and after (b).

логистических операций. В табл. 3 представлено изменение ошибки в зависимости от повышения заблаговременности. Отметим, что повышение количества данных на выходе модели приводит к эквивалентному увеличению размерности матрицы, подаваемой на вход. Кроме того, результаты расчетов свидетельствуют

об увеличении ошибок модели в зависимости от увеличения горизонта планирования. При прогнозе более чем на 12 часов ошибка модели резко повышается. Расширение гидрометеорологической сети в районе Обской губы и дополнение модели новыми гидрометеорологическими параметрами может существенно усилить её прогностический потенциал.

Таблица 3

Средняя квадратическая (RMSE) и средняя абсолютная (MAE) ошибки масштабированных колебаний уровня воды, в зависимости от заблаговременности модели

The mean square (RMSE) and mean absolute (MAE) errors of scaled water level fluctuations, depending on the timing of the model

| Заблаговременность, ч | RMSE | MAE |
|-----------------------|-------|-------|
| 6 | 0,014 | 0,007 |
| 12 | 0,015 | 0,010 |
| 24 | 0,197 | 0,040 |
| 48 | 0,100 | 0,074 |

Заключение

В настоящей работе была представлена современная методика прогнозирования колебаний уровня воды в акватории Обской губы, важной части Северного морского пути и ключевой зоны для транспортировки нефтепродуктов и других стратегических грузов. Модель SSA-LR-LSTM основана на совместном использовании метода сингулярного спектрального анализа (SSA), линейной регрессии и нейронных сетей с долгой краткосрочной памятью (LSTM). Эти методы позволяют учитывать сложные взаимосвязи между метеорологическими параметрами и уровнем воды, что важно для повышения точности прогнозов. Модель была протестирована в реальных условиях и внедрена для оперативного обеспечения судоходства в районе поселка мыс Каменный. Модель SSA-LR-LSTM способна прогнозировать уровень воды с заблаговременностью до 12 часов и имеет значительный потенциал для улучшения своих показателей. Анализ ошибок показал, что модель хорошо описывает основные тенденции и закономерности исходного ряда, несмотря на сложные гидрометеорологические условия. Основной проблемой является увеличение ошибки валидации при увеличении заблаговременности. Решением может служить накопление размера выборки входных данных на основе будущих гидрометеорологических наблюдений и добавление новых предикторов за счет расширения сети гидрометеорологических наблюдений в акваториях Северного морского пути. Внедрение модели в существующие информационные системы для принятия решений оперативного судоходства могло бы значительно снизить риски, связанные с неожиданными возникновениями сгонно-нагонных колебаний.

Таким образом, сочетание традиционных методов анализа данных с современными технологиями машинного обучения может значительно повысить точность прогнозирования колебаний уровня воды для таких сложных гидрографических

условий, как Обская губа. Разработанная модель уже используется в оперативном обеспечении судоходства, и дальнейшее ее совершенствование и расширение возможностей может привести к значительным преимуществам в областях экономики и безопасности судоходства в Арктическом регионе.

Список литературы

1. Лапин С. А. Гидрологическая характеристика Обской губы в летне-осенний период // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 6. С. 1—10.
2. Войнов Г. Н., Головин Н. В., Кубышкин Н. В. и др. К решению проблемы прогноза уровня моря у мыса Каменный в Обской губе // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2023. Т. 69. № 1. С. 29—43. doi:10.30758/0555-2648-2023-69-1-29-43.
3. Кулаков М. Ю., Макштас А. П., Шутилин С. В. AARI—IOCM — совместная модель циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2012. Т. 92. № 2. С. 6—18.
4. Войнов Г. Н. Гармонический анализ морских приливов по срочным наблюдениям за уровнем моря. // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 7. С. 79—91.
5. Корт В. Г. Непериодические колебания уровня воды в Арктических морях и способы их прогноза. М.: Труды ААНИИ, 1941. Т. 175. 163 с.
6. Лабзовский Н. А. Непериодические колебания уровня моря. М.: Гидрометеорологическое издательство. Ленинград, 1971. 237 с.
7. Войнов Г. Н., Пискун А. А. Приливные и сгонно-нагонные колебания уровня у мыса Ям-Сале (Обская губа) // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2016. Т. 110. №4. С. 51—66.
8. Войнов Г. Н. Методика контроля и редакции многолетних временных рядов уровня моря // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2011. № 4. С. 51—61.
9. Кондрин А. Т. Методы гармонического анализа приливов // *Вестник Московского университета. География*. 2008. № 5. С. 26—30.
10. Ягвкина Е. А., Хаймина О. В. Непериодические колебания уровня моря у мыса Каменный (Обская губа Карского моря). Закономерности изменчивости и возможность прогноза // *Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития»*. 2019. С. 734—738.
11. Клеванный К. А. Смирнова Е. В. Использование программного комплекса Cardinal // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. 2009. № 1. С. 152—160.
12. Сидорова Л. Д., Хаймина О. В. Моделирование колебаний уровня моря в Обской губе с использованием программного комплекса Cardinal // *Морские исследования и образование (MARESEDU)-2022: Труды XI Международной научно-практической конференции*. Москва. 2022. С. 257—260.
13. Чанцев В. Ю., Гудошников Ю. П., Плешанов Д. А. и др. Многофункциональная комплексная модель водной системы Обской губы // *Современные подходы и перспективные технологии в проектах освоения нефтегазовых месторождений российского шельфа*. 2018. Т. 36. № 4. С. 139—148.
14. Xie Y., Zhou S., Wang F. Prediction analysis of sea level change in the China Adjacent seas based on Singular Spectrum Analysis and Long Short-Term Memory Network // *Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12. № 1397. P. 1—13. doi:10.3390/jmse12081397.
15. Голядина Н. Э. Метод «Гусеница—SSA»: анализ временных рядов: Учеб. Пособие. — СПб, 2004. 76 с.
16. Golyadina N., Osipov E. The «Caterpillar»—SSA method for analysis of time series with missing values // *Journal of Statistical Planning and Inference*. 2007. Vol. 137. № 8. P. 2642—2653. doi:10.1016/j.jspi.2006.05.014.
17. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory // *Neural Computation*. 1997. Vol. 9. № 8. P. 1735—1780. doi: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.

18. Sak H., Senior A., Beaufays F. Long Short-Term Memory based recurrent neural network architectures for large vocabulary speech recognition // ArXiv. 2014. doi: 10.48550arXiv.1402.1128
19. Gers F. A., Schmidhuber J., Cummins F. Learning to Forget: Continual Prediction with LSTM // Neural Computation. 2000. Vol. 12. № 10. P. 2451—2471. doi: 10.1162/089976600300015015.
20. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик (на примере Северо-Европейского бассейна). М.: Российский государственный гидрометеорологический университет. Мурманск: ПИНРО, 2003. 164 с.
21. Soldatenko S., Angudovich Y. Using Machine Learning for Climate Modeling: Application of Neural Networks to a Slow-Fast Chaotic Dynamical System as a Case Study // Climate 2024. Vol. 12. № 189. doi:10.3390/cli12110189. 13 p.
22. Braakmann-Folgmann A., Roscher R., Wenzel S., et al. Sea Level Anomaly Prediction using Recurrent Neural Networks // Proceedings of the 2017 conference on Big Data from Space. 2017. doi: 10.48550/arXiv.1710.07099.
23. Stutz D. Understanding Convolutional Neural Networks // Seminar Report, Current Topics in Computer Vision and Machine Learning, Visual Computing Institute, RWTH Aachen University. 2014. 23 p.
24. Zeiler D. M., Fergus R. Visualizing and Understanding Convolutional Networks // Conference: European Conference on Computer. 2014. Vol. 8689. P. 818—833. doi: 10.1007/978-3-319-10590-1_53.
25. Lin S., Zhang J. Generalization Bounds for Convolutional Neural Networks // ArXiv. 2019. 30 p. doi: 10.48550/arXiv.1910.01487.
26. Vizi Z., Batki B., Rátki, L. et al. Water level prediction using long short-term memory neural network model for a lowland river: a case study on the Tisza River, Central Europe // Environmental Sciences Europe. 2023. Vol. 35. № 92. 19 p. doi: 35.10.1186/s12302-023-00796-3.
27. Сергеев А. П., Тарасов Д. А. Введение в нейросетевое моделирование: учебное пособие. М.: Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2017. 128 с.
28. Вакуленко С. А., Жихарева А. А. Практический курс по нейронным сетям: учебное пособие. М.: СПб: Университет ИТМО, 2018. 71 с.
29. Иванов В. В. Водный баланс и водные ресурсы суши Арктики // Труды ААНИИ. 1976. Т. 323. С. 4—24.
30. Иванов В. В. Гидрологический режим низовьев и устьев рек Западной Сибири и проблема оценки его изменений под влиянием территориального перераспределения водных ресурсов // Проблемы Арктики и Антарктики. 1980. № 55. С. 20—43.
31. Иванов В. В., Осипова И.В. Сток Обских вод в море и его многолетняя изменчивость // Труды ААНИИ. 1972. Т. 297. С. 86—91.
32. Пискун, А. А., Войнов Г. Н. Сгонно-нагонные колебания уровня воды в Новом Порту (Обская губа) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 1. С. 20—37. doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-1-20-37.
33. Войнов Г. Н., Налимов Ю. В., Пискун А. А. и др. Основные черты гидрологического режима Обской и Тазовской губ (лед, уровни, структура вод). М.: СПб.: Нестор-История, 2017. 192 с.
34. Ким С. Д., Финагенов О. М., Уварова Т. Э. Определение ледовых нагрузок на сооружения континентального шельфа по нормам различных стран // Вести газовой науки. 2013. Т. 14. № 3. С. 97—103.
35. Тарасенко А. Д., Селюженков В. В., Сандалюк Н. В. и др. Исследование ледовой обстановки Обской губы по современным спутниковым данным в 2007—2017 гг // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 1. С. 48—63. doi: 10.30758/0555-2648-2021-68-1-48-63. EDN JVPINB.
36. RP5.ru — Расписание Погоды. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://rp5.ru/Погода_в_Сабетте_\(аэропорт\)](https://rp5.ru/Погода_в_Сабетте_(аэропорт)). (дата обращения: 21.12.2024).
37. RP5.ru — Расписание Погоды. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://rp5.ru/Погода_в_Ханты-Мансийске_\(аэропорт\)](https://rp5.ru/Погода_в_Ханты-Мансийске_(аэропорт)). (дата обращения: 21.12.2024).
38. Вохмянин С. В., Сенашов С. И. Метод «Гусеница—SSA» как инструмент прогнозирования состояния финансового рынка // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2010. Т. 1. № 6. С. 409—410.
39. Flach P. Machine Learning: The Art and Science of Algorithms That Make Sense of Data. Cambridge University Press. 2012. doi: 10.1017/CBO9780511973000.

40. Laurent Y. Introduction to Machine Learning. ArXiv. 2024. 649 p. doi: 10.48550/arXiv.2409.02668.
41. Stephen M. Machine Learning: An Algorithmic Perspective. Chapman and Hall/CRC. 2014. 457 p. doi: 10.1201/b17476.
42. Mohri M., Rostamizadeh A., Talwalkar A. Foundations of Machine Learning. Massachusetts Institute of Technology. 2012. 504 p.
43. Миронов А. М. Машинное обучение. Часть 1: учебное пособие. М.: Москва: МГУ, 2018. 83 с.
44. Trask W. A. Grokking Deep Learning. Manning Publications. 2019. 336 p.
45. Tapkir A. A Comprehensive Overview of Gradient Descent and its Optimization Algorithms // IARJSET. 2023. P. 37—45. doi: 10.10.17148/IARJSET.2023.101106.
46. Ruder S. An overview of gradient descent optimization algorithms. ArXiv. 2016. 12 p. doi: 10.48550/arXiv.1609.04747.
47. Гасников А. В. Современные численные методы оптимизации. Метод универсального градиентного спуска. 2 издание, дополненное. М.: Москва: МФТИ (государственный университет), 2018. 181 с.
48. Anthony M., Bartlett P. L. Neural Network Learning: Theoretical Foundations. Cambridge University Press. 1999. doi:10.1017/CBO9780511624216
49. Bianchi F. M., Maiorino E., Kampffmeyer M. et al. An overview and comparative analysis of Recurrent Neural Networks for Short Term Load Forecasting. ArXiv: Neural and Evolutionary Computing. 2017. 41 p. doi: 10.48550/arXiv.1705.04378.
50. Van Houdt G., Mosquera C., Nápoles G. A. Review on the Long Short—Term Memory Model // Artificial Intelligence Review. 2020. Vol. 53. P. 5929—5955. doi: 10.1007/s10462-020-09838-1.
51. Graves A., Schmidhuber J. Framewise phoneme classification with bidirectional LSTM networks / Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks. 2005. Vol. 4. P. 2047—2052. doi:10.1109/IJCNN.2005.1556215.
52. Nusrat I., Sung-Bong J. A Comparison of Regularization Techniques in Deep Neural Networks // Symmetry. 2018. Vol. 10. № 11. doi: 10.648.10.3390/sym10110648.
53. Akgül İ. Activation functions used in artificial Neural Networks // Academic Studies in Engineering. 2023. P. 42—58.
54. Jais I. K. M., Ismail R. A., Nisa S. Q, N, Adam Optimization Algorithm for Wide and Deep Neural Network // Knowledge Engineering and Data Science. 2019. Vol. 2. № 1. P. 41—46. doi: 10.17977/um018v2i12019.

References

1. Lapin S. A. Hydrological characteristics of the Ob Bay in the summer-autumn period. *Okeanologiya = Oceanology*. 2011;51(6): (1—10). (In Russ.).
2. Voynov G. N., Golovin N. V., Kubyshev N. V., et al. Towards solving the problem of sea level forecast near cape Kamenny in the Ob Bay. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of the Arctic and Antarctic*. 2023;69(1): (29—43). doi:10.30758/0555-2648-2023-69-1-29-43. (In Russ.).
3. Kulakov M. Yu., Makshtas A. P., Shutilin S. V. AARI—IOCM — joint model of water and ice circulation in the Arctic Ocean. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of the Arctic and Antarctic*. 2012;92(2): (6—18). (In Russ.).
4. Voynov G. N. Harmonic analysis of marine tides from regular sea level observations. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2009;(7): (79—91). (In Russ.).
5. Kort V. G. *Nepiodicheskie kolebaniya urovnya vody v Arkticheskikh moryakh i sposoby ikh prognoza = Non-periodic fluctuations of water level in the Arctic Seas and methods of their prediction*. Moscow: ANII Transactions, 1941: 163 p. (In Russ.).
6. Labzovskiy N. A. *Nepiodicheskie kolebaniya urovnya moray = Non-periodic fluctuations of sea level*. Leningrad: Hydrometeorological publishing house, 1971: 237 p. (In Russ.).
7. Voynov G. N., Piskun A. A. Tidal and wind-driven sea level oscillations near Yam-Sale cape (Ob Bay). *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of the Arctic and Antarctic*. 2016;110(4): (51—66). (In Russ.).
8. Voynov G. N. Methodology for control and editing long-term sea level time series. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of the Arctic and Antarctic*. 2011;(4): (51—61). (In Russ.).

9. Kondrin A. T. Methods of harmonic tide analysis. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Geografiya = Bulletin of Moscow University. Geography*. 2008;(5): (26—30). (In Russ.).
10. Yagovkina E. A., Khaymina O. V. Non-periodic sea level fluctuations near cape Kamenny (Kara Sea, Ob Bay). Patterns of variability and predictability. *Trudy II Vserossiyskoy konferentsii «Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya» = Proceedings of the II All-Russian Conference “Hydro-meteorology and Ecology: Achievements and Prospects”*. 2019: (734—738). (In Russ.).
11. Klevenny K. A., Smirnova E. V. Use of the Cardinal software package. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova = Herald of the State University of Maritime and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*. 2009;1: (152—160). (In Russ.).
12. Sidorova L. D., Khaymina O. V. Modeling Sea level fluctuations in the Ob Bay using the Cardinal software complex. *Morskie issledovaniya i obrazovanie (MARESEDU)—2022: Trudy XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii = Marine Research and Education (MARESEDU)—2022: Proceedings of the XI International Scientific—Practical Conference*. 2022: (257—260). (In Russ.).
13. Chantsev V. Yu., Gudoshnikov Yu. P., Pleshnikov D. A., et al. Multifunctional integrated model of the Ob Bay aquatic system. *Modern approaches and promising technologies in projects for the development of oil and gas fields on the Russian shelf*. 2018;36(4): (139—148). (In Russ.).
14. Xie Y., Zhou S., Wang F. Prediction analysis of sea level change in the China Adjacent seas based on Singular Spectrum Analysis and Long Short-Term Memory Network. *Marine Science and Engineering*. 2024;12(1397):1—13. doi:10.3390/jmse12081397.
15. Golyadina N. E. *Metod «Gusenitsa» — SSA: analiz vremennykh ryadov = “Caterpillar”—SSA method: Time series analysis*. St. Petersburg, 2004: 76 p. (In Russ.).
16. Golyadina N., Osipov E. The “Caterpillar”—SSA method for analysis of time series with missing values. *Journal of Statistical Planning and Inference*. 2007;137(8):2642—2653. doi: 10.1016/j.jspi.2006.05.014.
17. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. *Neural Computation*. 1997;9(8):1735—1780. doi: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
18. Sak H., Senior A., Beaufays F. Long Short-Term Memory based recurrent neural network architectures for large vocabulary speech recognition. *ArXiv*. 2014: 1—5 p. doi: 10.48550arXiv.1402.1128.
19. Gers F. A., Schmidhuber J., Cummins F. Learning to Forget: Continual Prediction with LSTM. *Neural Computation*. 2000;12(10):2451—2471. doi: 10.1162/089976600300015015.
20. Malinin V. N., Gordeeva S. M. *Fiziko-statisticheskiy metod prognoza okeanologicheskikh kharakteristik (na primere Severo-Evropeyskogo basseyna) = Physico-statistical method for predicting oceanic characteristics (on the example of the North European Basin)*. Murmansk: PINRO, 2003: 164 p. (In Russ.).
21. Soldatenko S., Angudovich Y. Using Machine Learning for Climate Modelling: Application of Neural Networks to a Slow-Fast Chaotic Dynamical System as a Case Study. *Climate*. 2024;12(189):1—13. doi: 10.3390/cli12110189.
22. Braakmann-Folgmann A., Roscher R., Wenzel S., Uebbing B., Kusche J. Sea Level Anomaly Prediction using Recurrent Neural Networks. *Proceedings of the 2017 conference on Big Data from Space*. 2017:1—4. doi: 10.48550/arXiv.1710.07099.
23. Stutz D. Understanding Convolutional Neural Networks. *Seminar Report. Current Topics in Computer Vision and Machine Learning*. 2014:1—23.
24. Zeiler D. M., Fergus R. Visualizing and Understanding Convolutional Networks. *Conference: European Conference on Computer*. 2014;(8689):818—833. doi: 10.1007/978-3-319-10590-1_53.
25. Lin S., Zhang J. Generalization Bounds for Convolutional Neural Networks. *ArXiv*. 2019:1—30. doi: 10.48550/arXiv.1910.01487.
26. Vizi Z., Batki B., Rátki, L., et al. Water level prediction using long short-term memory neural network model for a lowland river: a case study on the Tisza River, Central Europe // *Environmental Sciences Europe*. 2023;35(92):1—19. doi: 10.1186/s12302-023-00796-3.
27. Sergeev A. P., Tarasov D. A. *Vvedenie v neyrosetevoe modelirovanie: uchebnoe posobie = Introduction to Neural Network Modeling*. Ekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 2017: 128 p. (In Russ.).
28. Vakulenko S. A., Zhikhareva A. A. *Prakticheskii kurs po neyronnym setyam: uchebnoe posobie = Practical Course on Neural Networks*. St. Petersburg: ITMO University, 2018: 71 p. (In Russ.).

29. Ivanov V. V. Water balance and terrestrial water resources of the Arctic. *Trudy AANII = Proceedings of the AARI*. 1976;323: (4—24). (In Russ.).
30. Ivanov V. V. Hydrological regime of the lower reaches and mouths of rivers in Western Siberia and the problem of assessing its changes under the influence of territorial redistribution of water resources. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of the Arctic and Antarctic*. 1980;55: (20—43). (In Russ.).
31. Ivanov V. V., Osipova I. V. Runoff of Ob waters into the sea and its long-term variability. *Trudy AANII = Proceedings of the AARI*. 1972;297: (86—91). (In Russ.).
32. Piskun, A. A., Voynov G. N. Surge-and-drain water level oscillations in Novy Port (Ob Bay). *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of the Arctic and Antarctic*. 2020;66(1): (20—37). doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-1-20-37. (In Russ.).
33. Voynov G. N., Nalimov Y. V., Piskun A. A. et al. *Osnovnye cherty gidrologicheskogo rezhima Obskoy i Tazovskoy gub (led, urovni, struktura vod) = Main features of the hydrological regime of the Ob and Taz bays (ice, levels, water structure)*. St. Petersburg: Nestor—History, 2017: 192 p. (In Russ.).
34. Kim S. D., Finagenov O. M., Uvarova T. E. Determination of ice loads on structures of the continental shelf according to standards of various countries. *Vesti gazovoy nauki = Gas Science News*. 2013;3(14):(97—103). (In Russ.).
35. Tarasenko A. D., Selyuzhenok V. V., Sandalyuk N. V. et al. Study of ice conditions in the Ob Bay based on modern satellite data for 2007—2017. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of the Arctic and Antarctic*. 2022;68(1):(48—63). doi: 10.30758/0555-2648-2021-68-1-48-63. (In Russ.).
36. RP5.ru — Raspisanie pogody. Available at: [https://rp5.ru/Погода_в_Сабетте_\(аэропорт\)](https://rp5.ru/Погода_в_Сабетте_(аэропорт)). (accessed on: 21.12.2024).
37. RP5.ru — Raspisanie pogody. Available at: [https://rp5.ru/Погода_в_Ханты-Мансийске_\(аэропорт\)](https://rp5.ru/Погода_в_Ханты-Мансийске_(аэропорт)). (accessed on: 21.12.2024).
38. Vokhmyanin S. V., Senashov S. I. The “Caterpillar”-SSA method as a tool for predicting the state of the financial market. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki = Current Issues in Aviation and Cosmonautics*. 2010;1(6):(409—410). (In Russ.).
39. Flach P. Machine Learning: The Art and Science of Algorithms That Make Sense of Data. *Cambridge University Press*. 2012. doi: 10.1017/CBO9780511973000.
40. Laurent Y. Introduction to Machine Learning. *ArXiv*, 2024: 649 p. doi: 10.48550/arXiv.2409.02668.
41. Stephen M. Machine Learning: An Algorithmic Perspective. *Chapman and Hall/CRC*, 2014: 457 p. doi: 10.1201/b17476.
42. Mohri M., Rostamizadeh A., Talwalkar A. Foundations of Machine Learning. Massachusetts Institute of Technology, 2012: 504 p.
43. Mironov A. M. *Mashinnoe obuchenie. Chast' 1 = Machine Learning. Part 1*. Moscow: MSU, 2018: 83 p. (In Russ.).
44. Trask W. A. Grokking Deep Learning. *Manning Publications*, 2019: 336 p.
45. Tapkir A. A Comprehensive Overview of Gradient Descent and its Optimization Algorithms. *IARJSET*. 2023;37—45. doi:10.1017/IARJSET.2023.101106.
46. Ruder S. An overview of gradient descent optimization algorithms. *ArXiv*. 2016:1—12. doi: 10.48550/arXiv.1609.04747.
47. Gasnikov A. V. *Sovremennyye chislennyye metody optimizatsii. Metod universal'nogo gradientnogo spуска. 2 izdanie, dopolnennoe = Modern Numerical Methods of Optimization. Universal Gradient Descent Method. 2nd edition, expanded*. Moscow State University, 2018: 181 p. (In Russ.).
48. Bartlett P. L., Anthony M. Learning in neural networks: theoretical foundations. *Cambridge University Press*, 1999. 404 p. doi:10.1017/CBO9780511624216.
49. Bianchi F. M., Maiorino E., Kampffmeyer M., et al. An overview and comparative analysis of Recurrent Neural Networks for Short Term Load Forecasting. *ArXiv: Neural and Evolutionary Computing*. 2017:1—41. doi: 10.48550/arXiv.1705.04378.
50. Van Houdt G., Mosquera C., Nápoles G. A Review on the Long Short-Term Memory Model. *Artificial Intelligence Review*. 2020;(53):5929—5955 doi: 10.1007/s10462-020-09838-1.
51. Graves A., Schmidhuber J. Framewise phoneme classification with bidirectional LSTM networks. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*. 2005;4:2047—2052 doi:10.1109/IJCNN.2005.1556215.

52. Nusrat I., Sung-Bong J. A Comparison of Regularization Techniques in Deep Neural Networks. *Symmetry*. 2018;10(11). doi: 10.648. 10.3390/sym10110648.
53. Akgül İ. Activation functions used in artificial Neural Networks. *Academic Studies in Engineering*. 2023:42—58.
54. Jais I. K. M., Ismail R. A., Nisa S. Q, N, Adam Optimization Algorithm for Wide and Deep Neural Network. *Knowledge Engineering and Data Science*. 2019;2(1):41—46. doi: 10.17977/um018v2i12019

Информация об авторах

Ангудович Яромир Игоревич, магистр, аспирант, инженер управления научных и инновационных исследований, Российский государственный гидрометеорологический университет, кафедра океанологии, yagomir.angudovich@mail.ru.

Татаренко Юрий Алексеевич, магистр, аспирант, старший преподаватель, Российский государственный гидрометеорологический университет, кафедра океанологии, tatarenko.yal@yandex.ru.

Information about authors

Angudovich Yaromir Igorevich, Master's degree, Postgraduate Student, Engineer of the Department of Scientific and Innovative Research, Russian State Hydrometeorological University, Department of Oceanology.

Tatarenko Yuri Alekseevich, Master's degree, Postgraduate Student, Senior Lecturer, Russian State Hydrometeorological University, Department of Oceanology.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 28.01.2025

Принята в печать 20.02.2025

The article was received on 28.01.2025

The article was accepted on 20.02.2025

Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 66—79.
Hydrometeorology and Ecology. 2025;(78):66—79.

Научная статья
УДК 551.467:[551.462.8+627.7](262.81)
doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-66-79

Оценка воздействия дрейфующих льдов Северного Каспия на дно и искусственные сооружения

Петр Иванович Бухарицин¹, Роман Сергеевич Орлов²

¹ Астраханская группа Института водных проблем РАН, г. Астрахань, Россия, astrgo@mail.ru

² Каспийский институт морского и речного транспорта им. генерала-адмирала Ф. М. Апраксина – филиал ФГБОУ ВО «ВГУВТ», г. Астрахань, Россия

Аннотация. Температурный и ветровой режимы холодного времени года Северного Каспия определяет площадь ледяного покрова, толщину льда, состояние и количество торосов в ледяном покрове и, следовательно, влияет на интенсивность дрейфа, процессы торошения и воздействия льда на дно, берега и искусственные гидротехнические сооружения на всей замерзающей, мелководной акватории Каспийского моря. Морские льды способны оказывать прямое механическое воздействие на дно и берега. Среди них наиболее опасна экзарация — деструктивное механическое воздействие льдов на грунт и искусственные сооружения, особенно в условиях колебаний уровня и ледяного покрова моря. Предлагается использование природных факторов для защиты стационарных буровых платформ, а также защиты морской акватории от возможных аварийных нефтяных разливов в ледовый период.

Ключевые слова: колебания уровня моря, рельеф дна, торосистость, экзарация дна, защита буровых платформ, предотвращение разливов нефти.

Для цитирования: Бухарицин П. И., Орлов Р. С. Оценка воздействия дрейфующих льдов Северного Каспия на дно и искусственные сооружения // Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 66—79. doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-66-79.

Original article

Assessment of the impact of the drifting ice of the Northern Caspian Sea on the bottom and artificial structures

Pyotr I. Bukharitsin¹, Roman S. Orlov²

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

² Caspian Institute of Marine and River Transport named after Admiral F. M. Apraksin — branch of the Federal State Budgetary Educational Institution “VGUVT”, Astrakhan, Russia

Summary. The temperature and wind regimes of the cold season of the Northern Caspian Sea determine the area of the ice cover, the thickness of the ice, the condition and number of hummocks in the ice

cover and, consequently, affect the intensity of drift, the processes of hummocking and the impact of ice on the bottom, shores and artificial hydraulic structures throughout the freezing, shallow waters of the Caspian Sea. All other things being equal, the current position of the sea level is an important factor determining the intensity of processes in the ice cover. Fluctuations in sea level can lead to significant changes in depth, changes in the topography of the seabed and, accordingly, can change the conditions for the formation of ice hummocks. Sea ice can have a direct mechanical effect on the bottom and shores. Among them, the most dangerous is exaration – the destructive mechanical effect of ice on the ground and artificial structures, especially in conditions of fluctuations in sea level and ice cover. The complexity of the problem is determined by the lack of knowledge of the interaction of the ice cover with the bottom sediments of the Northern Caspian Sea, as well as the lack of reliable means of protection against the effects of drifting ice, and especially ways to eliminate oil spills in ice conditions. It is proposed to use natural factors to protect stationary drilling platforms, as well as to protect the marine area from possible accidental oil spills during the ice period.

Keywords: sea level fluctuations, bottom relief, hummockiness, bottom exaration, protection of drilling platforms, prevention of oil spills.

For citation: Bukharitsin P. I., Orlov R. S. Assessment of the impact of the drifting ice of the Northern Caspian Sea on the bottom and artificial structures. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(78):(66—79). doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-66-79. (In Russ.).

Введение

Каспийское море относится к частично замерзающим морям, причем его мелководная северная часть замерзает ежегодно (рис. 1). В средней части моря лед появляется вдоль побережий лишь в суровые зимы, в южной части моря льда не бывает.

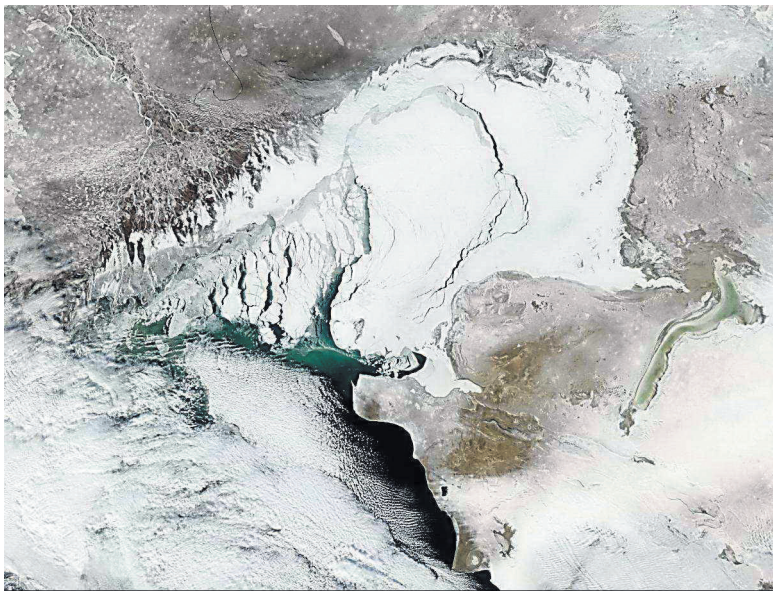


Рис. 1. Типичный ледяной покров мелководной северной части Каспийского моря в зимний период года.

Fig. 1. Annually in winter in the shallow northern part of the Caspian Sea an ice sheet is formed.

Ледовый период на Северном Каспии продолжается обычно с ноября по март. В отдельные годы, в зависимости от суровости конкретной зимы, начало и окончание ледового периода сдвигаются на месяц раньше или позже средних многолетних дат. Климатические и гидрометеорологические особенности Северного Каспия обуславливают более устойчивое льдообразование в восточных районах акватории по сравнению с западными, что проявляется в различии сроков наступления ледовых фаз и характере развития ледяного покрова в этих районах, расположенных в близких географических районах. Неподвижный лед в Каспийском море не является классическим припаем, представляющим собой сплошной ледяной покров, примерзающий к берегу и сохраняющийся в течение всей зимы. Частичный взлом припая здесь наблюдается ежегодно, а в северо-западных районах моря — в среднем каждую третью зиму припай взламывается и устанавливается вновь от берега до видимого горизонта 4—10 раз и более за сезон. В центральных районах Северного Каспия (Гурьевская бороздина) отдельные участки припая подвержены взлому, подвижкам и торошению даже в середине зимы. Не менее подвержена динамическим деформациям прикромочная зона припая в районах Кулалинской и Жемчужных банок. Многократный взлом припая, его подвижки, торошение и последующее смерзание приводят здесь к образованию мощных торосистых образований.

В начальный период льдообразования на поверхности моря появляется тонкий и прозрачный молодой лед (нилас), который под действием ветра и течений начинает двигаться (дрейфовать). С увеличением суммы отрицательных температур воздуха толщина льда увеличивается, однако даже в суровые зимы она в основном не превышает одного метра. В формировании и установлении ледяного покрова на Северном Каспии дрейфу льда принадлежит особое место. В целом характер дрейфа льда отличается сложностью, обусловленной малыми глубинами, особенностями рельефа дна, ветровым режимом, влиянием стоковых течений и колебаний уровня моря. При этом в ледяном покрове начинаются процессы насколения и торошения. На поверхности льда образуются мощные торосы.

Процесс разрушения ледяного покрова и очищения ото льда на Северном Каспии весной протекает в направлении обратном льдообразованию, т. е. с юга на север. Сроки его начала и интенсивность разрушения льда зависят от ледовитости моря к концу зимы и совокупности воздействующих на лед гидрометеорологических факторов: ветра, волнения, сгонно-нагонных колебаний уровня, течений, температуры воды и воздуха [1].

Сплоченные льды в северной части Каспия (7 баллов и более) вызывают серьезные затруднения при осуществлении зимних плаваний в этом районе моря. Навигационная обстановка осложняется еще и тем, что ледяной покров динамичен и положение кромки сплоченных льдов весьма изменчиво в пространстве и времени. Главными факторами, влияющими на положение кромки льдов, являются направление и скорость ветра.

Морские льды способны оказывать прямое механическое воздействие на дно и берега. Среди них наиболее опасна экзарация — деструктивное механическое воздействие льдов на грунт (рис. 2), связанное с динамикой ледяного покрова,



Рис. 2. Эфемерный островок, образовавшийся из донного грунта, перемещенного на поверхность дрейфующим льдом.

Fig. 2. An ephemeral island formed from bottom soil moved to the surface by drifting ice.

торошением и стамухообразованием под влиянием гидрометеорологических факторов: рельефа дна, мелководья или искусственных препятствий, в виде затопленных судов или гидротехнических сооружений [2—6].

Однако несмотря на то, что процессы взаимодействия дрейфующих льдов с дном и искусственными препятствиями уже на протяжении многих лет являются объектом повышенного интереса, как для отечественных, так и зарубежных исследователей, многие вопросы еще требуют ответа. Сложность проблемы определяется недостаточной изученностью взаимодействия ледяного покрова с донными отложениями Северного Каспия, а также отсутствием надежных средств защиты от воздействия дрейфующих льдов и особенно способов ликвидации разливов нефти в ледовых условиях. В работе [7] рассматриваются вопросы организации комплексного мониторинга Каспийского моря. Обсуждаются цели и задачи экологического мониторинга, а также функции федеральных служб и ведомств при организации и осуществлении мониторинга. Показаны основные характеристики сети морских наблюдений в морях России. Обсуждаются современные методы спутникового мониторинга окружающей среды, а также конкретные области применения спутниковых данных для изучения и мониторинга региона Каспийского моря. Особое внимание уделяется спутниковому мониторингу нефтяного загрязнения моря.

Практическому решению этих вопросов посвящены результаты данной работы.

Материалы и методы

При проектировании инженерных сооружений в замерзающих морях необходимы достоверные оценки интенсивности воздействия ледяных торосистых

образований на дно и глубины их внедрения в грунт. Недооценка масштабов экзарации может привести к повреждению сооружений. В связи с этим оценка и прогноз интенсивности ледовых воздействий являются ключевым звеном обеспечения геотехнической безопасности нефтегазовых объектов и экологической безопасности в акватории. Игнорирование данного вопроса нефтегазовыми компаниями, позиция которых в значительной мере усилена представлениями о глобальном потеплении и грядущей полной деградации ледяного покрова на Каспийском море, привело к тому, что большинство проектов реализовано без должного учета ледовых воздействий на дно и подводные сооружения. Так, практически все подводные трубопроводы на Северном Каспии были не заглублены в грунт. В результате произошла авария на нефтепромысле «*Кашаган*» в Казахском секторе Северного Каспия, где льдом были повреждены нитки трубопровода, проложенного по дну без заглубления.

Дрейфующий морской лед может привести к аварии и даже экологической катастрофе, если такая авария произойдет на буровой нефтяной платформе при наличии дрейфующих льдов. Нефтяные разливы в зимний период при наличии ледяного покрова значительно опаснее, потому что лед маскирует место нефтяного разлива, нефтяное пятно быстро мигрирует под лед, а подледные течения могут распространять нефтяное загрязнение подо льдом на большие расстояния, которые затруднительно не только ликвидировать, но даже обнаружить.

Сложность ликвидации последствий нефтяных разливов при наличии льда также заключается в их труднодоступности (удаленные от побережья и покрытые льдом обширные мелководья Северного Каспия практически недоступны для современной спасательной техники).

Самое главное, что в настоящее время отсутствуют эффективные методы и технические средства по локализации и ликвидации нефтяных разливов в условиях дрейфующих морских льдов.

Ледовые условия Каспийского моря характеризуются большой сложностью и изменчивостью. В холодные и экстремально холодные зимы припай может устанавливаться до изобаты 20 м. Максимальная толщина дрейфующего ровного льда на Северном Каспии даже в очень суровые зимы не превышает 60—70 см, а припая — 90—120 см. Однако значительную часть акватории может занимать так называемый наслоенный лед. Наслоение льда в Каспийском море наблюдается практически ежегодно и повсеместно в результате надвигов одной ледяной пластины на другую. Количество слоев может быть от 2—4, до 6—8, а их общая толщина может достигать 3 м [1].

Специфика ледовых условий Северного Каспия — относительно тонкий и «теплый» лед, обуславливающий относительно низкие прочностные характеристики ровного льда, а на фоне сильных ветров — это условия, особенно благоприятные для его взлома и торожения.

Максимальное количество торосов при всех типах зим наблюдается в зоне контакта припая (неподвижного льда) и дрейфующего (плавающего) льда. В результате того, что положение кромки припая в течение холодного сезона постоянно меняется, зона активного торожения захватывает большую площадь. Следствие

торосообразования — формирование на границе припая и плавучего льда гряд торосов, перпендикулярных направлению ветра, который вызывает торошение льдин. При этом характерно образование торосов, сидящих на грунте, т. е. стамух. Они могут достигать в поперечнике 100—300 м, иногда до 500 м и высоты 10—15 м. Максимальная зарегистрированная высота паруса стамухи составила 20 м. Максимальная глубина, до которой документально зафиксировано образование стамух на севере Каспийского моря, — 12 м [1].

Температурный режим Северо-Каспийского региона чрезвычайно неустойчив в зимний период и отличается большой межгодовой изменчивостью, особенно отчетливо выраженной на фоне глобальных изменений климата в последние десятилетия. Отношение суммы положительных значений температуры в теплые и холодные годы может отличаться в 7 раз. В последнее десятилетие период роста суммы отрицательных значений температуры, имевший место вплоть до 2004 г., сменился ее снижением. Этот фактор непосредственно влияет на состояние и площадь распространения ледяного покрова, положение границы припая, толщину льда и, соответственно, количество, размеры и местоположение торосистых образований.

При анализе количества гряд торосов и стамух в рассматриваемом регионе отмечается следующая закономерность: наибольшая торосистость наблюдается в годы со средней ледовитостью холодного периода; в суровые зимы большую часть акватории занимает устойчивый припай, препятствующий слишком активному торошению; в годы с мягкими зимами процесс торошения также ограничен не полностью покрытой льдом акваторией и малой толщиной льда [2].

Существенно влияют на процессы торошения мелководность, извилистость береговой линии и сложный рельеф дна с большим количеством подводных банок и кос [1]. При прочих равных термических условиях льдообразования важный фактор, определяющий интенсивность ледово-экзарационного процесса, — текущее положение уровня моря. Колебания уровня Каспия, достигающие за расчетный период эксплуатации гидротехнических сооружений нескольких метров, способны приводить к существенному перераспределению глубин и перестройке рельефа дна и, соответственно, менять условия формирования ледяных торосистых образований и экзарации ими дна и берегов (рис. 3) [4].

Современное весьма неравномерное распределение глубин на Северном Каспии — результат развития рельефа в голоцене. В нем запечатлелись периоды многочисленных трансгрессий, регрессий и стабилизаций положения уровня Каспийского моря. Очевидно, что в случае продолжительной трансгрессии (на 2 м и более) зона наиболее интенсивного ледово-экзарационного воздействия, соответствующая, по нашему мнению, интервалу глубины от 4 до 6 м, сместится на современные более мелководные участки и, напротив, в условиях регрессии эта область сместится вниз по современному подводному склону. Таким образом, в условиях трансгрессии область дна, подверженная ледово-экзарационному воздействию, заметно расширится, а в условиях регрессии — резко сократится.

Ледовому выпаживанию (взаимодействию дрейфующих льдов с морским дном) подвержено более чем 50 % площади Северного Каспия. Эти процессы

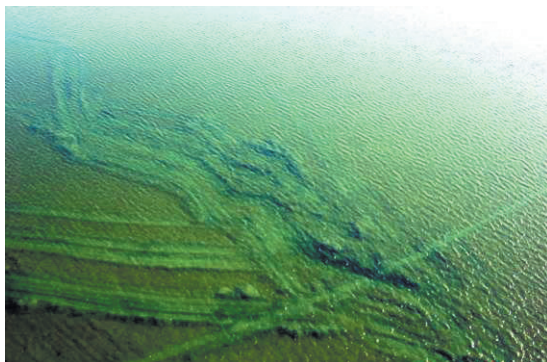


Рис. 3. Снимок с вертолёта дна акватории Северного Каспия. Дно покрыто свежими (в центре) и более старыми (внизу слева) бороздами выпаживания. Вправо от центра снимка видна глубокая впадина, образованная стамухой.

Fig. 3. Helicopter image of the bottom of the Northern Caspian Sea. The bottom is covered with fresh (in the center) and older (bottom left) plowing furrows. To the right of the center of the image, there is a deep depression formed by the stamukha.

носят массовый (хотя и сезонный) характер [8], и потому играют важную роль в экологии Каспийского моря. Вследствие механического воздействия дрейфующих льдов происходит не только перемещение огромного количества донного грунта, но и разрушение находящихся на дне раковин отмерших моллюсков.

В результате интенсивных ледовых подвижек известны случаи разрушения и разгерметизации заглушенных разведочных скважин на шельфе восточного (казахского) сектора Северного Каспия. Большое количество этих скважин находилось на морском побережье, но оказалось затопленными в период подъёма уровня Каспийского моря (1976—1996 гг.). Во избежание негативных последствий воздействия дрейфующих льдов в настоящее время для прокладки подводных трубопроводов используется особая технология, предусматривающая одновременное выполнение операций по рытью траншеи, укладке труб и обратной засыпке. Данная технология сводит к минимуму локальное воздействие на окружающую среду, что обеспечивает возможность ее восстановления за несколько недель.

Выполнение работ при помощи баржи для рытья траншей позволило ускорить укладку трубопроводов и сократить площадь техногенного воздействия на морское дно, а также продолжительность такого воздействия, до минимума. Для защиты от механических повреждений в результате подвижек льда укладка производилась на глубине 1,8 м ниже дна моря. Расчетный срок службы трубопроводов составляет 40 лет.

Российская компания Лукойл на протяжении ряда лет выполняет производственный и экологический мониторинг за заглушенными разведочными скважинами, расположенными на лицензионных участках дна, на глубинах от 8 до 28 м. Были выявлены серьезные повреждения бетонных заглушек скважин, расположенных на глубинах моря 8—8,5 м. Они оказались полностью разрушенными

(рис. 4 а, 4 б). Это однозначно указывает на механическое воздействие на них дрейфующих льдов. Кроме того, вокруг этих скважин водолазы зафиксировали на дне наличие раздробленных раковин, что характерно для участков дна Северного Каспия, находящихся под воздействием ледово-экзарационных процессов.

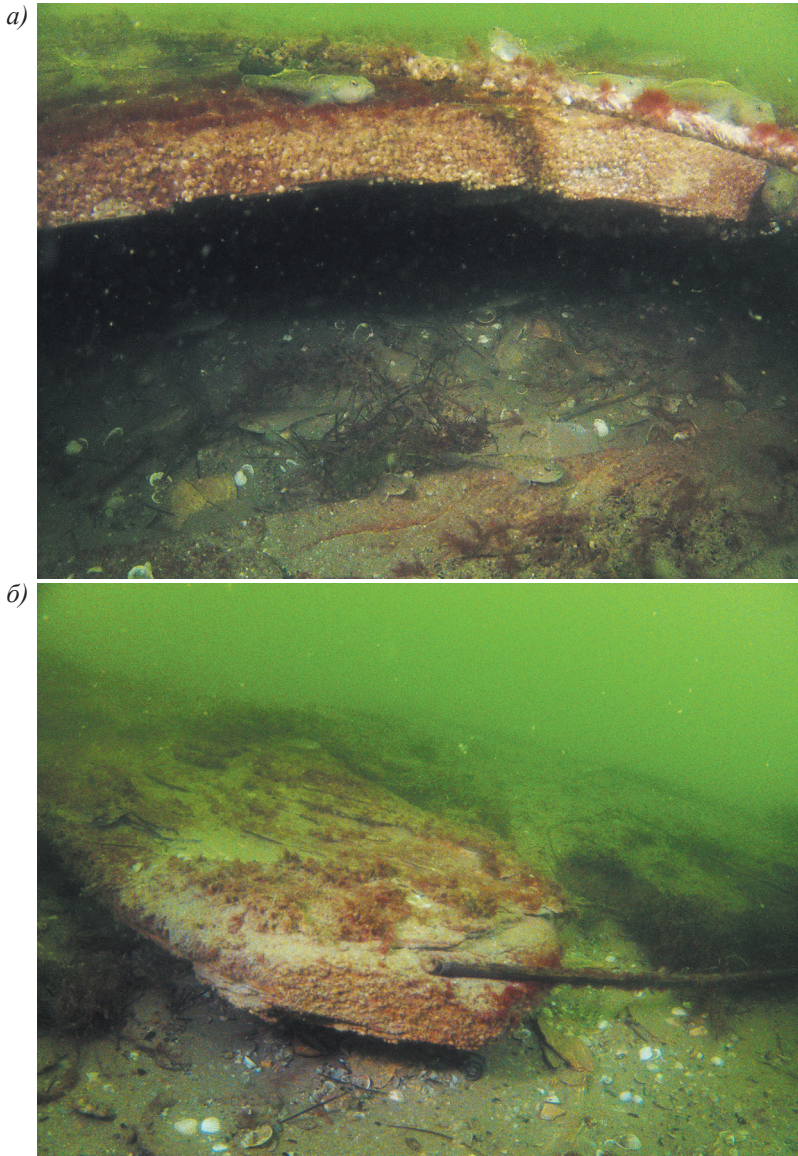


Рис. 4. Полностью разрушенная льдом бетонная заглушка скважины. Глубина моря — 8,0 м.

Fig. 4. The concrete plug of the well completely destroyed by ice. The sea depth is 8.0 meters.

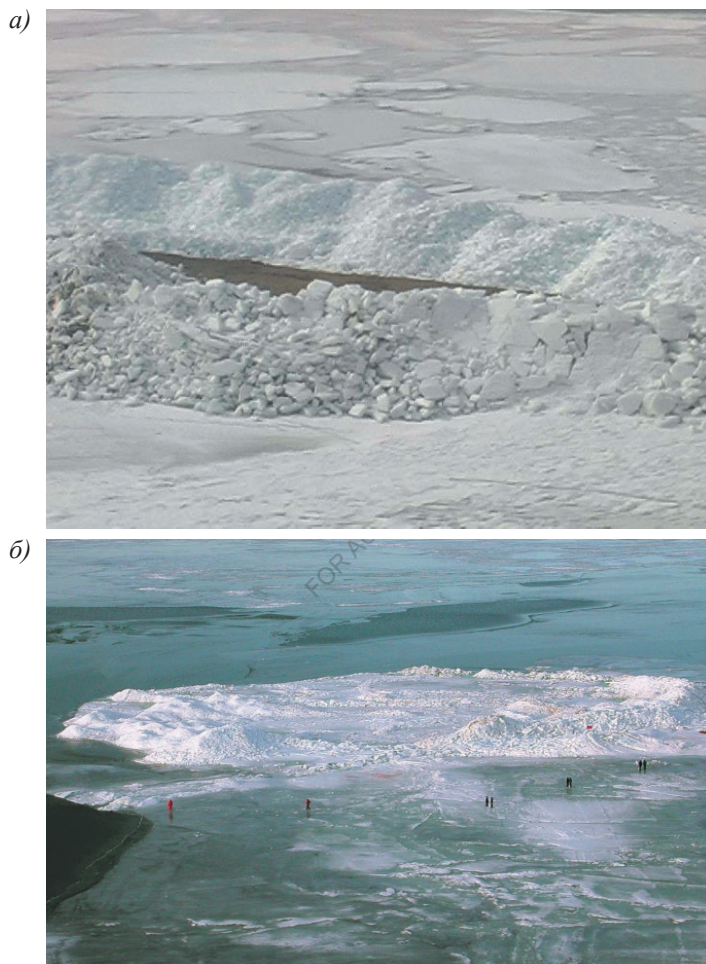


Рис. 5. Кольцевые стамухи на Северном Каспии.

Fig. 5. Ringed stamukhs in the Northern Caspian Sea.

Еще одной уникальной особенностью процессов торошения льдов Каспийского моря является образование так называемых кольцевых стамух [1]. Как правило, они образуются вокруг мелководных банок (иногда внутри такой стамухи вода полностью отсутствует) (рис. 5 а, 5 б), или вокруг искусственных препятствий.

Результаты и обсуждение. Предлагаемые практические решения

Описанная выше особенность торошения каспийских льдов была реализована в проекте: «Способ и устройство защиты буровых объектов от разрушения при движении ледовых полей» (Патент на полезную модель № 2006142247/03



Рис. 6. Использование природных факторов при защите морской акватории от возможных аварийных нефтяных разливов в ледовый период.

Fig. 6. The use of natural factors in protecting the marine area from possible accidental oil spills during the ice period.

от 06.02.2007 г.). Предлагаемый способ и устройство относятся к области нефтяной и газовой промышленности, к защите их от разрушения при эксплуатации в море, в частности, на Северном Каспии в ледовых условиях.

Устройство для защиты буровых объектов от разрушения при движении ледяных полей представляет собой искусственно созданное препятствие на пути дрейфующих льдов в виде регулируемых по высоте металлических щитов, установленных на дне водоема по периметру бурового объекта и закрепленных на дне винтовыми сваями. Щиты инициируют торошение дрейфующих льдов и образуют вокруг бурового объекта на грунте круговой торос — кольцевую стамуху.

Техническим результатом предлагаемого устройства является дальнейшее усовершенствование устройств защиты от разрушения буровых объектов морской разведки и добычи. Предлагаемое устройство решает задачу защиты от разрушения буровых объектов морской разведки и добычи. Оно включает буровой объект; защитный барьер, состоящий из металлических щитов, установленных на дне водоема, и винтовых свай. Также на схеме (рис. 6) обозначена кольцевая стамуха.

Устройство работает следующим образом. Вокруг бурового объекта устанавливают защитный барьер, обеспечивающий торошение ледяных полей, и закрепляют его четырьмя-шестью винтовыми сваями, которые обеспечивают надежную фиксацию защитного барьера на дне, углубляя их в грунт на 10 м или более, и инициируют образование кольцевой стамухи вокруг бурового объекта.

Дрейфующие под действием ветра ледяные поля встречаются на своем пути защитный барьер, расположенный вокруг бурового объекта, и ломаются. Из-за частой смены направлений ветра при всех типах зим направление и скорость дрейфа льда в море также часто меняется, до 2—5 раз в сутки. Происходит торошение льда, при этом в результате многократной смены направлений ветра с учетом их



Рис. 7. Специально сконструированные и построенные на астраханских верфях баржи «Ледовый барьер» надёжно защищают буровой объект от воздействия дрейфующих льдов.

Fig. 7. The Ice Barrier barges, specially designed and built at Astrakhan shipyards, reliably protect the drilling facility from the effects of drifting ice.

повторяемости вокруг бурового объекта образуется кольцевой торос, сидящий на грунте, который в дальнейшем защищает его от сдвига и разрушения.

Одновременно решается еще одна очень важная проблема — обеспечение экологической безопасности вод Северного Каспия в результате возможных аварийных разливов нефти, поскольку кольцевая стамуха, образовавшаяся вокруг бурового объекта, обеспечивает надежную локализацию источника нефтяного (и любого другого) загрязнения, ограниченного внутренними размерами кольцевой стамухи. Ликвидировать же последствия загрязнения внутри кольцевой стамухи значительно проще, дешевле и безопаснее, чем в открытом море, покрытом дрейфующим, торосистым льдом.

Предлагаемая схема защиты буровых объектов в море достаточно эффективна в период льдообразования, дрейфа и торошения ледяных полей, обеспечивая их безопасную эксплуатацию. Подобный проект реализован и в настоящее время успешно эксплуатируется в Казахском секторе Северного Каспия. Ледоколы являются основным транспортным средством для персонала, обслуживающего эти морские объекты в зимний период. С вертолета хорошо видны барьеры ледовой защиты, окружающие искусственный остров со всех сторон и обеспечивающие защиту объектов ото льда в зимний период, с ноября по апрель (рис. 7).

Выводы и заключение

Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря отличаются большой межгодовой и вековой изменчивостью [9—11]. Состояние и динамика ледяного покрова Северного Каспия и его экзарационное воздействие на дно также подвержены изменениям. Температурный режим холодного периода года определяет состояние и торосистость ледяного покрова, тем

самым влияя на интенсивность воздействия ледяных торосистых образований на берега и дно. При прочих равных синоптических условиях льдообразования важный фактор, определяющий интенсивность ледово-экзарационного процесса в условиях мелководий Северного Каспия — это текущее положение уровня моря, влияющее на вероятность контакта ледяных торосистых образований с дном. Колебания уровня Каспия, достигающие за расчетный период эксплуатации гидротехнических сооружений нескольких метров, способны приводить к существенному перераспределению глубин и перестройке рельефа дна и соответственно менять условия формирования ледяных торосистых образований и экзарации ими дна и берегов.

В реализации проекта «*Ледовый барьер*» принимают участие более 200 судов (буксиры, баржи, транспортные суда, суда-трубоукладчики, жилые суда и др.). Данный флот работает в чрезвычайно сложной для данной отрасли промышленности мелководной среде, скованной льдом в зимний период.

К настоящему моменту вопрос прогноза интенсивности воздействия ледяного покрова на дно Северного Каспия остается открытым и требует продолжения исследований. Сложность решаемой проблемы определяется слабой изученностью процессов взаимодействия ледяного покрова с грунтовым основанием дна Северного Каспия, а также чрезвычайно высокой изменчивостью положения уровня моря и его ледяного покрова.

Список литературы

1. Яицкая Н. А., Магаева А. А. Ледовый режим Северного Каспия // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. № 6. С. 63—72.
2. Лобанов В. А., Наурузбаева Ж. К. О возможных изменениях толщины морского льда в Каспийском море в текущем столетии // Гидрометеорология и экология. 2021. № 62. С. 75—95. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-75-95.
3. Maznev S., Ogorodov S., Baranskaya A. et al. Ice-Gouging Topography of the Exposed Aral Sea Bed. Remote Sens. 2019. 11. p. 113; doi:10.3390/rs11020113 www.mdpi.com/journal/remotesensing.
4. Огородов С. А., Мазнев С. В., Бухарицин П. И. Ледово-экзарационный рельеф на дне Каспийского и Аральского морей // Известия РГО. 2019. Т. 151, Вып. 2, С. 35—50. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151235-50>.
5. Харитонов В. В., Бородкин В. Б. Стамухи: термины и методы исследования // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 4, С. 19—24. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-4(19-24).
6. Bukharitsin P. I., Bukharitsin A. P. Ivanov Yu. A. et al. Parametric Approach to Geo-Ecological Studies of Hydrocarbon Development in the Offshore Area of the Caspian Sea. Int J Earth Sci Geophys. 2020. Vol. 6. No. 2. 14 pp. DOI: 10.35840/2631-5033/1836.
7. Костяной А. Г. О необходимости организации комплексного мониторинга Каспийского моря // Проблемы постсоветского пространства. 2014. Т.1. №2 С.110—140. DOI:10.24975/2313-8920-2014-0-2-44-56.
8. Бухарицин П. И. О статье «Климатические изменения толщины льда» на Северном Каспии // Ученые записки РГГМУ. 2018. №53. С. 188—191.
9. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Серых И. В., Лебедев С. А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980—2020) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 5. С. 277—291. doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291.
10. Малинин В. Н. Грозит ли Каспию судьба Арала? Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 746—760. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-746-760.

11. Ивкина Н., Наурозбаева Ж., Клове Б. Влияние изменения климатических условий на ледовый режим Каспийского моря // Центральноазиатский журнал исследований воды. 2017. 3(2). С. 15—29.

References

1. Yaitskaya N. A., Magaeva A. A. The ice regime of the Northern Caspian Sea. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya = Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography*. 2020; (6): (63—72). (In Russ.).
2. Lobanov V. A., Naurozbayeva Zh. K. On possible changes in the thickness of sea ice in the Caspian Sea in the current century. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2021; (62): (75—95). doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-75-95. (In Russ.).
3. Maznev S., Ogorodov S., Baranskaya A. et al. Ice-Gouging Topography of the Exposed Aral Sea Bed. *Remote Sens*. 2019; (11): 113. doi:10.3390/rs11020113.
4. Ogorodov S. A., Maznev S. V., Bukharitsin P. I. Ice-extraction relief at the bottom of the Caspian and Aral seas. *Izvestiya RGO = Izv. RGO*. 2019; 151(2): (35—50). doi.org/10.31857/S0869-6071151235-50. (In Russ.).
5. Kharitonov V. V., Borodkin V. B. Stamukhi: terms and research methods. *Kriosfera Zemli = Cryosphere of the Earth*. 2020; 24(4): (19—24). DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-4(19-24). (In Russ.).
6. Bukharitsin P. I., Bukharitsin A. P. Ivanov Yu. A. et al. Parametric Approach to Geo-Ecological Studies of Hydrocarbon Development in the Offshore Area of the Caspian Sea // *Int J Earth Sci Geophys*. 2020; 6(2): 14. DOI: 10.35840/2631-5033/1836.
7. Kostyanoy A. G. On the need to organize integrated monitoring of the Caspian Sea. *Problemy postsovet-skogo prostranstva = Problems of the post-Soviet space*. 2014; 1(2): (110—140). DOI:10.24975/2313-8920-2014-0-2-44-56. (In Russ.).
8. Bukharitsin P. I. On the article “Climatic changes in ice thickness” in the Northern Caspian Sea. *Uchenyye zapiski RGGMU = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2018; (53): (188—191). (In Russ.).
9. Ginzburg A. I., Kostyanoy A. G., Serykh I. V., Lebedev S. A. Climatic changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980-2020). *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2021; 18(5): (277—291). doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291. (In Russ.).
10. Malinin V. N. Is the fate of the Aral Sea threatening the Caspian Sea? *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2022; (69): (746—760). doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-746-760. (In Russ.).
11. Ivkina N., Naurozbayeva Zh., Klove B. The influence of climate change on the ice regime of the Caspian Sea. *Tsentral'noaziatskiy zhurnal issledovaniy vody = Central Asian Journal of Water Research*. 2017; 3(2): (15—29). (In Russ.).

Информация об авторах

Бухарицин Петр Иванович, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, профессор, руководитель группы исследований экологических проблем в дельте р. Волги, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН), astrgo@mail.ru.

Орлов Роман Сергеевич, доцент кафедры «Судовождение», Каспийский институт морского и речного транспорта им. генерала-адмирала Ф. М. Апраксина — филиал ФГБОУ ВО «ВГУВТ», г. Астрахань, Россия.

Information about authors

Buharitsin Petr Ivanovich, Doctor of Geographical Sciences, Leading Researcher, Professor, Head of the Group for Research of Environmental Problems in the Volga Delta, Federal State Budgetary Scientific Institution Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences.

Orlov Roman S., Associate Professor of the Department of Navigation, Caspian Institute of Marine and River Transport named after Admiral F. M. Apraksin — branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “VGUVT”.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 21.12.2024

Принята к печати после доработки 04.02.2025

The article was received on 21.12.2024

The article was accepted after revision on 04.02.2025

Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 80—112.
Hydrometeorology and Ecology. 2025;(78):80—112.

ЭКОЛОГИЯ. ОБЗОР

Научная статья

УДК 001.891.573:001.891.55:574.5:502.2(28)

doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-80-112

Математическое моделирование как средство выхода за рамки возможного натурного эксперимента при изучении и прогнозировании изменений водных объектов и их экосистем

Сергей Алексеевич Кондратьев

Институт озераедения РАН — Институт озераедения РАН — обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН (ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербург, Россия, 3718470@gmail.com

Аннотация. Аналитический обзор работ по моделированию процессов тепло и массопереноса в системе «водосбор—водоток—водоем» выполнен с позиции оценки использования математических моделей в качестве средств выхода за рамки возможных натуральных исследований. Рассмотрены результаты нескольких проектов, реализованных с применением модельной системы, разработанной в Институте озераедения РАН. Математические модели, входящие в систему, использовались в ситуациях, когда решение поставленных задач на основе натуральных наблюдений затруднено или невозможно. В процессе моделирования были задействованы результаты дистанционного зондирования Земли, климатический реанализ и сценарии возможных климатических изменений в регионах исследований.

Ключевые слова: модельная система, водосбор, водоток, водоем, тепло и массоперенос.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках темы FFZF-2024-0001 Государственного задания Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН.

Для цитирования: Кондратьев С. А. Математическое моделирование как средство выхода за рамки возможного натурного эксперимента при изучении и прогнозировании изменений водных объектов и их экосистем // Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 80—112. doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-80-112.

Original article

Mathematical modelling as a means of going beyond possible field experiments in research and forecasting of changes in water bodies

Sergey A. Kondratyev

Institute of Limnology RAS — separate structural subdivision of St. Petersburg Federal Research Center RAS, St. Petersburg, Russia, 3718479@gmail.com

Summary. The analytical review of works on modelling of heat and mass transfer processes in the system ‘catchment—watercourse—watershed’ is carried out from the position of evaluation of the use of mathematical models as a means of going beyond the limits of possible in-situ studies. The results of several projects implemented with the use of the model system developed at the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences are considered. The system includes 0, 1, 2, 3-dimensional deterministic models describing the processes of runoff, water erosion and removal of nutrients from the catchment, formation of nutrient load on water bodies, internal load due to the removal of substances from bottom sediments, channel movement of two-phase flow, heat and mass transfer in the reservoir, as well as a stochastic generator of meteorological parameters. Mathematical models included in the system were used in situations when it is difficult or impossible to solve the set tasks on the basis of in-situ observations. The solution of problems of remote estimation of characteristics of unstudied lakes of northern territories, forecast of consequences of emergency situation at the landfill of especially hazardous waste, detailed study of three-dimensional heat and mass transfer in water and bottom sediments of a complex lake system, forecast of changes in runoff and nutrient load on the lake from the catchment under different scenarios of future climatic changes, as well as the use of a stochastic generator of meteorological parameters to obtain distribution functions of runoff and nutrient load on the lake under different scenarios of future climatic changes are considered. The results of remote sensing, climate reanalysis and scenarios of possible climatic changes in the study regions were used in the modelling process. It is shown that in the above and many other tasks computational experiment, simulation and predictive modelling can be successfully used to obtain important scientific and practical results beyond the limits of possible in-situ measurements.

Key words: model system, catchment, watercourse, water body, heat and mass transfer.

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of Project FFZF-2024-0001 of the State Assignment of the St. Petersburg Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Kondratyev S. A. Mathematical modelling as a means of going beyond possible field experiments in research and forecasting of changes in water bodies. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(78):(80—112). doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-80-112. (In Russ.).

Введение

Основной системы получения информации о состоянии окружающей среды является наблюдательная сеть, включающая в себя наземную систему стационарных и подвижных пунктов наблюдений, предназначенных для наблюдений за физическими и химическими процессами, происходящими в окружающей среде, определение ее гидрометеорологических и гелиогеофизических характеристик, а также уровня загрязнения атмосферного воздуха, почв и водных объектов, в том числе по гидробиологическим показателям, и космическую наблюдательную

систему [1]. Существующая в настоящее время плотность измерительной сети Росгидромета в большинстве районов нашей страны недостаточна для получения состоятельных оценок изменчивости природной среды. Так, в Арктической зоне Российской Федерации расстояние между пунктами гидрологических наблюдений достигает 800—1300 км, что в 2—3 раза ниже пределов, определенных руководящими документами Росгидромета и в 5 раз ниже рекомендованных Всемирной Метеорологической Организацией [2]. Едва ли можно надеяться на существенное улучшение ситуации в ближайшем будущем. В сложившейся ситуации потребность в количественном описании природных явлений и прогнозе естественных и антропогенных изменений окружающей среды привела к необходимости создания такого инструмента решения задач охраны и рационального использования природных ресурсов как математические модели. В современной системе мониторинга окружающей среды математические модели являются инструментом для расширения возможностей существующей системы измерения характеристик природных процессов и систем за счет проведения вычислительных экспериментов, выполнения имитационных и прогностических расчетов.

Постановка натуральных экспериментов на водных объектах (реках, озерах, водохранилищах) и их водосборных бассейнах обычно требует больших затрат времени и средств. Кроме того, как показывает многолетняя практика, если натурные эксперименты не были подкреплены результатами моделирования, то полученные на их основе выводы оказываются малоубедительными, нередко противоречивыми и плохо поддаются обобщению как во времени, так и в пространстве. В подобной ситуации насущной необходимостью становится проведение имитационного моделирования или вычислительного эксперимента с целью «изучения, прогнозирования, оптимизации сложных многопараметрических нелинейных процессов, теоретическое и экспериментальное исследование которых традиционными методами затруднено или невозможно» [3].

В настоящей статье представлен аналитический обзор результатов нескольких исследований водных объектов, их экосистем и водосборов, которые выполнял Институт озераведения РАН (ИНОЗ РАН) в последние годы, где методами математического моделирования получены результаты, выходящие за рамки возможных натуральных измерений.

Методика исследований

Современный уровень развития методов экспериментальных исследований и обобщения их результатов, компьютерных и геоинформационных технологий способствует созданию все более сложных и детальных моделей. Расширяется область их практического применения. Порой создается иллюзия возможности построения универсальной, учитывающей все многообразие описываемых процессов и пригодной для решения широкого спектра практических задач математической модели. Однако на настоящем этапе развития науки это вряд ли возможно и целесообразно, так как любое физическое явление, взятое во всей своей полноте, настолько сложно, что исследователь часто не имеет исчерпывающего представления даже о физических закономерностях изучаемых процессов. В такой

ситуации уровень математического моделирования не может превышать существующий уровень знаний. Очевидно, говорить о создании универсальной модели пока преждевременно [4].

В связи с этим необходимость создания методической основы и средств построения математических моделей, имеющих рациональную структуру, т. е. ориентированных на решение конкретных задач при минимальной сложности как информационной, так и вычислительной. Последнее достигается за счет использования «модульной архитектуры» компонентно-ориентированного моделирования, имеющего ряд существенных преимуществ по сравнению с обычной «монолитной» техникой моделирования [5]. Отсюда следует, что:

- Разработка и модификация отдельного компонента намного более легкая задача, чем разработка целой системы моделей.
- Модульная структура делает возможной постепенную разработку программ.
- Разные компоненты могут быть написаны разными группами исследователей, работающими независимо друг от друга. Необходимо лишь придерживаться определенных, заранее установленных стандартов, оговаривающих реализацию взаимодействия модулей для обеспечения их совместимости. Внутренняя реализация модуля (алгоритм работы подмодели) может быть произвольной.
- Разные компоненты могут быть написаны на разных языках программирования.
- Возможно повторное использование подмодели в составе других моделей.
- Компоненты могут легко заменяться на другие без необходимости перекомпиляции всей модели. Это позволяет проводить сравнительное тестирование разных моделей одного и того же процесса.
- Возможно создание систем, изменяющих свою функциональность в зависимости от предъявляемых к ним требований.
- Модульная архитектура облегчает распараллеливание вычислений. Это может быть реализовано как при одновременном исполнении нескольких подмоделей, так и запуске нескольких копий одной подмодели [6].

При использовании компонентно-ориентированного подхода необходимо найти разумный баланс между требованиями к стандартизации интерфейса модулей и оптимизацией каждого модуля под конкретную выполняемую им задачу [7]. В соответствии с результатами исследований, представленных в работе [4], для успешного решения разнообразных задач, связанных с моделированием процессов на водосборе и формированием внешней нагрузки на водные объекты, специалист должен иметь в своем распоряжении систему «частных моделей» или «под-моделей» (sub-models), которые описывают изучаемые процессы с различной степенью детализации. В упомянутой выше работе предложено понятие «банк моделей» (по аналогии с банками данных). Термин «банк моделей» означает в данном случае совокупность математических моделей различной степени сложности, описывающих отдельные составляющие процессов массопереноса. Модели, входящие в «банк моделей», могут работать как в комплексе, так и самостоятельно. Результатом многолетних исследований в области моделирования водных объектов является детерминированно-стохастическая модельная система



Рис. 1. Основные компоненты модельной системы Института озераведения РАН, описывающей тепло-массоперенос в системе «водосбор—водоток—водоем».

Fig. 1. Main components of the model system of the Institute of Limnology RAS describing heat and mass transfer in the «catchment-watercourse-watershed» system.

ИНОЗ РАН, ориентированная на количественную оценку процессов тепло- и массопереноса в системе «водосбор—водоток—водоем», а также на прогнозирование последствий воздействия на водные экосистемы антропогенных и климатических факторов в условиях дефицита данных натурных наблюдений [8, 9]. Схема модельной системы представлена на рис. 1.

Компоненты системы, верифицированные и апробированные на практике, могут использоваться в любом сочетании в зависимости от условий решаемой задачи, что существенно расширяет возможности ее прикладного применения. На сегодняшний день в состав модельной системы входят следующие компоненты:

- Модель формирования стока на водосборе *ILHM* [4, 8].
- Модель испарения с леса *EVAPFOR* [10].
- Модель выноса химических веществ с водосбора и формирования нагрузки на водный объект – *ILLM* [4, 8].
- Модель склоновой эрозии [11].
- Математическая модель движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в открытом русле (1D, 2D, 3D) [8,12].

- Модель годового твердого стока [8, 11].
- Модель массообмена с дном [13, 14].
- Модель эвтрофирования озера (Фолленвайдера) [4].
- 1D-модель теплового режима и перемешивания водоёма FLake [15, 16, 17, 18].
- 1D-модель динамики неконсервативной примеси в водоеме FLakeEco [19].
- 2D-модель течений и транспорта наносов в мелководном водоеме [8, 11, 12].
- 3D-модель тепло и массопереноса в водоеме МГВМ, адаптированная к озерным условиям [20, 21, 22].
- Стохастический генератор метеоэлементов (стохастическая модель погоды) [8, 23].

Объединение компонентов модельной системы в модель конкретного изучаемого объекта происходит в соответствии со следующими определяющими факторами [24]: требованиями поставленной задачи; особенностями строения объекта исследования; наличием и размещением пунктов измерительной сети, являющихся источником исходной информации для моделирования; возможностями потребителя при компьютерной реализации модели.

Ниже представлены примеры использования различных компонентов разработанной модельной системы при решении задач, связанных с количественной оценкой и прогнозом тепло и массопереноса в системе «водосбор—водоток—водоем», в которых наглядно реализовались возможности моделей по выходу за пределы возможных натуральных наблюдений и измерений.

Результаты исследований

1. Оценка характеристик малоизученных водоемов северных территорий с использованием методов моделирования и дистанционного зондирования

На современных спутниковых снимках в пределах Российской Федерации дешифрируется примерно 3,8 млн естественных водоемов. Только в районах распространения многолетнемерзлых пород их 3,3 млн (Σ 88 % от общего числа по стране) [25]. Водные объекты этих территорий относятся к категории малоизученных и неизученных из-за их труднодоступности и невозможности выполнения регулярных контактных измерений морфометрических, термогидродинамических и других характеристик. В 2023 г. в Институте озероведения РАН выполнены исследования с целью разработки методики ретроспективной и прогностической оценки характеристик озер площадью до 100 км² на основе методов математического моделирования с использованием спутниковой информации [26, 27]. Схема предлагаемой методики представлена на рис. 2.

Основные этапы выполнения дистанционной оценки гидротермодинамических (ГТД) и химико-биологических параметров озер сводятся к следующему:

- С использованием средств дистанционного зондирования Земли дешифрируется интересующий водный объект, определяются его географические координаты и площадь водной поверхности.



Рис. 2. Схема ретроспективной и прогностической оценки характеристик неизученных озер с использованием методов дистанционного зондирования и математического моделирования.

Fig. 2. Scheme of retrospective and prognostic assessment of characteristics of unstudied lakes using remote sensing and mathematical modelling.

— С использованием доступных баз данных (например, HydroLAKES и WORDLAKE) строятся геостатистические взаимосвязи между морфометрическими характеристиками однородной группы водных объектов, прежде всего $H = f(A)$, где H — средняя глубина водоема, A — площадь его акватории.

— На основе полученной геостатистической зависимости рассчитывается средняя глубина водоема, которая является одним из входных параметров одномерных моделей FLake и FLakeEco.

— По географическим координатам водного объекта из баз данных метеорологического реанализа (например, ERA 5 или NCEP/NCAR), которые содержат ряды восстановленных значений метеорологических параметров для всего земного шара, извлекается метеоинформация требуемого разрешения.

— Метеопараметры реанализа в совокупности с рассчитанной глубиной водоема являются основой для ретроспективной оценки характеристик водного объекта.

— Для оценки последствий возможных климатических изменений к концу XXI века могут быть использованы сценарии выбросов парниковых газов SSP (Shared Socio-economic Pathway) — SSP1-2.6 и SSP5-8.5.

— Прогностические сценарии изменения характеристик водоема основаны на результатах пересчета сценариев выбросов парниковых газов SSP в метеорологические параметры региона исследований по моделям общей циркуляции атмосферы и океана.

— Метеопараметры, рассчитанные по моделям общей циркуляции атмосферы и океана в совокупности с рассчитанной глубиной водоема, являются основой для прогностической оценки характеристик водного объекта.

— Ретроспективные и прогностические расчёты гидротермодинамических характеристик неизученных водных объектов на основе модели FLake могут выполняться без дополнительной её верификации, так как модель априори применима для использования на территории России. Модель FLakeEco требует дополнительной верификации по данным натуральных наблюдений с целью определения химико-биологических параметров.

В работе [27] представлены результаты использования приведенной выше методики для оценки характеристик малоизученных и неизученных генетически разнотипных озер Якутии, морфометрия которых описана в работе [28]. В этой же работе представлены значения средней глубины озера, площади зеркала и объема водной массы озера для различных типов морфометрически изученных озер Якутии. Средством получения дистанционной оценки характеристик неизученных озер в годы различной водности могут служить каталоги данных Global Surface Water [29], полученные на основе проекта Copernicus [30] и снимков со спутников спутника Landsat.

Одним из основных элементов предлагаемой методики оценки характеристик неизученных озер зоны многолетней мерзлоты является гидрофизическая модель озера FLake, разработанная совместными усилиями сотрудников Института озероведения РАН, Института водных проблем Севера РАН, Института водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии (IGB) и Службы погоды Германии (DWD) [16, 18, 17]. Модель представляет собой универсальную параметризованную одномерную математическую модель ГТД процессов в озере, в которой реализованы результаты исследований, полученные в ходе многолетних натуральных и лабораторных исследований, выполненных на Лимнологической станции Института озероведения РАН, а также последние мировые достижения в области физической лимнологии. В настоящее время *FLake* служит базовым инструментом для разработки моделей функционирования водных экосистем и формирования качества воды в природных и искусственных водоемах, используется как учебное пособие при подготовке специалистов экологов и гидрометеорологов. В качестве метода учета влияния озер на формирование локальных климатических условий широко внедрена в практику численного прогноза погоды в метеорологических организациях разных стран и Международного Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды [31]. Кроме того, прогностическая система COSMO [32], используемая и в нашей стране для составления прогнозов погоды

на всей территории РФ, также включает FLake в качестве средства оценки влияния пресноводных озер на локальный климат по всему миру. Из этого следует, что модель априори может использоваться на неизученных водоемах озерных регионов, рассматриваемых в настоящей работе без дополнительной верификации и апробации, что нельзя сказать про модель FLakeEco.

Модель FLake основана на решении одномерного нестационарного уравнения теплопроводности как в водной массе, так и в донных отложениях. При этом вертикальные профили описываются автомодельными представлениями в обеих средах, что позволяет избежать расчета/задания коэффициентов турбулентного/молекулярного обмена, а саму систему уравнений свести к обыкновенным дифференциальным уравнениям. Последнее делает модель высокоэффективной с точки зрения затрат вычислительного времени.

Несмотря на обширные возможности модели и ее универсальность, водные объекты, к которым применяется модель, должны удовлетворять следующим условиям:

— Протяженность не должна быть настолько велика, чтобы породить значительные климатические различия между отдельными участками акватории, и не настолько мала, чтобы вторичная ветровая циркуляция играла очень существенную роль.

— Дно должно быть более или менее ровным и горизонтальным, чтобы его можно было аппроксимировать горизонтальной плоскостью.

— Адвективные процессы не должны вносить существенного вклада в турбулентное перемешивание.

Данные метеорологического реанализа использовались для задания атмосферного воздействия («форсинга») на озеро. Реанализ объединяет данные детерминированного моделирования с натурными наблюдениями по всему миру в глобально полный и согласованный набор данных. Принцип такого объединения данных основан на ассимиляции данных, используемых в центрах численного прогнозирования погоды, где каждые несколько часов предыдущий прогноз оптимальным образом комбинируется с новыми доступными наблюдениями для получения новой наилучшей оценки состояния атмосферы.

В настоящей работе в качестве входной информации для гидротермодинамического моделирования послужили данные реанализа семейства ERA5 [33]. Реанализы ERA5 содержат ряды восстановленных значений метеорологических параметров для всего земного шара, которые обновляются ежедневно с задержкой около пяти дней. ERA5 — это пятое поколение реанализа для глобального климата и погоды за последние восемь десятилетий. Данные доступны с 1940 г. по настоящее время.

Для оценки последствий возможных климатических изменений и их влияния на характеристики водоемов в работе использованы так называемые SSP (Shared Socio-economic Pathway) сценарии эволюции антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу [34, 35]. Принималось, что до конца XXI в. выбросы парниковых газов будут осуществляться по сценариям SSP1-2.6 и SSP5-8.5, т. е. по лучшему и худшему с точки зрения воздействия на окружающую среду. Сценарий

SSP1-2.6 требует, чтобы выбросы диоксида углерода (CO_2) начали неуклонно снижаться и достигли нуля к 2100 г. Выбросы метана (CH_4) должны уменьшиться на половину, при этом уровень выбросов диоксида серы (SO_2) составит примерно 10 % от уровня 1980—1990 гг. В сценарии SSP5-8.5 выбросы продолжают расти в течение всего XXI в. теми же темпами, что и сейчас. Цифры в аббревиатурах сценариев (2,6 и 8,5) указывают на дополнительное количество энергии (Вт/м^2), которое будет аккумулировано атмосферой в результате выбросов парниковых газов. Значения метеорологических параметров (осадков и температуры воздуха), соответствующих реализации сценариев социально-экономической деятельности человека SSP в изучаемом регионе на период до 2100 г., рассчитаны с использованием климатической модели MPI-ESM-MR (Институт Макса Планка, Германия).

Возможности математического моделирования при решении задач количественной оценки и прогноза возможных изменений гидротермодинамических (ГТД) характеристик озер различного происхождения на основе информации об их морфометрии продемонстрированы на примере решения следующих трех задач имитационного моделирования [27]:

— Расчет внутригодовой динамики ГТД характеристик водной массы и донных отложений в различных климатических областях Якутии.

— Расчет внутригодовой динамики ГТД характеристик водной массы и донных отложений в озерах различного происхождения.

— Ретроспективная и прогностическая оценки динамики среднегодовых ГТД характеристик озер за период 1940—2100 гг.

Последняя задача представляется наиболее интересной с точки зрения демонстрации выхода методов математического моделирования за пределы возможностей натуральных измерений на изучаемых объектах.

Ретроспективная и прогностическая оценки динамики среднегодовых ГТД характеристик озер проводились за период 1940—2100 гг. Расчеты выполнялись для озера ледникового происхождения ($66,934360^\circ$ с.ш., $130,522173^\circ$ в.д.), расположенного в климатической области умеренного континентального климата с достаточным увлажнением со средними морфометрическими характеристиками [28]. Ретроспективная динамика среднегодовой температуры водной массы и средней толщины ледового покрова за период 1940—2022 гг. моделировалась с использованием информации гидрометеорологического реанализа. Далее до 2100 г. в качестве входной информации в расчетах использовались данные климатических прогнозов (SSP1-2.6 и SSP5-8.5) для рассматриваемой климатической области. Результаты ретроспективных и прогностических расчетов для периода 1940—2022 гг. представлены на рис. 3.

На представленном рисунке наглядно прослеживаются тенденции ретроспективного изменения термических характеристик озер в условиях меняющегося климата с 1940 г. по настоящее время. Средняя температура водной массы озера увеличилась на $0,7^\circ\text{C}$, при этом толщина ледового покрова уменьшилась на $0,06$ м. Далее изменение ГТД характеристик озера существенно зависит от сценариев развития климата. Согласно «худшему» сценарию (SSP5-8.5), когда выбросы парниковых газов продолжают расти в течение всего XXI в., возможно

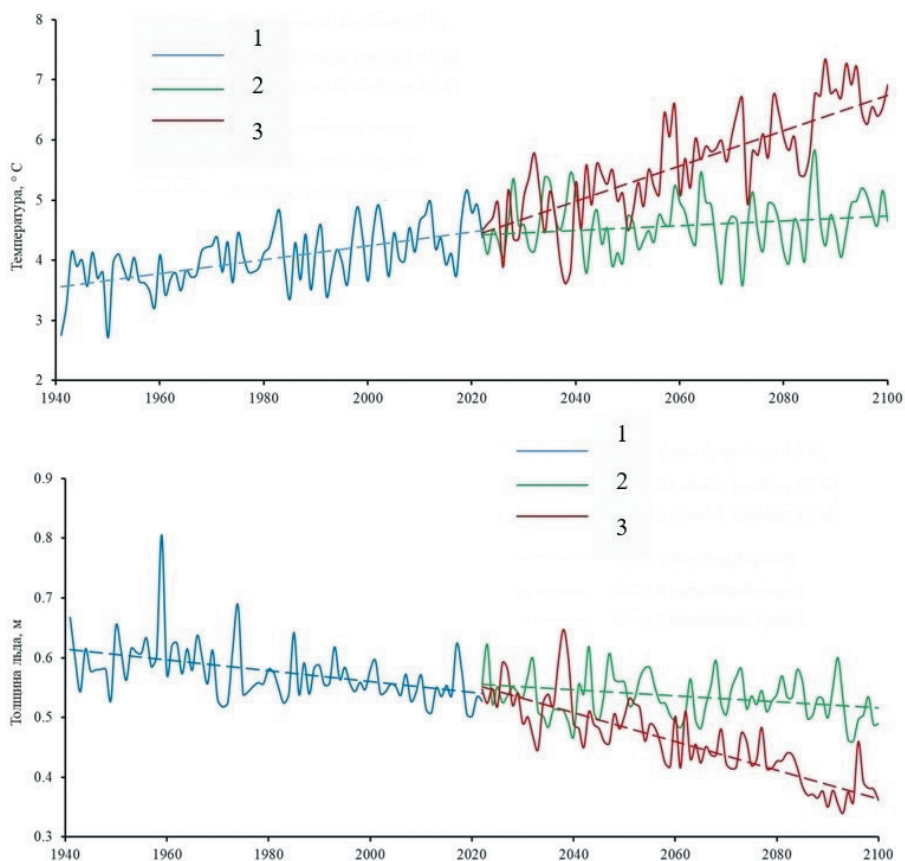


Рис. 3. Ретроспективные (1) и прогностические по сценариям 2 (SSP1-2.6) и 3 (SSP5-8.5) оценки динамики среднегодовых ГТД характеристик среднегодовой температуры водной массы и средней толщины ледового покрова ледниковых озер зоны умеренного континентального климата с достаточным увлажнением за период 1940—2100 [27].

Fig. 3. Retrospective — 1, and prognostic — 2 (SSP1-2.6) and 3 (SSP5-8.5) assessments of the dynamics of mean annual GTD characteristics (mean annual water mass temperature and mean ice cover thickness) of glacial lakes of the temperate continental climate zone with sufficient moisture for the period 1940—2100 [27].

дальнейшее увеличение температуры водной массы озера еще на 1,5 °С к 2100 г. Толщина ледового покрова уменьшится на 0,10–0,15 м. «Лучший» климатический сценарий (SSP1-2.6), в соответствии с которым выбросы диоксида углерода в атмосферу достигнут нуля к 2100 г., может существенно стабилизировать динамику изменения ГТД характеристик рассмотренного гипотетического озера. Ситуация с толщиной льда разнотипных озер в рассматриваемых климатических областях Якутии полностью соответствует современным представлениям о потеплении в Арктике. Толщина льда уменьшается во всех водоемах, причем образование,

нарастание и таяние льда в озерах главным образом является результатом взаимодействия водной массы с атмосферой.

Аналогичные расчеты как ретроспективные, так и прогностические могут быть выполнены для любого неизученного озера с площадью менее 100 км² (что объясняется адекватностью применения одномерной модели) без выполнения каких-либо контактных измерений.

2. Распространение загрязнения в русле р. Невы в результате возможной аварийной ситуации на полигоне токсичных отходов Красный Бор

Одним из потенциальных источников загрязнения реки Невы и Невской губы Финского залива Балтийского моря является полигон хранения высокотоксичных отходов I–V классов опасности «Красный Бор», расположенный в 30 км от Петербурга на водоразделе водосборов рек Тосны и Ижоры, являющихся левобережными притоками Невы. Устья Ижоры и Тосны расположены соответственно в 7 и 17 км выше по течению Невы от ближайшего водозабора Санкт-Петербурга (рис. 4).

Это единственное предприятие для захоронения опасных производственных отходов на территории Северо-Западного федерального округа. На полигоне находится около 2 млн тонн токсичных отходов, которые свозились сюда с 1969 г. с территории всей России и даже из Прибалтики [36, 37]. На момент выполнения исследования (2020 г.) на территории ГУПП «Полигон «Красный Бор» осталось 5 открытых карт-котлованов: №№ 59, 64, 66, 67 и 68. Их расположение представлено на рис. 5. Химический состав жидкости в картах-отстойниках авторам исследования неизвестен. Как отмечается в работе [36], фактические объемы карт значительно превышают проектные, поскольку карты-котлованы были обвалованы дамбами для увеличения их емкости.

Вокруг действующих котлованов № 64, 68, 66, 67, 59 высота обваловки составляет до 5 м. В том же источнике указывается [36], что обваловка карт была выполнена с нарушениями нормативов, поскольку не убран имеющийся на территории полигона повсеместное распространение прослой песков, залегающий непосредственно над кембрийскими глинами и водонепроницаемыми моренными отложениями. Эти пески служат коллекторами для перетока загрязненного фильтрата как между закрытыми картами, так и за их пределы [37].

Очевидно, что какие-либо натурные исследования возникновения аварийной ситуации на полигоне «Красный Бор» и её последствий исключены. Возможное решение задачи связано с использованием математического моделирования. Расчеты распространения загрязняющего вещества в гидрографической сети водосбора до основного русла Невы проводились по системе уравнений Сен-Венана в одномерной постановке, дополненной моделью распространения растворенных примесей, основанной на уравнении турбулентной диффузии. Перенос загрязненных вод рек Ижоры и Тосны в русле Невы рассчитывался по модели движения воды и твердого вещества в трехмерной постановке [8], основанной на математическом представлении сил, действующих в системе «водный поток–донные отложения–наносы», дополненной диффузионным уравнением распространения

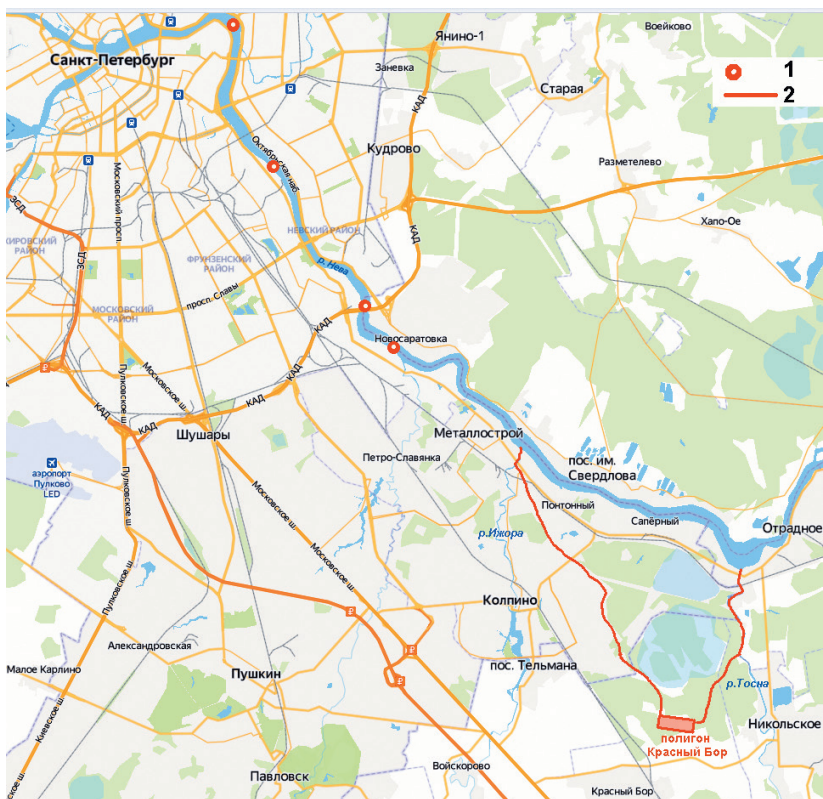


Рис. 4. Схема расположения полигона «Красный Бор».

1 — пункты водозабора Санкт-Петербурга,
2 — маршруты распространения возможного аварийного сброса до русла Невы.

Fig. 4. Location scheme of the Krasny Bor landfill.

1 — St. Petersburg water intake points,
2 — routes of possible emergency discharge spreading to the Neva river bed.

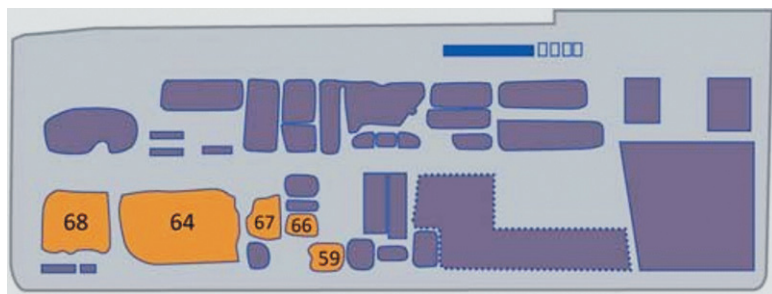


Рис. 5. Схема открытых карт хранения отходов на полигоне «Красный Бор» [36].

Fig. 5. Scheme of open waste storages at the Krasny Bor landfill site [36].

растворенных примесей [38]. Все расчеты выполнялись для единичной концентрации консервативного загрязняющего вещества в сбросе. Это позволяет без труда пересчитать полученные результаты моделирования на нужную концентрацию сброса. Неконсервативность загрязняющего вещества может быть учтена введением в модель турбулентной диффузии [38] экспоненциальной зависимости для оценки редукиции концентрации вещества [39].

На основе анализа инфраструктуры полигона определены основные возможные сценарии возникновения аварийной ситуации, связанной с попаданием токсичных веществ в гидрографическую сеть водосбора. Для выполнения последующих расчетов использовались следующие четыре сценария [39]:

— *Сценарий 1.* Перелив содержимого карт-хранилищ токсичных отходов через верхнюю кромку обваловки вследствие интенсивных осадков, отдельно или в совокупности с повышенным снегозапасом на поверхности карт. Превышение уровня содержимого над обваловкой возможно в открытых картах (№№ 59, 66, 67) при непрерывных суточных максимумах осадков. Карты 64 и 68 укрыты плавучими понтонами, с которых откачиваются атмосферные осадки, и угроза перелива отсутствует. Время действия фактора риска — до 96 часов. Расчетные максимумы осадков на 96 часов: март — 0,104 м; апрель — 0,116 м; май — 0,224 м; июнь — 0,176 м; июль — 0,276 м; август — 0,312 м; сентябрь — 0,136 м. Снегозапас на начало марта — 0,66 м с водозапасом 0,08 м. Объем токсикантов, который может поступить из поверхностного слоя содержимого карт в обводной или внутренний дренажный каналы при теоретически возможном превышении уровня на 0,10 м, составит: для карты № 59 — 142 м³; для карты № 66 — 260 м³; для карты № 67 — 392 м³. Суммарный сброс 794 м³ за 96 часов.

— *Сценарий 2.* Разрушение обваловки карт-хранилищ токсичных отходов вследствие интенсивных осадков в весенний период, отдельно или в совокупности с повышенным снегозапасом на поверхности карт. В данном сценарии предполагается, что разрушение обваловки может быть только в условиях перелива. Время действия фактора риска — до 100 часов. Остальные исходные условия соответствуют предыдущему сценарию. Суммарный сброс — 7940 м³ за 100 часов.

— *Сценарий 3.* Разрушение обваловки карт-хранилищ токсичных отходов вследствие возникновения чрезвычайной ситуации (теракт, взрыв, цунами и пр.) вплоть до полного разрушения обваловки до уровня поверхности почвы на рассматриваемых картах. Остальные исходные условия соответствуют предыдущим сценариям. Суммарный сброс — 176 985 м³ за 100 часов.

— *Сценарий 4.* Подземная фильтрация токсикантов из карт-хранилищ токсичных отходов вследствие возможной фильтрации содержимого карт при возникновении тектонических разломов в массивах кембрийских глин (тектонические нарушения магнитудой до 4,0 баллов были зафиксированы в районе Санкт-Петербурга). Объем токсикантов, попадающих во внешнюю среду, составляет 50 000 м³ за 12 часов.

На рис. 6 и 7 приведены степень разбавления загрязняющих веществ C (мг/л) и время продвижения сброса T (час) в направлении ближайшего городского водозабора L (км) Северной водопроводной станции (СВС), рассчитанные для

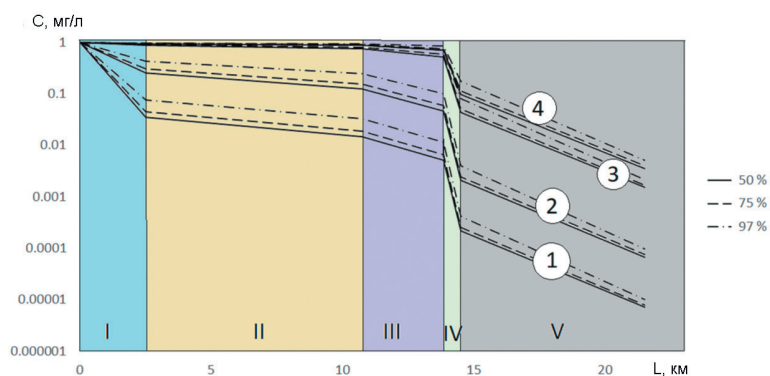


Рис. 6. Результаты расчетов снижения начальной единичной концентрации загрязняющих веществ в аварийном сбросе на участках трассы его возможного распространения по сценариям 1, 2, 3 и 4 до водозабора СВС при водности 50, 75 и 97 % обеспеченности.

I — магистральный канал, *II* — ручей Большой Ижорец, *III* — река Большая Ижорка, *IV* — река Ижора, *V* — река Нева.

Fig. 6. Results of calculations of reduction of the initial unit concentration of pollutants in the emergency discharge on the sections of the route of its possible spread under scenarios 1, 2, 3 and 4 up to the CBC water intake at water availability of 50, 75 and 97 %.

I — main canal, *II* — Bolshaya Izhora Creek, *III* — Bolshaya Izhora River, *IV* — Izhora River, *V* — Neva River.

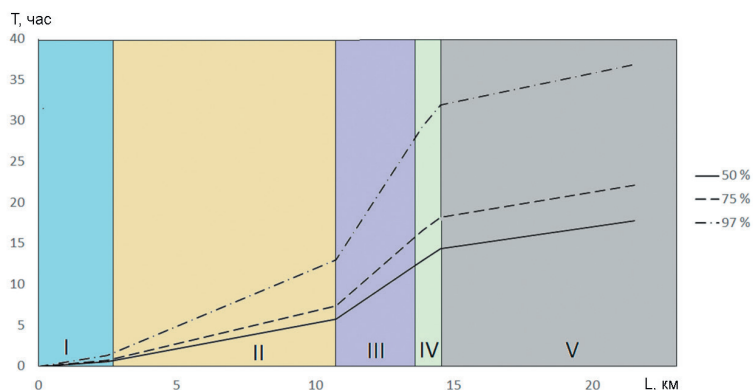


Рис. 7. Результаты расчетов времени продвижения аварийного сброса до водозабора СВС при водности 50, 75 и 97 % обеспеченности.

I — магистральный канал, *II* — ручей Большой Ижорец, *III* — река Большая Ижорка, *IV* — река Ижора, *V* — река Нева.

Fig. 7. Results of calculations of the time of emergency discharge progression to the CBC intake under 50, 75 and 97 % water availability.

I — main canal, *II* — Bolshaya Izhora Creek, *III* — Bolshaya Izhora River, *IV* — Izhora River, *V* — Neva River.

магистрального канала, ручья Большой Ижорец, рек Большая Ижорка, Ижора и Нева при расходах воды разной обеспеченности в соответствии с приведенными выше сценариями аварийного сброса. Рис. 8 и рис. 9 иллюстрируют те же

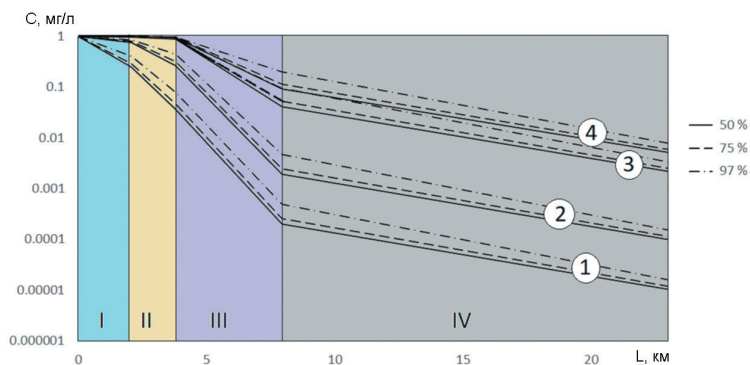


Рис. 8. Результаты расчетов снижения начальной единичной концентрации загрязняющих веществ в аварийном сбросе на участках трассы его возможного распространения по сценариям 1, 2, 3 и 4 до водозабора СВС при водности 50, 75 и 97 % обеспеченности.

I — ручей без названия, *II* — ручей Хованов, *III* — река Тосна, *IV* — река Нева.

Fig. 8. Results of calculations of reduction of the initial unit concentration of pollutants in the emergency discharge in the sections of the route of its possible spread under scenarios 1, 2, 3 and 4 up to the CBC water intake at 50, 75 and 97 % water availability.

I — unnamed brook, *II* — Khovanov brook, *III* — Tosna river, *IV* — Neva river.

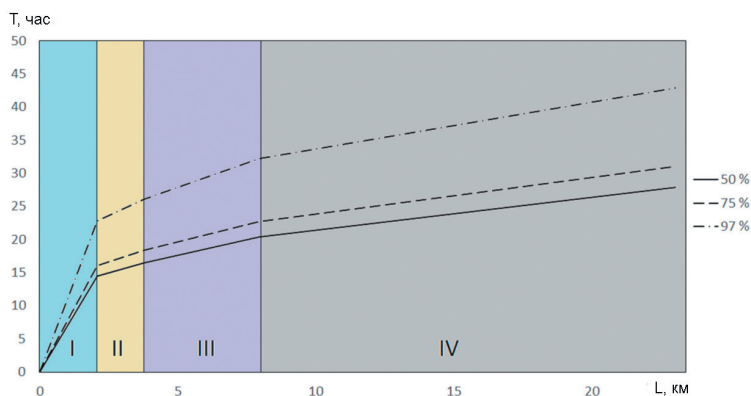


Рис. 9. Результаты расчетов времени продвижения аварийного сброса до водозабора СВС при водности 50, 75 и 97 % обеспеченности.

I — ручей без названия, *II* — ручей Хованов, *III* — река Тосна, *IV* — река Нева.

Fig. 9. Results of calculations of the time of emergency discharge progression to the CBC intake at 50, 75 and 97 % water availability.

I — unnamed brook, *II* — Khovanov brook, *III* — Tosna river, *IV* — Neva river.

характеристики движения сброса по водной системе ручей без названия с восточной стороны от полигона, ручей Хованов, реки Тосна и Нева.

Если сравнивать продвижение возможного аварийного сброса от полигона до ближайшего водозабора Санкт-Петербурга по маршрутам Полигон — Ижора — Нева и Полигон — Тосна — Нева, то оказывается, что протяженность траектории через водосбор Ижоры на 3,45 км короче, чем через водосбор Тосны. Соответственно, время добега сброса (при водности 50 % обеспеченности) через гидрографическую сеть Ижоры составляет 17,8 часов, Тосны — 28,8 часов. До Невской губы Финского залива аварийный сброс дойдет через Ижору через 31,6 часа, через Тосну — через 42,6 часа. По результатам моделирования наилучшее разбавление в створе ближайшего водозабора выявлено при реализации 4-го сценария сброса, рассматривающего возникновение тектонических разломов в массивах кембрийских глин в районе полигона. При этом рассчитанные итоговые значения степени разбавления примеси в условиях средней водности при движении сброса как через водосбор Ижоры, так и через водосбор Тосны между собой различаются незначительно и составляют от 0,005 до 0,000007 в долях исходной единичной концентрации в зависимости от сценария сброса. Снижение водности негативно сказывается на степени разбавления. Результаты расчетов могут быть пересчитаны в любые реальные значения концентрации, так как представлены в долях единицы. Взвешенные частицы, попадающие в русло Невы со стоком Ижоры, не представляют непосредственной угрозы для водозаборов, так как до них не доходят [39]. Показано, что имеется определенный запас времени (15—25 часов) для принятия необходимых мер по защите ближайшего водозабора или перехвату сброшенных стоков в гидрографической сети. Поступление растворенной примеси в конкретный водозабор будет определяться его конструкцией и расположением в акватории. Чтобы избежать попадания загрязняющих веществ в водозаборы, следует располагать их за пределами зоны вдольберегового распространения вод притоков [39].

Представленные результаты являются итогом вычислительного эксперимента, основанного на проведении имитационных расчетов по хорошо апробированному на практике моделям, входящим в состав модельной системы Института озера РАН.

3. Моделирование Чудско-Псковской озерной системы

Данная система является трансграничным водным объектом, состоящим из трех озер: Чудского, Псковского и соединяющего их Теплого. Моделирование выполнено в рамках ФЦП «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012—2020 годах» [9, 40]. В данном исследовании в полной мере проявились широчайшие возможности 3D-моделирования при описании процессов тепло- и массопереноса в водной массе и донных отложениях системы из трех соединяющихся озер. Очевидно, что в современных условиях никакая система контактного мониторинга (рис. 10) не способна дать полноценную количественную оценку происходящим в этой сложной водной системе процессам.



Рис. 10. Схема расположения станций отбора проб на российской акватории Чудско-Псковского озера [9].

Fig. 10. Location of sampling stations in the Russian water area of Lake Peipus [9].

В последние годы все большее распространение (по крайней мере, в Российской Федерации) получает распространение математическая модель гидродинамики внутреннего моря (МГВМ), разработанная в Институте вычислительной математики РАН [20]. Данная модель прошла успешную апробацию при моделировании ГТД Каспийского моря, являющегося характерным представителем класса внутренних морей. Состояние термогидродинамики внутреннего моря описывается трехмерными функциями температуры, солёности, компонент скорости течений, а также двумерной функцией высоты поверхности уровня внутреннего моря. МГВМ включает в себя трехмерные полные уравнения геофизической гидротермодинамики.

Для выполнения расчетов МГВМ была адаптирована для использования ее в озерных условиях. Так, для учета наличия у пресной воды температуры максимальной плотности уравнение состояния морской воды заменено на квадратичное уравнение состояния пресной воды. Выполнены работы по построению расчетной сетки для Чудско-Псковской озерной системы. Для описания химико-биологических процессов гидротермодинамическая часть модели дополнена уравнениями, описывающими сезонную динамику фитопланктона, седиментацию органического вещества на поверхность донных отложений, захоронение и минерализацию органического вещества, механическую ресуспензию верхнего слоя донных осадков. Модель верифицирована по данным многолетних наблюдений, выполняемых на озерах Чудско-Псковской системы сотрудниками Псковского отделения ГосНИОРХа, а именно, данными наблюдений за температурой воды,

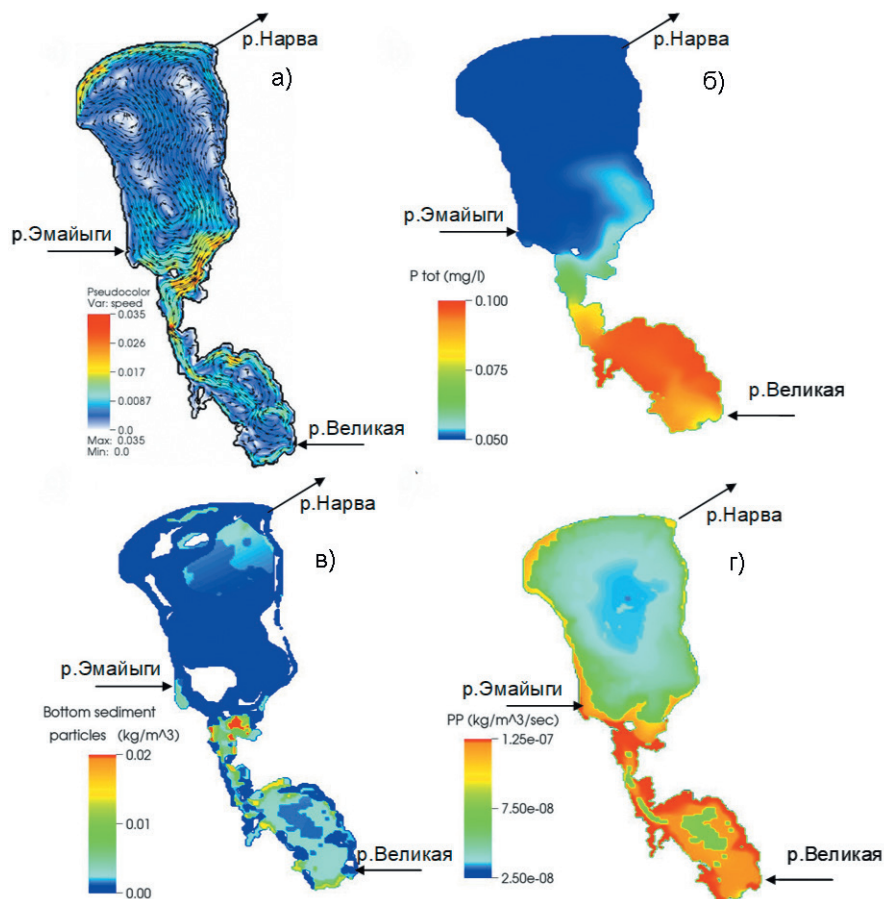


Рис. 11. Результаты 3D-моделирования Чудско-Псковской озерной системы.

- a* — поле скоростей течений в середине апреля;
- б* — пространственное распределение концентрации общего фосфора в середине июля;
- в* — пространственное распределение концентрации частиц донных отложений в середине июля;
- г* — пространственное распределение первичной продукции фитопланктона в середине июля [40].

Fig. 11. Results of 3D-modelling.

- a* — current velocity field in mid-April; *б* — spatial distribution of total phosphorus concentration in mid-July; *в* — spatial distribution of sediment particle concentration in mid-July;
- г* — spatial distribution of phytoplankton primary production in mid-July [40].

концентрацией основных биогенных элементов (азота и фосфора), биомассой фитопланктона, процессами первичного продуцирования и т.д. [9, 40].

Как следует из результатов 3D-моделирования, формирование полей течений в Чудско-Псковской озерной системе характерно для больших мелководных озер умеренных широт (рис. 11 *a*). В подледный период течения в обоих озерах системы в основном носят бароклинный характер, обусловленный неравномерным

распределением плотности воды по пространству. Максимальные скорости невелики, примерно 1,5—2,0 см/с в наиболее мелководных прибрежных районах. С окончанием периода ледостава в апреле—мае основным фактором, влияющим на течения, становится ветер. В озерах (особенно в Чудском) наблюдается частая смена антициклонической циркуляции на циклоническую и наоборот. Пространственное распределение фосфора в Псковском озере определяется двумя процессами — циркуляцией водной массы в Чудском озере и «разбавляющим» влиянием стока р. Великой (рис. 11 б).

В период ледостава взмучивание донных отложений практически отсутствует. Наиболее активно ресуспензия донных осадков протекает в летний период, когда оба озера достаточно часто перемешиваются до дна (рис. 11 в). В период осеннего охлаждения процесс ресуспензии теряет свою интенсивность. Особенно это заметно в Чудском озере. Процессы первичного продуцирования (ПП) в Чудско-Псковском озере также, как и ресуспензия, лимитируются продолжительностью ледостава. Сразу после вскрытия Псковского озера резко возрастает поток фотосинтетически активной радиации на поверхность озера. В условиях отсутствия биогенного лимитирования в нем начинает активно развиваться фитопланктон. В летние месяцы свой вклад в интенсификацию ПП вносит прогрев водных масс обоих озер. Фотосинтез водорослей возрастает практически на порядок величины по сравнению с весенним периодом (рис. 11 г).

Результаты расчетов внутренней фосфорной нагрузки на Чудско-Псковское озеро свидетельствуют о том, что гидродинамические процессы являются важнейшим фактором формирования внутренней биогенной нагрузки. Биогенная нагрузка минимальна в зимний период, когда гидродинамические процессы протекают подо льдом с минимальной интенсивностью. В период открытой воды, когда ветровое и волновое воздействие на поверхность донных отложений резко возрастает, внутренняя биогенная нагрузка принимает свои максимальные значения. Для оценки влияния изменений внешней нагрузки на экологическое состояние озера выполнены численные эксперименты по возможному снижению содержания биогенных элементов в стоке основного притока озера р. Великой. Как следует из результатов расчетов, снижение концентрации общих форм фосфора и азота в стоке р. Великой на 10 % по сравнению с современными значениями способно привести к снижению суммарной (внутренней + внешней) нагрузки на Чудско-Псковское озеро на 1,5 % для фосфорной нагрузки и на 0,95 % для азотной по отношению к рассчитанным среднесезонным значениям. Тем не менее, снижение внешней биогенной нагрузки является безальтернативным способом улучшения экологического состояния озера, однако быстрого деэвтрофирования ожидать не стоит, поскольку восстановление соответствия трофического уровня донных отложений трофическому уровню водной массы происходит со значительным временным запаздыванием [9, 40].

Представленные результаты моделирования и вычислительного эксперимента гораздо шире той информации, которая может быть получена на основе данных контактного мониторинга, который выполняется в Российской и в Эстонской частях акватории озерной системы.

4. Оценка и прогноз стока и выноса биогенных элементов с водосбора Онежского озера

Объектом исследования в данной работе является Онежское озеро — второе по величине пресноводное озеро Европы, испытывающее антропогенное влияние вследствие поступления сточных вод, сельско- и лесохозяйственной деятельности на его водосборе, развития форелеводства и поступления веществ со свалок и селитебных территорий [41]. Еще в прошлом десятилетии по содержанию общего фосфора озеро достигло верхней границы для олиготрофных водоемов [42]. Онежское озеро и его крупнейший приток Илекса — Водла является верхним звеном самой большой европейской озерно-речной системы Невы. Озеро дренирует значительную территорию различную по геологическому строению, рельефу, орографии и гидрографии. Бассейн Онежского озера вытянут в широтном направлении и асимметричен: озеро делит его на две неравные части: западную (64 %) и восточную (36 %), что определяет неравномерность времени добегаания воды для разных притоков (рис. 12).

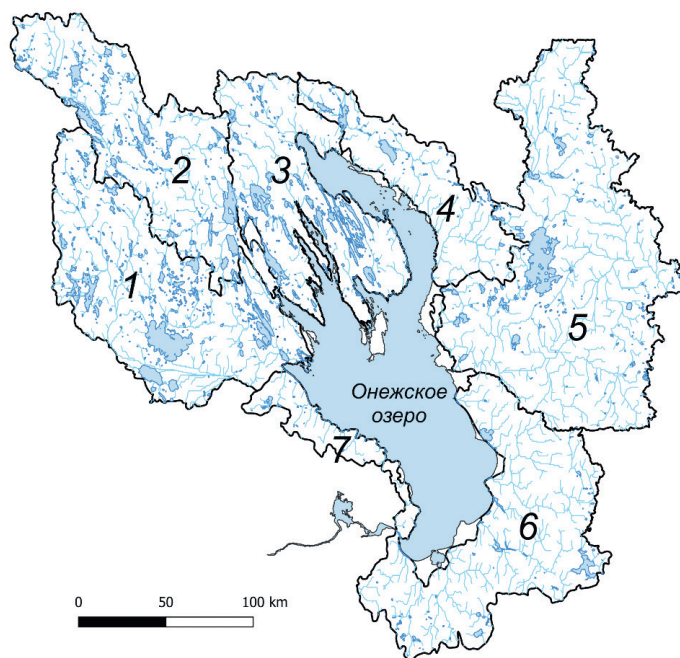


Рис. 12. Гидрографическая структура бассейна Онежского озера: водосборы рек Шуи (1) и Суны (2), Заонежье (3), водосборы восточных притоков (4), реки Водлы (5), южных (6) и западных притоков (7).

Fig. 12. Hydrographic structure of the Onega Lake basin: catchments of the Shuya (1) and Suna (2) rivers, Zaonezhye (3), catchments of eastern tributaries (4), Vodla (5), southern (6) and western tributaries (7).



Рис. 13. Схема модели формирования стока с водосбора Онежского озера, выноса биогенных элементов и биогенной нагрузки на водные объекты.

Fig. 13. Schematic diagram of the model of flow formation from the catchment, nutrient removal and nutrient load on water bodies.

Основным инструментом решения поставленной задачи явилась модель формирования стока с водосбора, выноса биогенных элементов и формирования биогенной нагрузки на водные объекты, разработанная в Институте озераведения РАН и модифицированная при участии сотрудников Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) [41, 42]. Схема модели представлена на рис. 13.

Для оценки последствий воздействия возможных климатических изменений на вынос азота и фосфора с водосбора Онежского озера использованы результаты моделирования стока с использованием двух RCP-сценариев [43]. Сценарии RCP 2.6 и RCP 8.5 (аналоги сценариев SSP1-2.6 и SSP5-8.5, упомянутых выше) — это лучший и худший, с точки зрения воздействия на окружающую среду, сценарии эволюции антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу в будущем. Сценарий RCP 2.6 требует, чтобы выбросы диоксида углерода (CO_2) начали

неуклонно снижаться и достигли нуля к 2100 г. В сценарии RCP 8.5 выбросы продолжают расти в течение всего XXI в. теми же темпами, что и сейчас. Результаты расчетов стока, а также выноса общего фосфора с водосбора Онежского озера при реализации климатических сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 проиллюстрированы на примере трех основных подбассейнов — водосборов рек Суны, Шуи и Водлы на рис. 14.

Количественная оценка возможного изменения стока и соответствующих изменений выноса фосфора и азота (%) с изучаемых водосборов при условии реализации климатических сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 для периода 2022–2050 гг. представлена в табл. 1. Изменения расхода воды, выноса азота и фосфора по сравнению с наблюдаемыми данными рассчитывались относительно 2021 года с использованием линейных аппроксимационных зависимостей, полученных методом наименьших квадратов. Так как аппроксимация проводилась линейным трендом, для сравнения наблюдаемых и прогнозируемых значений достаточно двух точек, показывающих максимальную разницу изменений. В качестве таких значений были выбраны точка в начале прогнозного периода (2022 г.) и в его конце (2050 г.). Разница между значениями отношения наблюдаемых значений 2021 г. к прогнозируемым в 2022 г. и наблюдаемых значений 2021 г. к прогнозируемым в 2050 г. показывает прогностическое изменение расходов воды, выноса азота и фосфора по моделям RCP 2.6 и RCP 8.5 по сравнению с последними наблюдаемыми значениями.

Таблица 1

Рассчитанные изменения стока и соответствующие изменения выноса фосфора и азота (%) с изучаемых водосборов при условии реализации климатических сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 для периода 2022—2050 гг.

Calculated changes in runoff and corresponding changes in phosphorus and nitrogen export (%) from the study catchments under RCP 2.6 and RCP 8.5 climate scenarios for the period 2022—2050

| Объекты | Расход воды | | Вынос P | | Вынос N | |
|----------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | RCP 2.6 | RCP 8.5 | RCP 2.6 | RCP 8.5 | RCP 2.6 | RCP 8.5 |
| р. Суна | -19,60 | 10,01 | -10,49 | 2,25 | -34,95 | 17,74 |
| р. Шуя | -14,91 | 14,59 | -15,10 | 14,55 | -14,51 | 13,97 |
| р. Водла | -15,58 | 20,25 | -13,12 | 16,64 | -17,70 | 22,46 |

Видно, что реализация «лучшего» сценария антропогенного воздействия на окружающую среду (RCP 2.6) на всех объектах может привести к повсеместному снижению биогенной нагрузки на озеро со стороны основных притоков за счет снижения стока, которое составит 10,5—15,1 % по фосфору и 14,5—40,0 % по азоту относительно выноса 2021 г. При реализации экологически неблагоприятного сценария (RCP 8.5) следует ожидать увеличения стока и соответствующего увеличения выноса фосфора на 2,3—16,6 % и азота на 14,0—22,5 %.

На основе результатов выполненных расчетов был сделан вывод о том, что скорее всего ситуация с изменением климата в результате деятельности человека

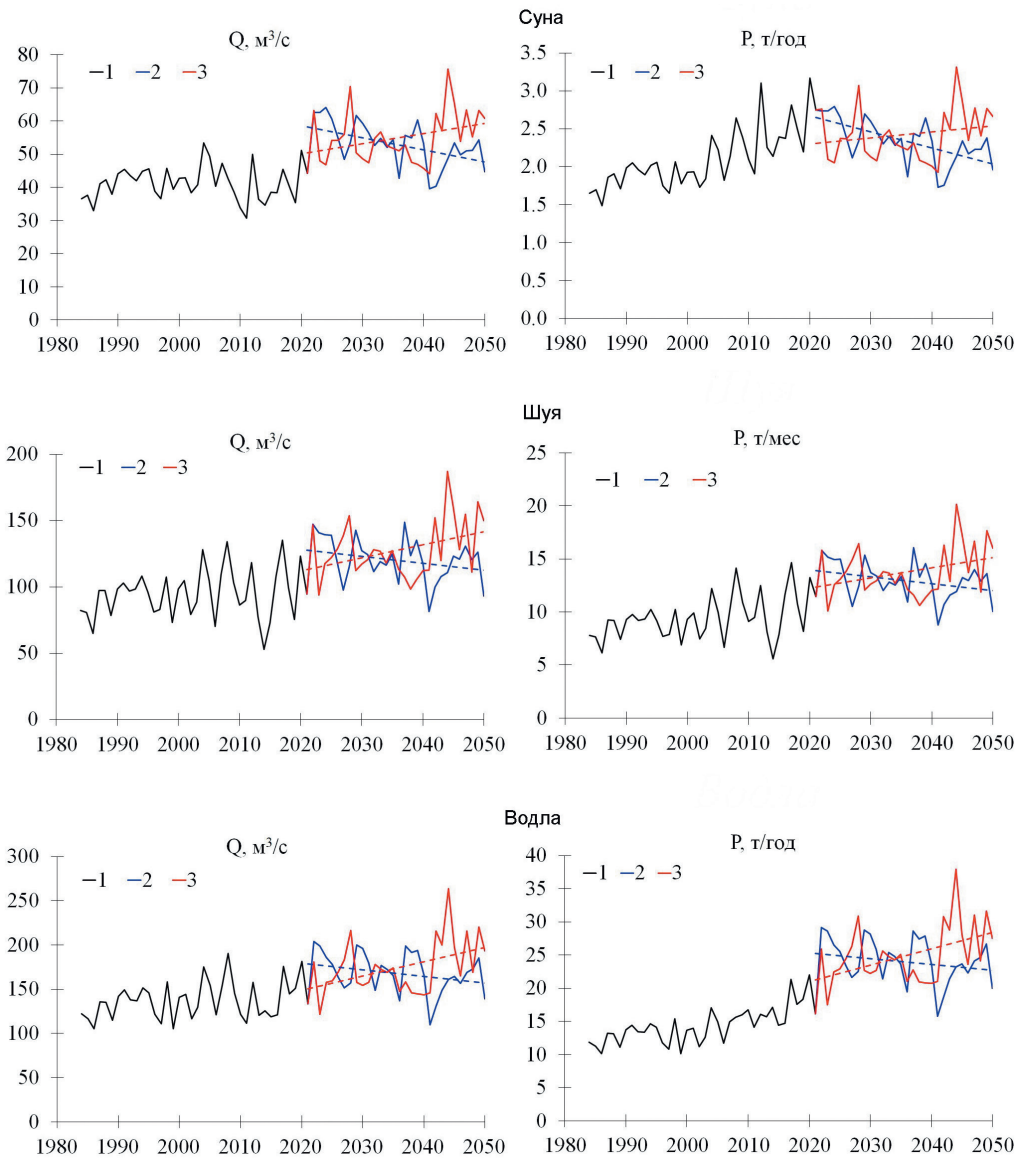


Рис. 14. Расход воды Q рек Суна, Шуя и Водла и вынос общих форм фосфора P для периода 1984—2021 гг. (1) и их прогностические оценки на период 2022—2050, рассчитанные по сценариям RCP 2.6 (2) и RCP 8.5 (3).

Fig. 14. Water discharge Q of the rivers Suna, Shuya and Vodla and removal of total phosphorus P for the period 1984—2021 (1) and their forecast estimates for the period 2022—2050 calculated under RCP 2.6 (2) and RCP 8.5 (3) scenarios.

будет протекать по некоему промежуточному сценарию: с одной стороны, человечество предпринимает значительные усилия по снижению выбросов в атмосферу, с другой — едва ли удастся даже к концу XXI в. достигнуть абсолютного внедрения «зеленых технологий» во все сферы хозяйственной деятельности на всей планете. Следовательно, прогностическая оценка последствий климатических изменений будет находиться в промежутке между оценками, сделанными в настоящей работе по двум экстремальным сценариям.

В то же время, как отмечено в работе [42], составление каких-либо оценок и прогнозов развития социально-экономической деятельности человека на перспективу до 2100 г. является весьма неблагоприятным занятием. Как упоминалось выше, ситуация с изменением климата в результате деятельности человека будет протекать по некоему промежуточному сценарию между двумя крайними сценариями, рассмотренными в этой работе. Поэтому прогностическая оценка изменений стока и биогенной нагрузки на озеро будет находиться в промежутке между оценками, сделанными в настоящем исследовании по экстремальным сценариям.

5. Детерминированно-стохастическое (ДС) моделирование биогенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро

Для моделирования биогенной нагрузки задействована система моделей, состоящая из стохастического генератора метеоэлементов, а также моделей формирования стока ПЛНМ и биогенной нагрузки ПЛЛМ [9, 40]. В рассматриваемой задаче ДС моделирование является средством получения параметров распределения искомым характеристикам при недостатке данных натуральных наблюдений. Стохастический генератор метеоэлементов (стохастическая модель погоды), схема которого представлена на рис. 15, генерирует ряды метеоэлементов требуемой длины и обеспечивает, таким образом, последующие детерминированные блоки модели входной информацией, заменяющей недостающие данные натуральных наблюдений [23].

Ориентация на данные метеорологических наблюдений в качестве основы ДС моделирования объясняется тем, что в основном ряды измеренных метеорологических параметров, по которым происходит настройка модели погоды, существенно более продолжительны, чем ряды наблюдений за гидрологическими и гидрохимическими характеристиками водосборов и водоемов. ДС моделирование формирования биогенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро с Российской территории водосбора проводилось по следующим основным этапам:

1. Оценка параметров стохастического генератора метеоэлементов для наблюдаемых рядов метеорологических элементов в изучаемом регионе (среднесуточная температура воздуха, суточные слои осадков, факт выпадения осадков) по данным наблюдений на метеостанции Псков.

2. Генерирование рядов метеорологических элементов требуемой длины (500 – 1000 лет) с параметрами, соответствующими современным климатическим условиям.

3. Пересчет суточных значений метеорологических элементов в среднемесячные значения.



Рис. 15. Схема стохастического генератора метеоэлементов (стохастической модели погоды) [8].

Fig. 15. Schematic diagram of the stochastic generator of meteorological elements (stochastic weather model) [8].

4. Моделирование месячных слоев стока с водосбора реки Великой по детерминированной модели формирования стока ПЛМ.

5. Построение кривой распределения значений слоя стока с изучаемого водосбора в современных климатических условиях. Оценка параметров распределения слоя стока (среднего значения, среднего квадратичного отклонения и значений различной обеспеченности превышения).

6. Пересчет среднемесячных значений слоя стока в среднегодовые значения.

7. Моделирование среднегодового выноса биогенных веществ с Российской части водосбора Чудско-Псковского озера (с учетом составляющих) по детерминированной модели формирования нагрузки ПЛМ.

8. Построение кривой распределения значений выноса биогенных веществ с изучаемого водосбора. Оценка параметров распределения среднегодового выноса биогенных веществ с водосбора (среднего значения, среднего квадратичного отклонения и значений различной обеспеченности превышения).

Итогом ДС-моделирования в данном случае является набор кривых распределения и их параметров (среднего значения, среднего квадратичного отклонения и значений различной обеспеченности превышения) для суточных слоев осадков, среднемесячных слоев стока и среднегодового выноса биогенных веществ с Российской части водосбора Чудско-Псковского озера в современных условиях.

Результаты расчетов стока и выноса биогенных веществ с водосбора представлены в табл. 2. Здесь приведены параметры распределения рассчитанных годовых слоев стока с водосбора, средние значения нагрузки общим фосфором и общим азотом (400 тР/год, 8549 тN/год) и ее природной составляющей (269 тР/год, 3573 тN/год) на Чудско-Псковское озеро с Российской части водосбора. Представлены также их средние квадратичные отклонения, а также значения, рассчитанные для многоводных (обеспеченностью 1 и 5 %) и маловодных (обеспеченностью 95 и 99 %) лет. Изменчивость стока в зависимости от метеорологических параметров более существенна по сравнению с изменчивостью биогенной нагрузки. Сказанное объясняется тем, что не все источники биогенной нагрузки напрямую зависят от водности года.

Таблица 2

Параметры распределения рассчитанных годовых слоев стока H , рассредоточенной (LP_{np} и LN_{np}) и природной (LP_{nat} и LN_{nat}) составляющих биогенной нагрузки на Чудско-Псковское озера с Российской части водосбора: среднее (X_{cp}), среднее квадратичное отклонение (σ), значения обеспеченностью 1, 5, 25, 75, 95 и 99 % ($X_{\%}$).

Distribution parameters of calculated annual runoff H , dispersed (LP_{nat} и LN_{nat}) and natural (LP_{nat} и LN_{nat}) components of nutrient load on Lake Peipus from the Russian part of the catchment area: mean (X_{cp}), mean square deviation (σ), probability values of 1, 5, 25, 75, 95 and 99 % ($X_{\%}$)

| | X_{cp} | σ | $X_{1\%}$ | $X_{5\%}$ | $X_{25\%}$ | $X_{75\%}$ | $X_{95\%}$ | $X_{99\%}$ |
|--------------------|----------|----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| H , мм/год | 242 | 57,02 | 375 | 336 | 281 | 204 | 148 | 110 |
| LP_{np} , т/год | 400 | 81,52 | 590 | 535 | 455 | 345 | 265 | 210 |
| LP_{nat} , т/год | 269 | 50,67 | 387 | 353 | 303 | 235 | 185 | 151 |
| LN_{np} , т/год | 8549 | 2013 | 13239 | 11870 | 9898 | 7200 | 5228 | 3859 |
| LN_{nat} , т/год | 3573 | 841 | 5533 | 4961 | 4136 | 3010 | 2185 | 1613 |

Иного пути получения параметров распределения слоев стока, биогенной нагрузки на озеро и её составляющих в условиях крайнего дефицита данных натуральных наблюдений просто нет. ДС-моделирование, безусловно, является одним из очень эффективных механизмов выхода за пределы доступных в настоящее время контактных методов измерения гидрологических и гидрохимических параметров водных объектов. Не оцениваемые ранее значения биогенной нагрузки различной обеспеченности ориентированы, прежде всего, на решение задач планирования мероприятий по снижению поступления биогенных веществ в Чудско-Псковское озеро из различных источников, расположенных на территориях неконтролируемых системой государственного мониторинга. Наличие информации не только о среднем уровне нагрузки, но также ее значениях в различные по водности годы,

позволяет существенно расширить область применения математических методов при регламентировании хозяйственной деятельности на водосборе, избежать интенсивного поступления биогенных веществ в водные объекты, снизить скорость их антропогенного эвтрофирования [8].

Заключение

Количество практических задач, решенных на основе имитационных и прогностических расчетов с использованием компонентов модельной системы ИНОЗ РАН, не ограничивается приведенными выше примерами. В частности, в работах [8, 9, 40] представлены прогностические оценки возможных изменений стока и выноса фосфора под воздействием климатических факторов для водосборов малых водных объектов, расположенных на частном водосборе Финского залива, к числу которых относятся Дудергофские озера и водохранилище Сестрорецкий Разлив. Возможные климатические изменения, приводящие к снижению водности, повлекут за собой уменьшение твердого стока притоков и, как следствие, снижение заиления Сестрорецкого Разлива. Выполнена оценка возможного снижения биогенной нагрузки и выноса азота и фосфора с российской части водосбора р. Иртыш за счет внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) ведения сельскохозяйственного производства. Показано, что наибольшее снижение сельскохозяйственной биогенной нагрузки в результате внедрения НДТ может быть достигнуто на российской части водосбора р. Тобол. С использованием той же 2D-модели, адаптированной к условиям озера Неро, проведены численные эксперименты с целью оценки возможных последствий реализации нескольких проектных решений, имеющих целью улучшение водообмена и оздоровления озера Неро. Показано, что 3D-модель позволяет воспроизводить пространственно-временную неоднородность распределения гидрофизических и химико-биологических параметров в Куйбышевском водохранилище, где при отсутствии лимитирования развития фитопланктона биогенными элементами особое влияние оказывают другие факторы, включая температуру воды. Кроме того, во многих других задачах вычислительный эксперимент, имитационное и прогностическое моделирование успешно использовано для получения важных научных и практических результатов, выходящих за рамки возможных натуральных измерений.

Список литературы

1. Гидрометцентр России 2025: Режим доступа: <https://meteoinfo.ru/categ-articles/53-strategy-2030/3332--1-3>(дата обращения: 27.01.2025).
2. Модернизация системы гидрометеорологического обеспечения безопасности мореплавания в акватории Северного морского пути: Электронный ресурс. Режим доступа: <http://council.gov.ru/media/files/AR2IwjpJhAAWfAq40NK5xRSQg7r1kGty.pdf> (дата обращения: 27.01.2025).
3. Самарский А. А. Современная прикладная математика и вычислительный эксперимент // Коммунист. 1983. №18. С. 31—42.
4. Кондратьев С. А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 255 с.
5. He H. S., Larsen D. R., Mladenoff D. J., et al., Exploring component-based approaches in forest landscape modeling. *Environmental Modeling & Software*. 2002. Vol. 17(6). P. 519—529.

6. Антонов А.С. Введение в параллельные вычисления (методическое пособие). М.: Изд-во МГУ, 2002. 69 с.
7. Veryard R. The Component-based Business: Plug And Play. Gateshead: Athenaecum Press, 2001. 216 p.
8. Кондратьев С. А., Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор—водоток—водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 246 с.
9. Кондратьев С. А., Голосов С. Д., Зверев И. С. Опыт моделирования в Институте озераедения / 80 лет развития лимнологии в Институте озераедения Российской академии наук. М.: Изд-во РАН, 2023. С. 202—222.
10. Карпечко Ю. В., Кондратьев С. А., Родионов В. З., Шмакова М. В. Особенности формирования испарения в различных по возрасту, условиям произрастания и продуктивности лесах // Гидрометеорология и экология (Ученые записки РГГМУ). 2020. № 1. (58). С. 49—67. DOI: 10.33933/2074-2762-2020-58-49-67.
11. Шмакова М. В. Речные наносы и почвенная эрозия: методы и модели. М.: ИНФРА-М, 2024. 292 с.
12. Шмакова М. В. Теория и практика математического моделирования речных потоков. СПб.: Издательство «ЛЕМА», 2013. 142 с.
13. Игнатьева Н. В. Роль донных отложений в круговороте фосфора в озерной экосистеме / Ладожское озеро — прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука. 2002. С. 148—157.
14. Игнатьева Н. В. Оценка потоков фосфора в пограничной зоне осадков – вода в Псковско-Чудском озере // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 34. С. 71 —78.
15. Golosov S., Tolmachev A., Kirillin G., Shipunova E. Dimension analysis as applied to the lake ecosystem modeling / Proc. 10th European Workshop on Physical Processes in Natural Waters. University of Granada, Spain, 2006. P. 209—215.
16. Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments // Environmental Modelling & Software. 2010. Vol. 25 (6). P. 793—801.
17. Mironov D., Heise E., Kourzeneva E. et al. Implementation of the lake parameterization scheme Flake into the numerical weather prediction model COSMO // Boreal environ. Res. 2010. Vol. 15. P. 218—230.
18. Kirillin G., Hochschild J., Mironov D. et al. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage // Environmental Modelling & Software. 2011. Vol. 26 (5). P. 683—684.
19. Terzhevik A., Golosov S., Mitrokhov A. et al. Some features of the vertical dissolved oxygen structure in shallow ice-covered lakes / Proc. 11th Symp. Physical Processes in Natural Waters. Warnemunde, Germany, 2007. P. 147—156.
20. Ибраев Р. А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. М.: Изд-во «ГЕОС», 2008. 127 с.
21. Зверев И. С., Ушаков К. В., Шипунова Е. А. и др. Оценка влияния основных притоков Ладожского озера на формирование водной массы бухты Петрокрепость (исток р. Невы) по результатам математического моделирования // Материалы I Международной конференции «Озера Евразии: проблемы и пути решения». Петрозаводск. 2017. С. 228—233.
22. Мотовилов Ю. Г., Голосов С. Д., Даценко Ю. С. и др., Информационно-моделирующий комплекс для оценки гидроэкологического состояния водохранилищ // Водные ресурсы. 2020. Т. 47(5). С. 567—578.
23. Шмакова М. В. Стохастическая модель погоды в системе детерминированно-стохастического моделирования характеристик стока: специальность 11.00.07/ автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. ГТИ. Санкт-Петербург. 2000. 25 С.
24. Румянцев В. А., Кондратьев С. А., Капотова Н. И. и др. Опыт разработки и применения математических моделей бассейнов малых рек. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 93 с.
25. Измайлова А. В. Водные ресурсы озер Российской Федерации // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 5—14.
26. Зверев И. С., Голосов С. Д., Кондратьев С. А. и др., Методика дистанционной оценки характеристик неизученных озер материковой части российской тундры // Доклады Российской академии наук. Науки о земле. 2023. Т. 511(2). С. 120—126. DOI: 10.31857/S2686739723600650.
27. Kondratyev S. A., Golosov S. D., Zverev I. S. et al. Assessment of thermal characteristics of lakes in the permafrost zone by mathematical modelling (on the example of lakes in Yakutia). Limnology and Freshwater Biology. 2024. №6. P. 1380—1398. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-6-1380.

28. Балащенко М. И. Транзитно-аккумуляционные особенности озер Якутии / Диссертация на соискание степени к.г.н. СПб.: Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена. 2016. 130 с.
29. Global Surface Water Explorer 2021. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://global-surface-water.appspot.com> (дата обращения 27.01.2024).
30. Copernicus Global Climate Report 2024. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.copernicus.eu/en> (дата обращения 27.01.2024).
31. Mironov D. V. Parameterization of Lakes in Numerical Weather Prediction. Description of a Lake Model. COSMO Technical Report. No. 11. Offenbach am Main: German Weather Service. 2008. 44 P.
32. Карты прогнозов модели COSMO 2025. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.meteorf.gov.ru/product/cosmo/> (дата обращения 27.01.2024).
33. ERA5 2023. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5> (дата обращения 27.01.2025).
34. IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. 2391 p.
35. Семенов С. М., Гладильщикова А. А. Сценарии антропогенных изменений климатической системы в XXI веке // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2022. Т8 (1). С. 75—106.
36. Объект накопленного экологического вреда полигон токсичных отходов «Красный Бор». Докл. ЭПЦ «БЕЛЛОНА». СПб.: АНО содействия охране окружающей среды «Экспертно-правовой центр ЭкоПраво», 2020. 87 с.
37. Сольский С. В., Герасимова Е. В., Дубровская Н. В. и др. Практика рекультивации полигона промышленных токсичных отходов ГУПП «Полигон Красный бор» // *Изв. ВНИИГ*. 2009. Т. 253. С. 62—72.
38. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 288 с.
39. Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Распространение загрязнения в русле реки Невы в результате возможной аварийной ситуации на полигоне токсичных отходов Красный Бор // *Водные ресурсы*. 2022. Т. 49(6). С. 728—738. DOI: 10.31857/S0321059622060074.
40. Кондратьев С. А., Шмакова М. В., Голосов С. Д. и др. Моделирование в озероведении. Опыт ИНОЗ РАН // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 65. С. 607—647. DOI: 10.33933/2713-3001-2021-65-607-647.
41. Брюханов А. Ю., Кондратьев С. А., Оглуздин А. С. Методика расчета диффузной нагрузки азота, фосфора на водосбор при ведении сельскохозяйственной деятельности // *Сборник материалов XVII Международного экологического форума «День Балтийского моря»*. СПб., 2016. С. 17—19.
42. Лозовик П. А., Бородулина Г. С., Карпечко Ю. В. и др. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натурных наблюдений // *Труды Карельского научного центра*. Лимнология. 2016. №5. С. 35—52.
43. Кондратьев С. А., Брюханов А. Ю., Шмакова М. В. и др. Оценка возможных изменений биогенной нагрузки на Онежское озеро под воздействием антропогенных и климатических факторов // *Водные ресурсы*. 2024. Т. 51 (3). С. 157—169. DOI: 10.31857/S0321059624030056.
44. Сабылина А. В. Поступление в Онежское озеро органического углерода, общего фосфора и общего азота с речным стоком и вынос с водами р. Свири в 1965—2008 годах // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2016. № 9. С. 68—77.
45. Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Воздействие будущих климатических изменений на сток с водосбора Онежского озера // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2022. № 6. С. 41—49. DOI: 10.17076/lim1581.

References

1. Hydrometeorological Centre of Russia 2025. Electronic resource. Access mode: <https://meteoinfo.ru/categ-articles/53-strategy-2030/3332--1-3> (date of access: 27.01.2025).

2. Modernisation of the system of hydrometeorological support of navigation safety in the waters of the Northern Sea Route: Electronic resource. Access mode: <http://council.gov.ru/media/files/AR2Iwj-p-JhAAWfAq40NK5xRSQg7r1kGty.pdf> (date of access: 27.01.2025).
3. Samarskiy A. A. Modern applied mathematics and computational experiment. *Kommunist = Communist*. 1983; (18): (31—42). (In Russ.).
4. Kondratyev S. A. *Formirovaniye vneshnei nagruzki na vodoyemi: problemi modelirovaniya = Formation of an external load on water bodies: modelling problems*. SPb.: Nauka, 2007: 255 p. (In Russ.).
5. He H. S., Larsen D. R., Mladenoff D. J. et al. Exploring component-based approaches in forest landscape modelling. *Environmental Modelling & Software*. 2002; 17(6): 519—529.
6. Antonov A. S. *Vvedeniye v parallel'nyye vychisleniya (metodicheskoye posobiye) = Introduction to parallel calculations (methodical manual)*. Moscow: MSU Publ., 2002: 69 p. (In Russ.).
7. Veryard R. *The Component-based Business: Plug And Play*. Gateshead: Athenaeum Press, 2001: 216 p.
8. Kondratyev S. A., Shmakova M. V. *Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v sisteme vodosbor-vodotok-vodoyem = Mathematical modelling of mass transfer in the system catchment — watercourse — water body*. SPb.: Nestor-Istoria Publ., 2019: 246 p. (In Russ.).
9. Kondratiev S. A., Golosov S. D., Zverev I. S. Modelling experience at the Institute of Lake Science/ 80 years of limnology development at the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences. Moscow: RAS Publ., 2023: 202—222. (In Russ.).
10. Karpechko Yu. V., Kondratyev S. A., Rodionov V. Z., Shmakova M. V. Features of evaporation formation in different in age, growing conditions and productivity forests. *Gidrometeorologia I ecologia = Hydrometeorology and Ecology*. 2020. 1(58): (49—67). DOI: 10.33933/2074-2762-2020-58-49-67 (In Russ.)
11. Shmakova M. V. *Rechniye nanosi i pochvennaya erosiya: metodi i modeli = River sediment and soil erosion: methods and models*. M.: INFRA-M, 2024: 292 p. (In Russ.).
12. Shmakova M. V. *Teoriya i practica modelirovaniya rechnih potokov = Theory and practice of mathematical modelling of river flows*. SPb.: LEMA Publ., 2013: 142 p. (In Russ.).
13. Ignatieva N. V. Role of bottom sediments in phosphorus cycling in the lake ecosystem. *Ladoga Lake — past, present, future*. SPb.: Nauka, 2002:(148—157). (In Russ.).
14. Ignatieva N. V. Estimation of phosphorus fluxes in the sediment-water boundary zone in Lake Pskov-Chudskoe. *Ucheniye zapiski RGGMU = Scientific Notes of RSHU*. 2014; (34):(71—78). (In Russ.).
15. Golosov S., Tolmachev A., Kirillin G., Shipunova E. Dimension analysis as applied to the lake ecosystem modeling. *Proc. 10th European Workshop on Physical Processes in Natural Waters*. University of Granada, Spain, 2006. P. 209—215.
16. Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments. *Environmental Modelling & Software*. 2010; 25 (6): 793—801.
17. Mironov D., Heise E., Kourzeneva E. et al. Implementation of the lake parameterization scheme Flake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Environ. Res*. 2010; 15: 218—230.
18. Kirillin G., Hochschild J., Mironov D. et al. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage. *Environmental Modelling & Software*. 2011; 26(5): 683—684.
19. Terzhevik A., Golosov S., Mitrokhov A., et al. Some features of the vertical dissolved oxygen structure in shallow ice-covered lakes. *Proc. 11th Symp. Physical Processes in Natural Waters*. Warnemunde, Germany, 2007: 147—156.
20. Ibraev R. A. *Matematicheskoye modelirovanie termogidrodinamicheskikh processov v Kaspiyskom more = Mathematical modelling of thermohydrodynamic processes in the Caspian Sea*. Moscow: GEOS Publ., 2008: 127 p. (In Russ.).
21. Zverev I. S., Ushakov K. V., Shipunova E. A. et al. Assessment of the influence of the main tributaries of Lake Ladoga on the formation of the water mass of the Petrokrepost Bay (source of the Neva River) based on the results of mathematical modelling. *Proceedings of the 1st International Conference 'Eurasia Lakes: Problems and Solutions'*. Petrozavodsk, 2017: 228—233. (In Russ.).
22. Motovilov Yu. G., Golosov S. D., Datsenko Y. S. et al. Information-modelling complex for assessment of hydroecological state of reservoirs. *Vodniye Resursi = Water Resources*. 2020; 47(5): (567—578). (In Russ.).
23. Shmakova M. V. *Stokhasticheskaya model pogody v sisteme deterministicheskoye-stokhasticheskoye modelirovaniya characteristic stoka: specialnost 11.00.07 = Stochastic weather model in the system*

- of deterministic-stochastic modelling of runoff characteristics: speciality. 11.00.07. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. GGI, St. Petersburg. 2000: 25 p. (In Russ.).*
24. Rumyantsev V. A., Kondratyev S. A., Kapotova N. I., Livanova N. A. *Opit razrabotki i primeneniya matematicheskikh modeley basseynov malih rek = Experience of development and application of mathematical models of small river basins.* L.: Gidrometeoizdat. 1985: 93 p. (In Russ.).
 25. Izmailova A. V. Water resources of lakes in the Russian Federation. *Geografija i prirodnye resursi = Geography and Natural Resources.* 2016; (4): (5—14). (In Russ.).
 26. Zverev I. S., Golosov S. D., Kondratyev S. A., Rasulova A. M. Methodology of remote assessment of the characteristics of unstudied lakes of the mainland Russian tundra. *Doklady Rossiyskoy Akademii Nauk. Nauki o Zemle = Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences.* 2023; 511(2): (120—126). DOI: 10.31857/S2686739723600650. (In Russ.).
 27. Kondratyev S. A., Golosov S. D., Zverev I. S. et al. Assessment of thermal characteristics of lakes in the permafrost zone by mathematical modelling (on the example of lakes in Yakutia). *Limnology and Freshwater Biology.* 2024; (6):1380—1398. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-6-1380.
 28. Balatsenko M. I. *Transitno-akkumulacionniye osobennosti ozer Yakutii = Transit-accumulation features of lakes in Yakutia. Dissertation for the degree of Candidate of Geological Sciences.* St. Petersburg: Russian State Pedagogical University named after A. I. Herzen, 2016: 130 p. (In Russ.).
 29. Global Surface Water Explorer 2021. Electronic resource. Access mode: <https://global-surface-water.appspot.com> (date of access 27.01.2024).
 30. Copernicus Global Climate Report 2024. Electronic resource. Access mode: <https://www.copernicus.eu/en> (date of address 27.01.2024).
 31. Mironov D. V. *Parameterisation of Lakes in Numerical Weather Prediction. Description of a Lake Model.* COSMO Technical Report. No. 11. Offenbach am Main: German Weather Service. 2008: 44 p.
 32. COSMO 2025 model forecast maps. Access mode: <https://www.meteorf.gov.ru/product/cosmo/> (accessed 27.01.2024).
 33. ERA5 2023. Electronic resource. Access mode: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5> (accessed 27.01.2025).
 34. *IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021: 2391.
 35. Semenov S. M., Gladilshchikova A. A. Scenarios of anthropogenic changes in the climate system in the XXI century. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya = undamental and Applied Climatology.* 2022; 8 (1): (75—106). (In Russ.).
 36. *Object of the accumulated environmental damage of the toxic waste landfill 'Krasny Bor'.* Report of ELC 'BELLONA'. SPb.: Autonomous Nonprofit Organization for Environmental Protection 'Expert Legal Centre "EcoPravo". 2020: 87 p. (In Russ.).
 37. Solskiy S. V., Gerasimova E. V., Dubrovskaya N. V. et al. Practice of reclamation of the landfill of industrial toxic waste GUPP 'Polygon "Krasny Bor"'. *Izv. VNIIG=VNIIG Rep.* 2009; (253): (62—72). (In Russ.).
 38. *Methodical bases of assessment and regulation of anthropogenic impact on surface water quality.* L.: Gidrometeoizdat. 1987: 288 p. (In Russ.).
 39. Kondratyev S. A., Shmakova M. V. Distribution of pollution in the Neva River bed as a result of a possible emergency situation at the toxic waste landfill Krasny Bor. *Wodniye Resursi = Water Resources.* 2022; 49(6): (728—738). DOI: 10.31857/S0321059622060074. (In Russ.).
 40. Kondratyev S. A., Shmakova M. V., Golosov S. D. et al. Modeling in Limnology. Experience of IL RAS. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology.* 2021; (65): (607—647). DOI: 10.33933/2713-3001-2021-65-607-647. [In Russ.].
 41. Brukhanov A. Yu., Kondratyev S. A., Ogluzdin A. S. Methodology of calculation of diffuse nitrogen, phosphorus load to the catchment under agricultural activities. *XVII International Environmental Forum 'Baltic Sea Day'.* SPb, 2016:(17—19). (In Russ.).
 42. Lozovik P. A., Borodulina G. S., Karpechko Y. V. et al. Nutrient load on Lake Onega according to field observations. *Trudi Karelskogo Nauchnogo Centra RAN. Limnologia i oceanologia = Proceedings of the Karelian Scientific Centre RAS. Limnology and Oceanology.* 2016; (5): (35—52). (In Russ.).

43. Kondratyev S. A., Brukhanov A. Yu., Shmakova M. V. et al. Assessment of possible changes in the biogenic load on Lake Onega under the influence of anthropogenic and climatic factors. *Wodniye Resursy = Water Resources*. 2024; 51(3): (57—169). DOI: 10.31857/S0321059624030056. (In Russ.).
44. Sabylina, A. V. Input into Onega Lake of organic carbon, total phosphorus and total nitrogen with river runoff and removal with the waters of the Svir River in 1965—2008. *Trudi Karelskogo Nauchnogo Centra RAN. Limnologia i oceanologia = Proceedings of the Karelian Scientific Centre RAS, Limnology and Oceanology*. 2016; (9): (68—77). (In Russ.).
45. Kondratyev S. A., Shmakova M. B. Impact of future climatic changes on runoff from the catchment of Lake Onega. *Trudi Karelskogo Nauchnogo Centra RAN. Limnologia i oceanologia = Proceedings of the Karelian Scientific Centre RAS, Limnology and Oceanology*. 2022; (6): (41—49). DOI: 10.17076/lim1581. (In Russ.).

Информация об авторе

Кондратьев Сергей Алексеевич, доктор физико-математических наук, Институт озераведения РАН – обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории, 3718470@gmail.com.

Information about author

Sergey A. Kondratyev, doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher Institute of Limnology RAS – separate structural subdivision of St. Petersburg Federal Research Centre of RAS, chief scientist, head of laboratory.

Статья поступила 14.01.2025

Принята к печати 16.02.2025

The article was received on 14.01.2025

The article was accepted on 16.02.2025

Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 113—127.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(78):113—127.

ГЕОИНФОРМАТИКА. ОБЗОР

Научная статья

УДК [528.9:004.9]:351

doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-113-127

Геоинформатика, геоинформационные технологии, геоинформационное управление

***Евгений Петрович Истомин, Иннокентий Евгеньевич Истомин,
Валерий Леонидович Михеев, Сергей Иванович Биденко,
Александр Геннадьевич Соколов***

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы современных подходов в области применения геоинформационных систем в различных сферах человеческой деятельности, описываются понятия геоинформатики, геоинформационных технологий, геоинформационных систем и другие связанные с ними понятия. Дается научное обоснование концепции геоинформационного управления геоинформационными системами. Рассматриваются методы исследования, анализа и формирования геоинформационных систем (пространственных и временных данных), вопросы программного, технического, информационного, правового и организационного обеспечения геоинформационной системы. Представлен анализ баз данных и банков цифровой информации в различных предметных областях, а также систем управления базами данных. Представлены новые концепции управления геоинформацией и системы управления геоинформацией.

Ключевые слова: геоинформатика, геоинформационные технологии, геоинформационные системы, базы данных, базы знаний, геоинформационное управление.

Для цитирования: Истомин Е. П., Истомин И. Е., Михеев В. Л., Биденко С. И., Соколов А. Г. Геоинформатика, геоинформационные технологии, геоинформационное управление // Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 113—127. doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-113-127.

Original article

**Geoinformatics, geoinformation technologies,
geoinformation management*****Evgeny P. Istomin, Innokenty E. Istomin, Valery L. Mikheev,
Sergey I. Bidenko, Alexander G. Sokolov***

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Russian State Hydrometeorological University”

Summary. This article discusses the issues of modern approaches in the field of application of geoinformation systems in various fields of human activity, describes the concepts of geoinformatics, geoinformation technologies, geoinformation systems and other concepts related to them. The scientific substantiation of the concept of geoinformation management of geoinformation management systems is given. Methods of research, analysis and formation of geodata (spatial and temporal data), issues of software, technical, informational, legal and organizational support of the geoinformation system are considered. The analysis of databases and banks of digital information in various subject areas, as well as database management systems, is provided. New concepts of geoinformation management and geoinformation management systems are introduced. The geoinformation management system for the development of natural and technical systems is implemented in relation to the processes of creating and applying objects, complexes and systems of complex technology, which can be represented by the complex: “subject of management — science — technology — production — application (consumption)”, which is considered in detail in this work. The ontology of the geospatial solutions is considered in the aspect of generating data on the state of research objects, which shows the peculiarity of the decision space — the levels of decision—making.

Keywords: geoinformatics, geoinformation technologies, geoinformation systems, databases, knowledge bases, geoinformation management.

For citation: Istomin E., Istomin I., Mikheev V., Bidenko S., Sokolov A. Geoinformatics, geoinformation technologies, geoinformation management. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydro-meteorology and Ecology*. 2025;(78):(113—127). doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-113-127. (In Russ.).

Введение

Геоинформатика — область науки и техники, отражающая и изучающая природные и социально-экономические геосистемы, их взаимодействие и развитие посредством компьютерного моделирования на основе информационных систем и технологий, баз данных и баз знаний.

Задачи геоинформатики включают в себя:

- изучение общих свойств геоинформации, закономерностей и методов её получения; фиксацию, накопление, обработку и использование геоинформации;
- развитие теории, методологии и технологий создания геоинформационных систем; сбор, систематизацию, хранение, анализ, преобразование, отображение и распространение пространственно-координированных данных.

Геоинформационная технология представляет собой совокупность приемов, способов и методов применения программно-технических средств обработки и передачи информации, позволяющая реализовать функциональные возможности геоинформационных систем.

Геоинформатика объединяет теорию цифрового моделирования предметной области с использованием пространственных данных, технологии создания и использования геоинформационных систем, производство геоинформационной продукции и оказание геоинформационных услуг.

Значение научных и технических проблем геоинформационных технологий для народного хозяйства заключается в обеспечении информацией, контроле и поддержке принятия управленческих решений в геопространстве (геоинформационное управление), развитии образования и культуры, сохранении экологического равновесия, предупреждении чрезвычайных ситуаций, обеспечении обороноспособности страны [1—4].

Целью настоящей работы является рассмотрение отдельных методов исследования и формирования геоданных, представление методологии геоинформационного управления развитием природно-технических систем и формирование геопространства решений.

Методы исследования, анализа и формирования геоданных (пространственно-временных данных).

Теоретические и экспериментальные исследования в области развития научных и методических основ геоинформатики.

Пространственные данные (геоинформационные данные, геопространственные данные, географические данные, геоданные) — данные о пространственных объектах, их наборах и условиях их функционирования. Инфраструктура пространственных данных (ИПД) — информационно-телекоммуникационная система, обеспечивающая доступ граждан, хозяйствующих субъектов, органов государственной и муниципальной власти к распределенным ресурсам пространственных данных, а также распространение и обмен данными в общедоступной глобальной информационной сети в целях повышения эффективности их производства и использования. ИПД объединяет технологии, научно-техническую политику, организационное обеспечение, человеческие и другие ресурсы, необходимые для производства, обработки, хранения, распространения, интеграции и использования пространственных данных.

ИПД включает три необходимых компонента:

— базовые пространственные данные (БПД) — общедоступная часть ресурсов пространственных данных, включающая информацию об их координатной основе и избранных пространственных объектах, необходимых для позиционирования пространственных данных. Отбор пространственных объектов для включения в состав БПД проводится с учетом позиционной точности, востребованности данных, возможности их поддерживания в актуальном состоянии, наличия правовой защиты от искажения и экономической целесообразности длительного хранения;

— стандарты на пространственные данные и методы их производства и использования;

— базы метаданных и механизм доступа к данным.

Геоинформационные системы (ГИС) разного назначения, типа (справочные, аналитические, экспертные и др.), пространственного охвата и тематического содержания.

В наименованиях ГИС может быть отражена их специализация, включая инвентаризацию, анализ, оценку, мониторинг, прогноз, управление и планирование, поддержку принятия решений. Для этого рекомендуется использовать специальную конструкцию, например, «ГИС для поддержки принятия решений».

В широком смысле под пространственным объектом в геоинформатике понимается как сам объект, так и адекватная ему цифровая модель. Пространственный объект (геообъект, геоинформационный объект, географический объект) — может быть неподвижный или движущийся простой или сложный объект, явление, событие, процесс и ситуация. Цифровая модель материального или абстрактного объекта реального или виртуального мира с указанием его идентификатора, координатных и атрибутивных данных. Моделируемый объект может относиться к территории, акватории, недрам и воздушному пространству Земли, околоземному космическому пространству, другим космическим телам и небесной сфере.

Программное обеспечение геоинформационной системы представляет собой совокупность программ, в которых реализованы функциональные возможности геоинформационных систем и сопровождающей программной документации. В зависимости от полноты реализации функциональных возможностей ГИС и их назначения разрабатываются и используются универсальные программные средства ГИС, картографические визуализаторы, векторизаторы картографических изображений, векторные графические редакторы, информационно-справочные системы, расчетно-аналитические системы, средства пространственного анализа и моделирования, средства обработки данных дистанционного зондирования, интернет-ГИС для удаленного доступа к ГИС-серверам, а также программное обеспечение для выполнения отдельных функций и групп функций ГИС, ориентированные на конкретные предметные области и проблемную среду.

Техническое обеспечение геоинформационной системы (аппаратное обеспечение геоинформационной системы) включает комплекс технических средств, используемых для реализации функциональных возможностей геоинформационных систем, включая устройства ввода, обработки, хранения и передачи данных.

Информационное обеспечение геоинформационной системы включает совокупность знаний о предметной области информационных ресурсов, информационных услуг, классификаторов, правил цифрового описания, форматов данных и соответствующей документации, предоставляемых пользователю и (или) разработчику геоинформационных систем для решения задач ее создания, эксплуатации и использования. К основным источникам пространственных данных в ГИС относят цифровые топографические и тематические карты, данные дистанционного зондирования Земли, данные систем спутникового позиционирования GPS и ГЛОНАСС; для крупномасштабных приложений используются геодезические данные, получаемые электронной аппаратурой и приборами для геодезических измерений, данные воздушного и наземного лазерного сканирования; дополнительно используются данные различных кадастров, данные органов государственной статистики и другие информационные ресурсы.

Правовое обеспечение геоинформационной системы — совокупность правовых норм, регламентирующих правовые отношения на всех стадиях жизненного цикла геоинформационной системы.

Организационное обеспечение геоинформационной системы — совокупность стратегий, регламентированных мер, научно-технической документации, нормативных документов, организационно-правовых норм, материальных и финансовых ресурсов и квалифицированных кадров, поддерживающих функционирование геоинформационной системы на всех стадиях ее жизненного цикла.

Базы и банки цифровой информации по разным предметным областям, а также системы управления базами данных.

Описание данных и отношений между ними определяются двумя типами — логическое и физическое. Физическое описание данных обеспечивается способами физической записи данных на внешних носителях (магнитных лентах, дисках, дискетах и т.п.) и представляет способ хранения информации на этих носителях. Логическое описание данных указывает на то, в каком виде данные представляет себе пользователь, программист. Задача геоинформатики состоит в анализе логического описания геоданных и их взаимоотношений между собой для дальнейших операций хранения, передачи и обработки.

Базы знаний по разным предметным областям. База знаний (БЗ) — это совокупность имеющихся сведений о проблемной области, для которой предназначена ГИС, представленная в виде формальной структуры, обеспечивающей использование предварительно установленных правил. База знаний содержит:

— факты — представляют собой краткосрочную информацию (могут изменяться). По существу, факты — это базы данных;

— правила — представляют более долговременную информацию, которая обеспечивает порождение новых фактов, новых заключений или новых гипотез с помощью механизмов логического вывода.

База знаний должна обладать определенными творческими возможностями и активно должна пополняться недостающей информацией. Знания делятся на три типа:

- фактические знания, в том числе, полученные на практике;
- порождающие правила (свидетельства), которые собираются заранее путем опроса специалистов (экспертов) в данной предметной области;
- управляющие знания, представляющие набор стратегий для рассмотрения альтернатив в процессе принятия решений.

Математические методы, математическое, информационное, лингвистическое и программное обеспечение для ГИС.

Анализ геоинформационных объектов для конкретной задачи начинается с построения модели, что, как правило, сводится к описанию объекта на языке математики. Обычно с помощью математических выражений удается описать несложные по своему строению объекты и формы. Для сложных объектов необходимо использовать статистически и стохастические модели, а их анализ проводится на базе имитационного моделирования.

Геоинформационное управление и геоинформационные системы управления.

В условиях ограниченности ресурсов, доступных для разработки и реализации государственной политики, направленной на развитие страны, руководство предъявляет повышенные требования к совершенствованию мер по поддержанию, развитию и использованию научного, организационного и технического компонента государства. Для решения задач государственной политики требуется привлечение органов государственного и регионального управления, различных организаций и населения, образующих многоуровневые специализированные пространственно-распределенные природно-технические системы (ПТС) — целостные, упорядоченные в пространственно-временном отношении, совокупности взаимодействующих природных, технических и организационных подсистем (рис. 1).

Для решения задач управления развитием природно-техническая система должна обладать специальными свойствами, управление развитием которых обеспечит эффективность государственной политики. *Геоинформационное управление развитием природно-технических систем* представляет особый вид управления, реализующий целенаправленное воздействие на систему с учетом пространственных характеристик для формирования специальных свойств в течение всего жизненного цикла.

Сложность субъектов и объектов управления требует автоматизации процессов подготовки и реализации решений при управлении развитием пространственно распределенных природно-технических систем в интересах повышения

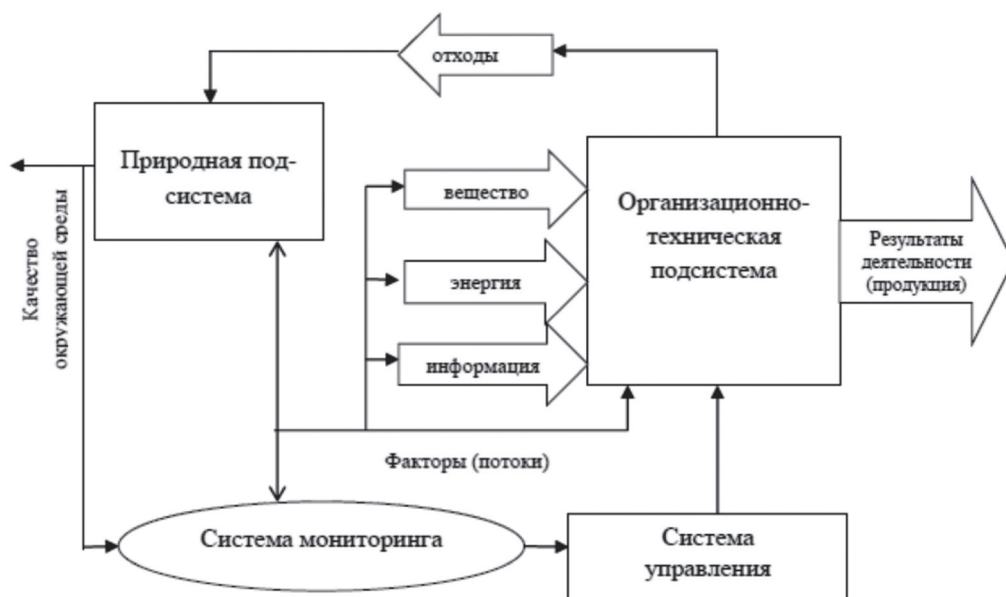


Рис. 1. Обобщенная структура природно-технической системы.

Fig. 1. Generalized structure of the natural and technical system.

качества последних. Это может быть обеспечено применением *геоинформационных систем управления* (ГИСУ) — функционально ориентированных географических систем, реализующих пространственные аспекты анализа и представления информации для поддержки управленческих решений, оснащенных распределенными гетерогенными базами данных, базами знаний и соответствующими информационными технологиями.

Геоинформационная система управления развитием природно-технических систем реализуется применительно к процессам создания и применения объектов, комплексов и систем сложной техники, которые могут быть представлены комплексом: «*субъект управления — наука — техника — производство — применение (потребление)*»).

На стадии «субъект управления» заинтересованное лицо (организация) определяет целевые установки развития природно-технических систем (политика, программа, инвестиции и др.), оценивает и формирует условия реализации целей, организует взаимодействие субъектов и объектов управления, их ресурсное обеспечение, контролируют процессы разработки и производства систем, являются основным потребителем результатов реализованных решений.

На стадии «наука» выполняются фундаментальные и прикладные научные исследования, служащие основой для формирования направлений и принципов создания систем соответствующего назначения и определения путей их реализации. Научные исследования включают комплекс взаимосвязанных фундаментальных и прикладных направлений, результатами которых являются сформулированные [4] законы и принципы развития природно-технических систем, научные задачи обоснования функциональных и структурных основ новых систем управления, отдельных технических решений и рекомендаций по применению форм и методов организации управления процессами производства и применения систем. Управление наукой — сложный комплексный процесс, реализация которого осуществляется по различным каналам (политическим, экономическим, технологическим, военным, административно-хозяйственным).

Содержание стадии «техника» заключается в выполнении технических проектно-конструкторских и опытно-экспериментальных разработок, направленных на создание природно-технических систем соответствующего назначения, образцов новой техники, способных использоваться по назначению и пригодных для широкого организационного и промышленного освоения. Процесс разработки и технического освоения систем представляет собой сложную систему взаимосвязанных теоретических и экспериментальных работ, функциональным выходом которой является отвечающая современным требованиям природно-техническая система (образец, комплекс).

Стадия «производство» включает организационную и техническую подготовку, промышленное освоение производства систем, развертывание организации и серийного производства новых систем, прекращение выпуска или модернизацию устаревших образцов. Производство представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов, посредством которых общество, основываясь на достижениях науки и практики, методах и технических средствах сбора и обработки

информации, используя ресурсы, создает природно-технические системы соответствующего назначения.

Стадия «применение (потребление)» включает производственное и непроизводственное потребление (применение). В первом случае результаты применения системы выступают как средства производства, и потребитель сам является производителем. Во втором — заинтересованное лицо (организация, потребитель) применяет полученные природно-технические системы по назначению. Сфера потребления (применения) в условиях современных рыночных условий играет определяющую роль в формировании исходных данных и требований для организации научно-технических разработок, направленных на повышение качества систем, своевременное создание методов управления и образцов новой техники взамен морально устаревших.

Считается, что объединение предприятий в крупные вертикально-интегрированные структуры позволит добиться прироста эффективности в рыночных условиях за счет [6]:

- обеспечения неразрывности процессов маркетинга в геопространстве, разработки, производства, сбыта и обслуживания систем специального назначения, а также лучшей координации действий и большими возможностями контроля на основе применения геоинформационных систем управления;

- сокращения издержек на основе эффекта масштаба производства, а также замены рыночных сделок внутрифирменными;

- повышения устойчивости предприятий отрасли при изменении объемов заказа и платежеспособного спроса на мировых рынках за счет диверсификации деятельности;

- оптимизации загрузки производственных мощностей участников интегрированной структуры и гарантированных поставок ресурсов, услуг, продукции субподрядчиков.

Подобный подход на рынках природно-технических систем заключается в росте взаимной зависимости заказчика от подрядчика, и обусловленное ею усиление организационных связей между ними на основе специализированных ГИСУ. В условиях государственных решений формирования вертикально-интегрированных структур по продукту (технологии создания систем) мы имеем дело с отношениями типа «один покупатель — один продавец» при обоюдном риске, который сохраняется на протяжении жизненного цикла природно-технических системы специального назначения. Каждая из сторон имеет возможность диктовать цену на продукцию (билатеральные, двухсторонние монополистические отношения). Поведение монополиста на рынке характеризуется неэластичностью спроса на продукцию. Особенности взаимоотношений монополиста (производителя) и покупателя (монопсониста) характеризуются наличием у монопсониста определенной власти над ценой. Возможности монопсониста ограничены параметрами бюджета, а возможности монополиста — нет, поэтому монополист будет использовать стратегию ценовой дискриминации первой степени. Это свидетельствует, что создаются предпосылки разрешения ценового противоречия нерыночными методами.

Первое упоминание термина геоинформационное управление было в статье [5], где, на основе анализа особенностей современного управления развитием

сложных организационно-технических систем рассмотрен феномен геоинформационного управления как управления с привлечением пространственной информации. Пространство рассматривается в широком смысле — как логически мыслимая форма, которая служит средой существования различных объектов. Применительно к геоинформационному подходу решается проблема управления в *геопространстве* — *области пространства, где человек ведет хозяйственную деятельность*.

Подобный подход позволяет структурировать геопространство в интересах управленческих решений [4]. Управленческое решение представляет собой волевое творческое действие субъекта управления. Оно заключается в выборе наилучшей (в смысле принятого критерия) альтернативы из множества (пространства) обоснованных вариантов решений, направленных на достижения цели (системы целей) управления объектом [7, 8]. В этом смысле геопространство решений представимо как однородное неограниченное протяжение, в котором находятся различные объекты (решения и их компоненты) в том или ином месте и занимающие определенное положение относительно друг друга, происходят движения и события [4]. *Онтология геопространства решений* включает ряд элементов.

Координатное (географическое) пространство предполагает размещение объектов, конструкций в принятой системе координат, например, трехмерное пространство — x, y, z — φ, λ, h , или другая принятая система координат. Координатное пространство характеризуется:

- координатами объектов;
- расстояниями,
- геометрическими фигурами,
- границами и др.

Факторное пространство — размещение в географическом пространстве объективных и субъективных факторов, влияющих на принятие и реализацию управленческих решений. Характеризуется:

- координатами размещения — например, координатами положения в трехмерном пространстве — φ, λ, h ;
- особенностями и параметрами факторов — природными, ресурсными, предпринимательскими и др.;
- доступностью и затратами для их использования в целях управления и др.
- координатами (φ, λ, h);
- временем возникновения (t);
- атрибутами;
- масштабы (пространственные, временные);
- последствия (уровни воздействия) и др.
- координаты объектов (φ, λ, h);
- входы $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, выходы $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ объекта;
- атрибуты свойств $a = (a_1, a_2, \dots, a_k)$ состояний $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_l)$;
- атрибуты факторов пространственного управления;
- атрибуты ситуационных факторов атрибуты среды;
- доступность и затраты их использования

- координаты концептов (φ , λ , h);
- расстояния;
- геометрические фигуры;
- границы и др.

Пространственные факторы по своему содержанию, специфике компонентов территориальной системы можно разделить в соответствие с определенными признаками, представленными в таблице 1.

Таблица 1

Классификация факторов пространственного управления
Classification of spatial management factors

| Классификационные признаки | Факторы управления |
|---------------------------------|---|
| Природно-ресурсные | Географические характеристики расположения ресурсов, расположение территории относительно характерных географических объектов, обеспеченность природными ресурсами, климат и т.п. |
| Институциональные | Страновое деление, границы, межгосударственные связи, административное районирование, особенности правового статуса, насыщенность и развитость институтов и др. |
| Социально-демографические | Демографическая ситуация, характер распределения населения, его качественный состав, мобильность, особенности национальной культуры, социальные и национальные приоритеты и характеристики, и т.п. |
| Экономические | Характер национальной экономики, формы собственности, экономическая политика, качество экономического пространства, распределение спроса, потенциал и предпочтения потребителей, культура потребления, привычки и предпочтения потребителей, мобильность населения, потребительский потенциал и др. |
| Управленческие | Доминирующие формы управления, корпоративная культура, подготовленность управленческих кадров, уровень развития теории управления и др. |
| Маркетинговые | Целевые рынки, каналы маркетинга, конкуренты, контактные аудитории, факторы макросреды и др. |
| Географические или координатные | Положение на поверхности земли, взаимное положение относительно характерных объектов природной среды, положение относительно хозяйственных объектов |

Пространство состояний объектов управления (фазовое или атрибутивное пространство) относится к конкретному объекту (объектам) управления. Динамика существования объектов во времени и в пространстве (жизненный цикл) ограничивает и изменяет условия управления и, соответственно, управленческие решения. Использование пространства состояний для управления развитием ПТС позволяет:

- исследовать связи субъектов и объектов управления для различных временных и пространственных срезов геоинформационного управления;
- формировать многомерные динамические модели принятия решений на различных уровнях геоинформационного управления;
- создавать динамические (адаптивные) модели управления потоками информации в процессе управления (базы данных и знаний).

Методы исследования и модели субъектов и объектов управления в пространстве состояний ориентированы на исследование процесса развития конкретного объекта, динамики изменения его состояний (атрибутов) во времени и пространстве под влиянием внутренней среды и системы отношений с другими объектами и внешними условиями. Такой подход позволяет использовать динамическую координатную и атрибутивную логику методов и способов геоинформационного управления на различных уровнях и в различных масштабах. Пространство состояний объектов управления характеризуется некоторой совокупностью переменных (координат, атрибутов), которое можно представить вектором n -мерного пространства переменных состояния, включающим:

- координаты размещения объектов в географическом пространстве (φ, λ, h);
- взаимное влияние объектов — система отношений, связей;
- свойства объектов (атрибуты), в том числе временные характеристики;
- значимость атрибутов для управления (например, вес для выбора альтернатив; степень участия в событиях) и др.

Объекты могут обладать количественными и качественными характеристиками. Совокупность таких объектов также можно рассматривать как кодированное векторное пространство. При этом свойства кодируются с помощью чисел или символов, которые можно истолковать как составляющие векторов пространства. Подобные коды используют для передачи сообщений, обработки информации и т.п. В простейших случаях кодирование состояния исследуемого объекта может быть сведено к простой нумерации — адрес (номер) в базе геоданных о присущих объекту свойствах.

Можно говорить об объектах как элементах пространства, не связывая эти объекты с обычным представлением о векторах как последовательностях чисел, кодов или символов. Если вектор представляет собой совокупность чисел, такое пространство называют фазовым пространством, а фигура (линия), которую описывает конец вектора во времени, называется траекторией движения или развития объекта в пространстве состояний. В таком представлении можно говорить об отображении множества объектов на множество векторов, а отношения между объектами пространства сводятся к отношениям на множестве векторов.

При таком подходе пространство состояний можно рассматривать как динамическое пространство объектов — формализованное с помощью некоторых принятых описаний (слова, понятия, люди, животные, механизмы, организации и т.п.) и ориентированное во времени. Операции на множестве таких объектов выполняются по специально устанавливаемым правилам, алгоритмам, а связи (отношения) между ними выражаются в соответствующей вербальной, математической, логической или другой форме.

Пространство событий. Событие представимо как ограниченное во времени и пространстве явление, конкретный временной факт, результат деятельности системы, которые свершаясь, отменяют или дополняют прежние результаты наблюдения и исследования системы. События индивидуализируются относительно системы в своей уникальной, неповторимой и ограниченной во времени и пространстве сущности. С точки зрения геоинформационного управления, событие — то,



Рис. 2. Структура геопространства решений в геоинформационном управлении.

Fig. 2. The structure of the geospatial solutions in geoinformation management.

что имеет место, происходит, наступает в произвольной точке пространства и времени, существенное значимое происшествие, явление или иная деятельность как факт существования системы, оказывающее влияние на управленческие решения.

Событие есть явление, обретшее индивидуальную выраженность, даже собственное имя. В этом смысле событийной формой наделяются все научные открытия, получающие имена ученых, впервые их открывших, получают имена различные стихийные явления и аномалии, исторические эпохи и политические события. Осуществляясь, событие вносит изменения в область собственного осуществления и тем самым оказывает влияние на апостериорный и априорный анализ процессов развития организационно-технических систем.

Событие характеризуется:

- координатами (φ, λ, h);
- временем возникновения (t);
- содержательными характеристиками;
- масштабами (пространственными, временными);
- последствиями (уровнем воздействия на ПТС, объект) и др.

Пространство решений составляет основу геоинформационного управления (рис. 2).

Решение объединяет все элементы геопространства и характеризуется:

- координатами границ области реализации решения — зона ответственности, время разработки и реализации решения, например — $\varphi, \lambda, h, \Delta t$;
- уровнем решения — юрисдикция, подотчетность объектов управления, масштаб;
- степенью формализации — нормы, стандарты, законы, обязательность;

— исполнения и др.;

— содержанием — исполнители, время реализации, технологии реализации, результаты и форма их представления и др.

В пространстве решений существенную роль играют субъективные факторы — культура, динамизм населения, лидерство, существующие и потенциальные возможности (развитость науки, экономики, технологий и др.).

Существующие уровни пространства решений (масштаб):

- надстрановой — глобальный, международный, макрорегиональный;
- страновой, микрорегиональный (регионы государства);
- уровень местного самоуправления (муниципальный);
- организационный;
- групповой, индивидуальный.

Особенность пространства решений — уровни принятия решений, в определенном смысле (с некоторыми ограничениями), образуют иерархическую систему — связаны между собой системой вертикальных и горизонтальных связей.

Сложность современных ПТС и множество субъектов управления элементами со своими целями приводит к ограниченности иерархии управления и возрастанию значимости системы горизонтальных связей.

Заключение

Рассмотренные в работе вопросы, прежде всего, позволяют *разработать единый подход* к формированию структуры пространственно-распределенных данных, создающих единое геопространство, — пространство геоданных.

Представленные основы теории геоинформационного управления развитием природно-технических систем *расширяют* теоретические и прикладные аспекты принятия и реализации управленческих решений на различных уровнях управления.

Предложенная структура геопространственных решений *объединяет* в общую систему управления *характеристики объектов, условия их функционирования* (например, пространственно-распределенные гидрометеорологические факторы и др.), *ситуационные события и факторы* с применением современных методов геоинформационных технологий [9, 10].

В тоже время, реализация рассмотренного геоинформационного подхода к управлению развитием природно-технических систем *влечет за собой* проведение ряда мероприятий, таких как: *совершенствование* нормативной правовой базы, *регламентации* отношений пространственно-распределенных управляющих компаний, интегрированных структур с органами исполнительной власти и дочерними организациями, *разработку* мер по стимулированию перехода на современную индустриальную модель бизнеса и инновационного развития интегрированных структур промышленности.

Такие меры предполагают создание *действенных механизмов* мотивации необходимых *преобразований*, обеспечивающих эффективность выполнения заданий государственных программ, *полноту загрузки* производственных мощностей,

повышение конкурентоспособности продукции с учетом реализации Национальной технологической инициативы, обозначенной Президентом Российской Федерации в посланиях Федеральному собранию.

Список литературы

1. Сальников В. Г., Горобцов С. Р., Кирилов Н. А. Современные методы и средства сбора и обработки геопространственных данных при ведении генерального плана промышленных площадок // Вестник СГУГИТ. 2024. Том 29. №1. С. 30—44. DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-1-30-44.
2. Янкевич С. С. Исследование процесса получения геопространственных знаний о территории // Геоинформатика. 2024. №2. С. 65—70. DOI: 10.47148/1609-364X-2024-2-64-70.
3. Черемисина Е. Н., Никитин А. А. Геоинформационные системы и технологии. М.: ВНИИГеосистем, 2011. 376 с.
4. Истомин Е. П., Михеев В. Л., Присяжнюк С. П., Соколов А. Г. Геоинформационное управление развитием природно-технических систем. СПб.: Статистика. 2022. 420 с.
5. Истомин Е. П., Кирсанов С. А., Соколов А. Г., Колбина О. Н. Феномен геоинформационного управления и принципы его реализации // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2014. № 4. С. 180—188.
6. Karpik A. P., Lisitsky D. V., Osipov A. G., Savinykh V. N. Analysis and evaluation of the resource potential of a territory using the method of geocognitive modeling // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2022. Т. 28. № 1. С. 580—588. DOI: 10.35595/2414-9179-2922-1-28-580-588.
7. Najafzadeh L., Froehlich J. E. A Feasibility Study of Using Google Street View and Computer Vision to Track the Evolution of Urban Accessibility / ASSETS '18: Proceedings of the 20th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility. 2018. С. 340—342. DOI: 10.1145/3234695.3240999.
8. Истомин Е. П., Соколов А. Г. Теория организации: системный подход. Учебник: сер. Организационные системы. т. 1. (2-е изд., с изм. и доп.) СПб.: ООО «Андреевский издательский дом», 2011. 420 с.
9. Черемисина Е. Н., Кирпичева Е. Ю., Токарева Н. А., Миловидова А. А. Базовые задачи искусственного интеллекта на примере геологоразведки // Геоинформатика. 2024. №4. С. 83—92. DOI: 10.47148/1609-364X-2024-4-83-92.
10. Narayanan A., Bergen K. J. Prototype-Based Methods in Explainable AI and Emerging Opportunities in the Geosciences // arXiv. 2024. arXiv:2410.19856. DOI: 10.48550/arXiv.2410.19856.

References

1. Sal'nikov V. G., Gorobczov S. R., Kirilov N. A. Modern methods and means of collecting and processing geospatial data while maintaining the master plan of industrial sites. *Vestnik SGUGIT = Bulletin of SSUGIT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*. 2024; (1): (30—44). doi: 10.33764/2411-1759-2024-29-1-30-44. [In Russ].
2. Yankelevich S. S. Investigation of the process of obtaining geospatial knowledge about the territory. *Geoinformatika = Geoinformatics*. 2024; (2): (65—70). doi: 10.47148/1609-364X-2024-2-64-70. [In Russ].
3. Cheremisina E. N., Nikitin A. A. *Geoinformacionny`e sistemy` i tehnologii = Geoinformation systems and technologies*. Moscow: VNIIGeosystem, 2011: 376 p. [In Russ].
4. Istomin E. P., Mixeev V. L., Prisyazhnyuk S. P., Sokolov A. G. *Geoinformacionnoe upravlenie razvitiem prirodno-texnicheskix system = Geoinformation management of the development of natural and technical systems*. SPB.: Statistika. 2022: 420 p. [In Russ].
5. Istomin E. P., Kirsanov S. A., Sokolov A. G., Kolbina O. N. The phenomenon of geoinformation management and the principles of its implementation. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7 = Geologiya. Geografiya = Bulletin of St. Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*. 2014; (4): (180—188). [In Russ].

6. Karpik A. P., Lisitsky D. V., Osipov A. G., Savinykh V. N. Analysis and evaluation of the resource potential of a territory using the method of geocognitive modeling. *InterKarto, InterGIS*. 2022; 28(1): 580–588. doi: 10.35595/2414-9179-2922-1-28-580-588.
7. Najafizadeh L., Froehlich J. E. A Feasibility Study of Using Google Street View and Computer Vision to Track the Evolution of Urban Accessibility. *ASSETS '18: Proceedings of the 20th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. 2018; 340–342. doi: 10.1145/3234695.3240999.
8. Istomin E. P., Sokolov A. G. *Teoriya organizacii: sistemny'j podxod*. Theory of organization: a systematic approach. Textbook: ser. Organizational systems. vol. 1. (2nd ed., with amendments and additions) St. Petersburg: Andreevsky Publishing House LLC, 2011: 420 p. [In Russ].
9. Cheremisina E. N., Kirpicheva E. Yu., Tokareva N. A., Milovidova A. A. Basic tasks of artificial intelligence on the example of geological exploration. *Geoinformatika = Geoinformatics*. 2024; (4): 83–92. DOI: 10.47148/1609-364X-2024-4-83-92. [In Russ].
10. Narayanan A., Bergen K. J. Prototype-Based Methods in Explainable AI and Emerging Opportunities in the Geosciences. arXiv. 2024. arXiv:2410.19856. doi: 10.48550/arXiv.2410.19856.

Информация об авторах

Истомин Евгений Петрович, доктор технических наук, профессор, директор института информационных систем и геотехнологий, Российский государственный гидрометеорологический университет, biom220@bk.ru.

Истомин Иннокентий Евгеньевич, ассистент кафедры прикладной информатики, Российский государственный гидрометеорологический университет, kesh22ist@gmail.com.

Михеев Валерий Леонидович, кандидат юридических наук, доцент, ректор, Российский государственный гидрометеорологический университет, gestor@rshu.ru.

Биденко Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных технологий и систем безопасности, Российский государственный гидрометеорологический университет, sibidenko@mail.ru.

Соколов Александр Геннадьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры прикладной информатики, Российский государственный гидрометеорологический университет, alexandersokoloff@yandex.ru.

Information about authors

Istomin Evgeny Petrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Information Systems and Geotechnologies, Russian State Hydrometeorological University.

Istomin Innokenty Evgenievich, Assistant Professor of the Department of Applied Informatics, Russian State Hydrometeorological University.

Mikheev Valery Leonidovich, Candidate of Law, Associate Professor, Rector, Russian State Hydrometeorological University.

Bidenko Sergey Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Technology and Security Systems, Russian State Hydrometeorological University.

Sokolov Alexander Gennadievich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Applied Informatics, Russian State Hydrometeorological University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 18.01.2025

Принята к печати 22.02.2025

The article was received on 18.01.2025

The article was accepted on 22.02.2025

Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 128—139.
Hydrometeorology and Ecology. 2025;(78):128—139.

ГЕОИНФОРМАТИКА

Научная статья
УДК [528.9:004.9]:001.8
doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-128-139

Метод учета имплицитного окружения при проведении ситуационного анализа в ГИС

Денис Федорович Миляков

АО «Научный центр прикладной электродинамики» (НЦ ПЭ), Россия, Санкт-Петербург,
denism@navis.spb.su

Аннотация. В статье рассматривается метод учета пространственно-распределенных имплицитных (неявно заданных) данных при динамическом моделировании пространства с использованием геоинформационных систем. Предлагается достаточно простой метод эластичного послыонного связывания неявных параметров, способных оказать существенное влияние на результат моделирования и снизить воздействие субъективного фактора на эффективность принимаемого решения. Окончательное решение остается за ответственным лицом. Метод применим при наличии избыточных цифровых данных и более полной модели взаимосвязей для анализа геоинформационной обстановки, при этом его использование не требует значительных вычислительных ресурсов ГИС.

Ключевые слова: геоинформационные системы, теория информации, моделирование ситуации, теория принятия решений, топология.

Для цитирования: Миляков Д. Ф. Метод учета имплицитного окружения при проведении ситуационного анализа в ГИС // Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 128—139. doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-128-139.

GEOINFORMATICS

Original article

Method for taking into account the implicit environment when conducting situational analysis in GIS

Denis F. Milyakov

Scientific Center for Applied Electrodynamics, Russia, St. Petersburg

Summary. When modeling a situation and the dynamics of its development using geographic information systems, the main attention when solving the target problem is paid to spatially distributed explicit parameters, which, as a rule, determine the spatial representation of the development of the situation and its dynamics appropriate recommendations for decision-making. The methodology for taking into account implicit parameters, which are also available in database of geographic information system, either is absent or assigned to

© Миляков Д. Ф., 2025

the decision maker. This article proposes a simple method for elastic layer-by-layer linking of implicit parameters that can have a significant impact on the modeling result and, if not eliminated, then reduce the influence of the subjective factor on the effectiveness of the decision made. The method based of the elasticity function, parameters of which are presented in the matrix form of layer connectivity. Working with matrices and reducing elasticity do not require GIS computing resources. The method is applicable in the presence of redundant digital data and a more complete model of relationships for analysis the geoinformation environment data. The purpose of this modeling method is to reduce the influence of the subjective factor on the effectiveness of the decision being made. At the same time, the decision itself should remain with the responsible person.

Keywords: geoinformation management, information theory, situation modeling, decision theory, topology, linearly connected space.

For citation: Milyakov D. F. Method for taking into account the implicit environment when conducting situational analysis in GIS. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(78):(128—139). doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-128-139. (In Russ.).

Введение

Географические информационные системы (ГИС) существуют уже более 30 лет. Возможности ГИС в области пространственного анализа позволяют получать информацию о реальных объектах на поверхности Земли более оперативно и наглядно, а также создать новые данные, когнитивно недоступные прежде [1]. Аналитические возможности ГИС помогают выяснить, чем обусловлено местоположение определенных объектов и какие между ними связи. Методы ГИС анализа позволяют отобрать объекты по совокупности признаков, скомпилировать и визуализировать в виде оверлеев над картой представление того или иного целевого показателя. Обладание этой новой информацией помогает глубже оценить причины выбора местоположения объекта, найти наилучшее решение целевых задач, оперирующих пространственно-распределенными данными, заранее быть готовым к грядущим событиям и условиям.

Параллельно тому, как географические данные становятся более широко доступными, а программное обеспечение ГИС становится более совершенным, эффективность ГИС анализа может быть также существенно повышена за счет совершенствования используемых моделей и методов анализа, всё более приближая ГИС к автоматизированным системам управления.

Для решения задач моделирования с использованием ГИС основное внимание при решении целевой задачи уделяется пространственно-распределенным явным и значимым параметрам, оказывающим решающее влияние на результат моделирования. В зависимости от поставленной задачи и методов ее решения при использовании пространственных данных, которыми обладает избранная для моделирования ГИС, выбирается совокупность анализируемых параметров или признаков, которая наиболее адекватно определяет исход целевой задачи. Такие параметры можно отнести к эксплицитным [2], т. е. явным, понятным, ярко выраженным, имеющим внешнее материальное выражение [3]. Например, для определения зоны подтопления при разливе водоемов эксплицитным будет параметр изобаты близлежащих территорий.

Противоположный эксплицитному параметру имеет смысл имплицитный параметр [2], т. е. не проявляющийся явно; содержащийся скрытно, не обнаруживающийся при поверхностном наблюдении фактор. Данные, которыми наполнена и

оперирует некоторая избранная ГИС, могут иметь различный тип и описываться множеством параметрических величин, главным условием применимости которых является возможность их пространственного распределения, географической привязки к поверхности Земли. Логично предположить, что в зависимости от моделируемой задачи оператор методически определяет, какие данные ГИС являются эксплицитными, при этом другая часть имеющихся в ГИС данных автоматически попадает в противоположную категорию. Полноценный учет имплицитных параметров может быть необоснованно ресурсоемким и избыточным при реализации моделирования в ГИС, однако и полное их игнорирование способно привести к критически негативным последствиям. Данное противоречие преодолевается, как правило, субъективным анализом, иными словами — участием человека. Мы же ставим задачу формализовать учет такого рода признаков именно средствами и методами, присущими ГИС, основу которых составляют электронные картографические системы.

В апреле 2024 г. в г. Орске Оренбургской области произошло одно из самых крупных наводнений за последний век, одной из причин которого считаются обильные снегозапасы по итогам прошедшей зимы. Прорыв дамбы 3 апреля на реке Урал привел к наводнению в городе, равного которому не было около 70 лет. Ранее на этой же реке произошло наводнение в Казахстане, из-за чего властям соседней страны пришлось повысить сброс воды в водохранилищах, что усугубило ситуацию в Оренбуржье. Анализ информационных сообщений о развитии чрезвычайных паводковых ситуаций на территории России в 2024 г. и работы МЧС указывает на то, что роль применяемых ГИС для прогнозирования развития ситуации недостаточна. Очевидно, что при симуляции развития наводнения или паводка рек ГИС хорошо справляется с предсказанием областей подтопления на основе данных о рельефе местности. Однако целевой функцией решаемой задачи прогнозирования в данном случае должна быть безопасность населения и минимизация ущерба инфраструктуры в условиях ограниченности ресурсов и времени. При этом значения таких имплицитных данных, как дорожная, промышленная, социальная инфраструктура, плотность населения, гидрометеорологическая обстановка, объекты особого назначения становятся доминирующими при принятии ситуационных решений, которые пока целиком базируются на субъективном опыте.

Цель работы состоит в представлении метода эластичного послойного связывания неявных параметров, которые способны оказать существенное влияние на результат моделирования и снизить влияние субъективного фактора на эффективность принимаемого решения.

Постановка задач учета имплицитного окружения

В новейшей истории появились технические основы для компьютерной симуляции, учитывающей политические, социальные и экономические параметры среды, основанные на программных продуктах, не использующих технологии ГИС. Мы же ставим задачу формализовать учет такого рода признаков именно средствами и методами, присущими ГИС, основу которых составляют электронные картографические системы.

Сложившимся, устоявшимся и понятным для пользователя элементом компоновки однородных признаков в ГИС является понятие слоев с уже принятым инструментарием работы с ними [4]. Включая или отключая слои признаков, оператор дополняет картографическую основу наборами тех или иных распределенных в пространстве данных, анализ и визуализацию которых ему требуется произвести. По аналогии с географическими признаками профиля высот, дорожной инфраструктуры, спутниковыми снимками местности и т. п. можно таким же образом включать и визуализировать данные социальной, экономической или любой другой сферы деятельности человека, например, плотность населения, многочисленные экономические показатели, результаты социальных опросов и т. п. [5]. Ситуационный анализ и оперативное планирование как отдельный процесс определенно привязаны к картографической основе, поэтому наилучшим образом визуализируются как самостоятельный кластер характерных ему слоев.

Понятно, что в интересах полноценной оценки и эффективного планирования деятельности на ограниченной территории помимо формализованных тактических и технических признаков ограниченных ресурсов, влияние на принимаемые решения оказывают не только топология рельефа местности, гидрометеорологическая обстановка, но и множество компонентов социальной, политической, экономической и даже духовной сфер. Ярким примером такого рода факторов является лояльность населения к институтам исполнительной власти, учет которой часто играет значительную роль, но пока не является предметом цифровизации. Учет влияния такого рода — вопрос решаемый, но для включения его в модель требуется не просто вербальная оценка, а именно оцифровка такого рода признаков. Методический подход к цифровизации подобного рода лингвистических переменных уже практически отрабатывается в теории нечетких множеств [6]. На данном этапе нам не важна академическая классификация всех возможных признаков, но она понадобится в дальнейшем при реализации методов кластеризации (объединении) однотипных слоев признаков в представлении ГИС.

Метод учета имплицитного окружения

Факторный анализ предполагает наличие тесной, математически строгой, функциональной связи между одним или несколькими факторами влияния и анализируемым итоговым показателем. Возникает вопрос, какие имплицитные факторы и зачем следует учитывать при формировании рабочей модели. На существующем уровне ГИС анализа этот вопрос полностью относится к компетенции оператора, который сегодня выполняет несколько итераций моделирования для рассмотрения многофакторной модели, не забывая о наличии имплицитного окружения. С дальнейшим развитием автоматизации ГИС предложенный метод позволит сократить число итераций моделирования.

В новейшей истории появились технические основы для компьютерной симуляции, учитывающей политические, социальные и экономические параметры среды, основанные на программных продуктах, не использующих технологии

ГИС. Мы же ставим задачу формализовать учет такого рода признаков именно средствами и методами, присущими ГИС, основу которых составляют электронные картографические системы.

Сложившимся и понятным для пользователя элементом компоновки однородных признаков в ГИС является понятие слоев с уже принятым инструментарием работы с ними [4]. Включая или отключая слои признаков, оператор дополняет картографическую основу наборами тех или иных распределенных в пространстве данных, анализ и визуализацию которых ему требуется произвести. По аналогии с географическими признаками профиля высот, дорожной инфраструктуры, спутниковыми снимками местности можно таким же образом включать и визуализировать данные социальной, экономической или любой другой сферы деятельности человека, например, плотность населения, многочисленные экономические показатели, результаты социальных опросов и т. п. Ситуационный анализ и оперативное планирование как отдельный процесс определенно привязаны к картографической основе и наилучшим образом визуализируются как самостоятельный кластер характерных ему слоев [7].

В интересах полноценной оценки и эффективного планирования деятельности на ограниченной территории, помимо формализованных тактических и технических признаков ограниченных ресурсов, влияние на принимаемые решения оказывают не только топология рельефа местности, гидрометеорологическая обстановка, но и множество компонентов социальной, политической, экономической и даже духовной сфер.

Для описания методов моделирования ГИС с учетом слоев имплицитных признаков предлагается отойти от полносвязанных методов обработки геопространственных данных слоя и предложить математическую модель эластичной связи, для понимания которой ограничимся рассмотрением примера ниже [4]. Сделаем предположение, что наш экономический кластер состоит из нескольких слоев (рис. 1):

— промышленная инфраструктура (И) — совокупность объектов (здания, сооружения) недвижимого имущества, транспортной и коммунальной инфраструктуры для осуществления деятельности в сфере промышленности;

— производственные мощности (М) — средства производства, представляющие значение как источник пополнения или восстановления ресурсов, потребляемых в процессе конфликта;

— производственные ресурсы (Р) — накопленные или сосредоточенные на определенной территории источники производства (за исключением человеческого ресурса), представляющие интерес для анализа ситуации;

— опасные промышленные объекты (ОО) — объекты промышленной инфраструктуры, при разрушении которых высок риск аварий, опасных для жизни человека;

— объекты сферы распределения (ОР) — объекты недвижимости, определяющие процесс распределения ресурсов по потребителям, например, телевышки, банки, продовольственные и промышленные склады, водонапорные и насосные станции и т. п.;

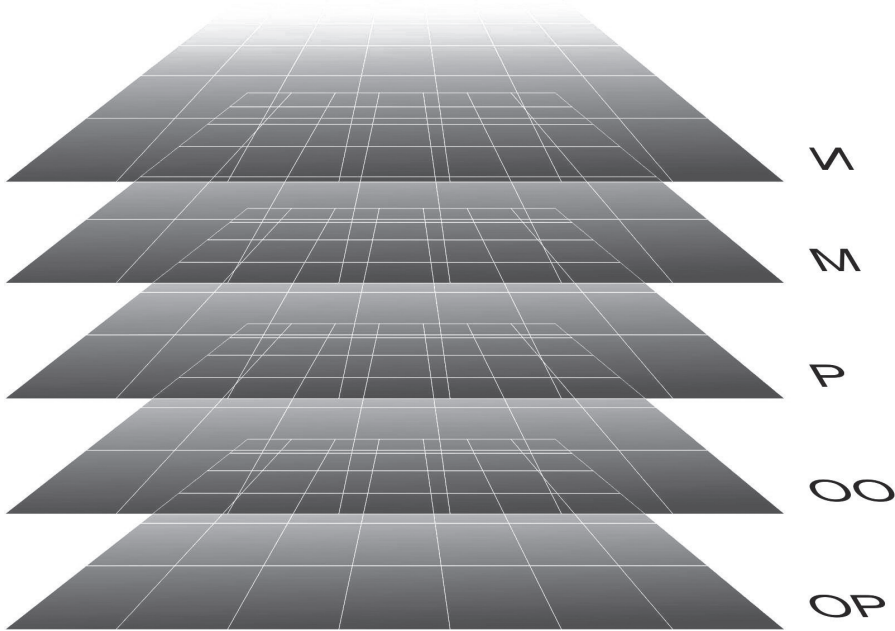


Рис. 1. Слои экономического кластера.

Fig. 1. Layers of an economic cluster.

— объекты сферы потребления (ОП) — в нашем примере считаем объекты недвижимости, выступающие как центры притяжения потребителей, например, магазины, культурные, торговые и развлекательные центры и т. п.

Каждый слой кластера несет информацию об объектах своего назначения, которую можно представить в виде матрицы плотностей распределения целевого параметра (нескольких параметров) [7]. Размерность матрицы плотностей распределения целевого параметра кратна ячейке или единицам оцифровки географической сетки координат, что поддерживает возможность масштабирования и обеспечения единого математического аппарата связанности.

$$\begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \dots & I_{1n} \\ I_{21} & I_{22} & \dots & I_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_{m1} & I_{m2} & \dots & I_{mn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где I_{mn} — усредненный целевой параметр слоя или вектор параметров для выбранной ячейки географической сетки координат.

Визуализацию распределения плотностей параметров на плоскости выполняют различными методами, например, плотностью окраски областей градиентом или цветовой гаммой в виде изолиний значения параметра (рисунки 2 а, 2 б) и т. п.

В случае визуализации матрицы распределения плотностей параметров удобнее использовать дополнительную сетку, значения параметров которой визуализируются высотой над плоскостью соответствующего уровня (рис. 2 *в*).

Целевой параметр ячейки слоя характеризует некоторый значимый для результирующей функции аргумент, который может быть выражен в абстрактных и достаточно конкретных значениях. Целевой параметр может быть представлен строкой-вектором $I_{mn} = \{I_{mn}, \dots, I_{kn}\}$, иными словами, массивом параметров. Выбор конкретного типа параметра при этом определяется методологией операций в задачах моделирования.

Простым абстрактным территориально связанным целевым параметром I_{mn} для слоя И может являться, например, индекс плотности объектов промышленной инфраструктуры, определяемый в диапазоне от 0 (полного отсутствия объектов) до 100 (максимально возможной плотности объектов) в соответствующей ячейке георегиона.

Аналогичным целевым параметром для остальных слоев кластера примем параметры согласно табл. 1.

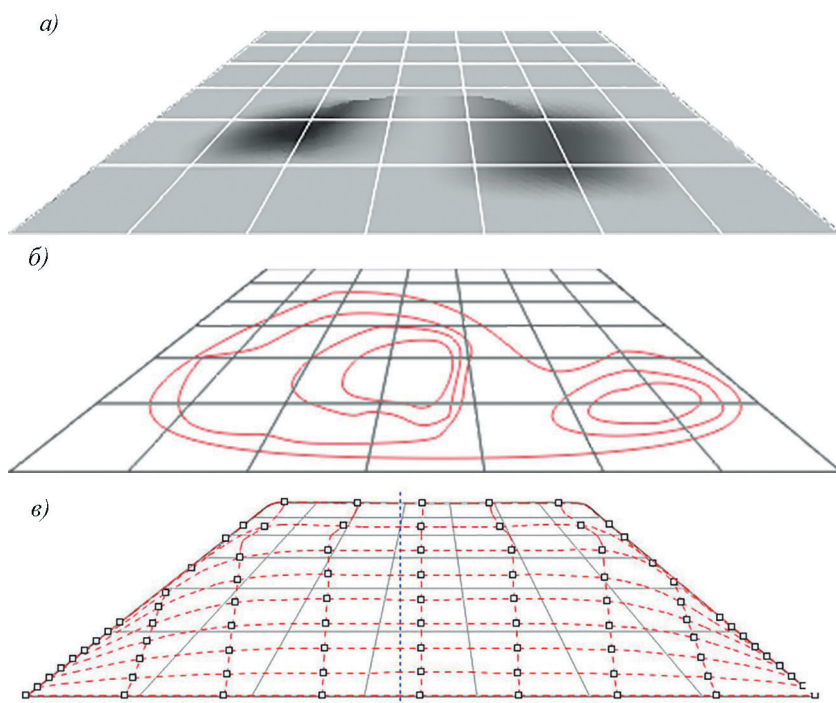


Рис. 2. Визуализация плотностей параметров слоя:
а) градиентом, *б*) изолиниями, *в*) сеткой поверхности.

Fig. 2. Visualization of layer parameter densities:
a) gradient, *b*) isolines, *c*) surface grid.

Таблица 1

Целевые параметры слоев экономического кластера
Target parameters of economic cluster layers

| Слой | Размерность | Целевой параметр |
|------------------------------|--------------------------|--|
| промышленная инфраструктура | 0—100 | индекс плотности объектов промышленной инфраструктуры |
| производственные мощности | 0—100 | индекс плотности объектов, обеспечивающих производство и ремонт строительной техники |
| производственные ресурсы | ед. объема / ед. времени | количество потребляемых ресурсов за единицу времени, массив значений по типу ресурсов: углеводороды, вода, металлы, древесина и т.п. |
| опасные промышленные объекты | категории от 1—5 | наличие категориальных объектов согласно ФЗ от 21.07.1997 №116-ФЗ |
| объекты сферы распределения | целое число | сумма категорий значимости объектов в ячейке |
| объекты сферы потребления | целое число | сумма категорий значимости объектов в ячейке |

Закономерно, что все слои экономического кластера связаны между собой [8]. Изменение во времени или пространстве (ячейке) целевого параметра одного из слоев очевидно влияет на изменение целевых параметров других слоев. Степень влияния и характер зависимости между слоями при различных размерностях целевых параметров нелинейная и наилучшим образом описывается функцией эластичности. В этом случае для каждой пары слоев корреляционную функцию G целевых параметров для любого элемента матриц ($M_{И}, M_{М}, M_{Р}, M_{ОО}, M_{ОР}$) на момент времени T можно записать упрощенно функциями:

$$\begin{cases} G_{М}^{И}(T) = \langle M_{И} [I_{mn}(T)] M_{М} [I_{mn}(T)] \rangle = E_{М}^{И} \\ G_{Р}^{И}(T) = \langle M_{И} [I_{mn}(T)] M_{Р} [I_{mn}(T)] \rangle = E_{Р}^{И} \\ G_{Р}^{М}(T) = \langle M_{М} [I_{mn}(T)] M_{Р} [I_{mn}(T)] \rangle = E_{Р}^{М} \\ \dots \end{cases} \quad (2)$$

где $M_{И} [I_{mn}(T)]$ — значение целевого параметра ячейки I_{mn} слоя И в момент времени T ; E — функция эластичности, определяемая отношением:

$$E_{М}^{И} = \frac{\Delta M_{И} [I_{mn}](\text{проценты})}{\Delta M_{М} [I_{mn}](\text{проценты})} = \frac{\Delta M_{И} [I_{mn}]}{M_{И} [I_{mn}]} \cdot \frac{\Delta M_{М} [I_{mn}]}{M_{М} [I_{mn}]} = \frac{\Delta M_{И} [I_{mn}]}{\Delta M_{М} [I_{mn}]} \times \frac{M_{М} [I_{mn}]}{M_{И} [I_{mn}]}, \quad (3)$$

где $\Delta M_{М} [I_{mn}]$ — величина изменения целевого параметра слоя М, $M_{М} [I_{mn}]$ — абсолютное значение целевого параметра ячейки mn слоя М.

Качественная характеристика степени влияния слоев друг на друга в данном случае описывается просто: если модуль эластичности $|E_{М}^{И}| = 0$, то изменение параметра в слое М никак не влияет на параметр слоя И, если $1 > \|E_{М}^{И}\| < \infty$, то изменение параметра в слое М существенно влияет на параметр слоя И, отрицательная эластичность меняет направление влияния.

Иллюстрация вариантов зависимостей между двумя слоями приведена на рис. 3.

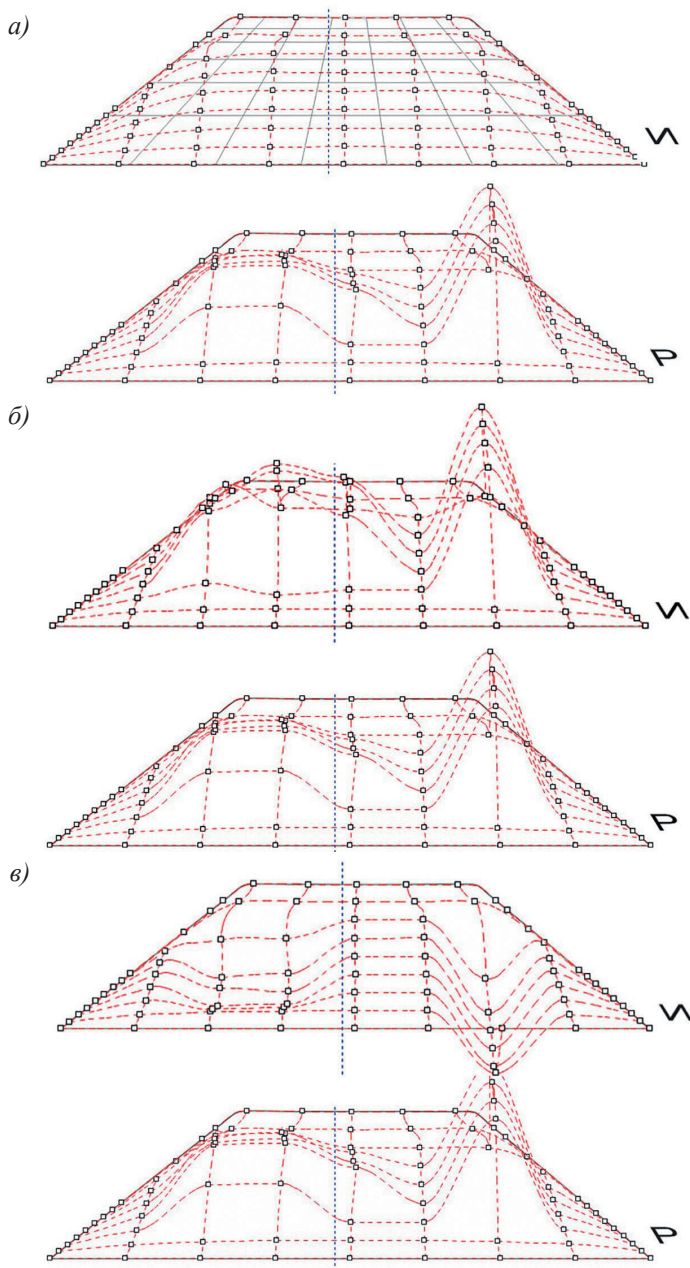


Рис. 3. Иллюстрация зависимости между слоями для различных E :
 вариант а) $E_p^H = 0$, вариант б) $E_p^H \geq 1$, вариант в) $E_p^H \approx -1$.

Fig. 3. Illustration of dependency between layers for different E :
 case а) $E_p^H = 0$, case б) $E_p^H \geq 1$, case в) $E_p^H \approx -1$.

Замечательным свойством такого способа представления зависимости слоев является то обстоятельство, что, если корреляционная функция описывается степенной функцией, то ее значение легко записывается как значение степени аргумента, что удобно для реализации в ГИС:

$$E_x^y = \frac{dy}{y} : \frac{dx}{x} = \frac{dy}{dx} \times \frac{x}{y} = y'(x) \frac{x}{y}.$$

Для $y = x^n$ данная формула примет вид:

$$E_x^y = nx^{n-1} \frac{x}{x^n} = n.$$

Таким образом, данные слоев кластера и зависимость между слоями можно описать достаточно простой для восприятия формой в виде матрицы значений эластичности (рис. 4), где значения эластичностей E могут быть представлены действительными числами.

В рассматриваемом примере экономического кластера видно, что слои И, М, Р связаны более или менее тесной положительной связью, слои ОО, ОР тесной отрицательной связью и т. д. При решении поставленной задачи, например, по обеспечению безопасности территорий георегиона, алгоритм ГИС-анализа должен, по данным значений целевых признаков со слоев, в том числе экономического кластера, определить наиболее уязвимые локации и оценить методы и затраты на компенсацию потенциальных опасностей [7]. Следует понимать, что ситуационный анализ учитывает изменение значений целевых признаков как во времени, так и в пространстве.

Аналогичные рассуждения о связанности справедливы и для информационных слоев в кластерах других сфер деятельности человека. Справедливо, что все возможные слои любых кластеров с тем или иным уровнем связанности зависят друг от друга. При описании всех возможных зависимостей даже простая форма

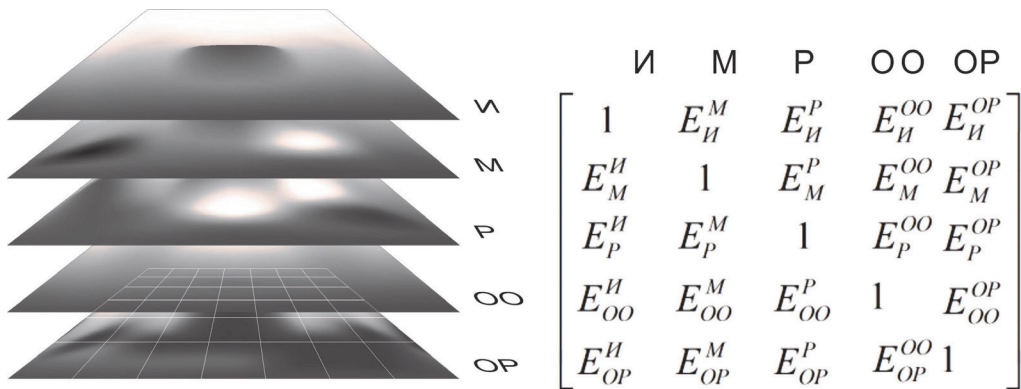


Рис. 4. Представление данных и зависимостей в кластере.

Fig. 4. Representation of data and dependencies in a cluster.

представления данных становится сложной. В общем случае для упрощения системы зависимостей и оперативности решения целесообразно использовать совокупный показатель всего кластера, формируемый по заданной закономерности из территориально связанных целевых параметров слоев, входящих в соответствующий кластер.

Таким образом, логика работы ГИС с данными, как в слоях кластера, так и с совокупностью кластеров, будет заключаться в том, чтобы алгоритмически находить и рекомендовать оператору и лицу, принимающему решения, оптимальную последовательность действий по обеспечению процесса путем разрешения противоречия между затратами на выполнение серии итераций и максимально достигаемой эффективностью на пути решения целевой задачи.

Заключение

При моделировании ситуации и динамики ее развития с использованием ГИС основное внимание при решении целевой задачи уделяется пространственно-распределенным эксплицитным параметрам, которые, как правило, определяют пространственное представление развития ситуации, на основании анализа которых и вырабатываются соответствующие рекомендации для принятия решения. Новизна предлагаемого метода заключается в повышении качества рекомендаций с учетом имплицитных параметров, которые также имеются в базе данных ГИС. Множество имплицитных параметров не используется либо не цифруется, либо требует актуализации, но с развитием технологий появятся в базе данных ГИС. Сегодня же оценка существенности их влияния и необходимость учета отводится субъекту, принимающему решение. В настоящей статье предлагается достаточно простой метод эластичного послойного связывания имплицитных параметров, которые могут иметь значительное влияние на результат моделирования и снизить влияние субъективного фактора на эффективность принимаемого решения.

Список литературы

1. Замятина Н. Ю. Когнитивные пространственные сочетания как предмет географических исследований // Известия РАН. Серия географическая. 2002. № 5. С. 32—37.
2. Поланьи М. Личностное знание: на пути к посткритической философии. М.: Прогресс, 1958. 344 с.
3. Розенталь Д. Э., Теленкова М. А. Словарь-справочник лингвистических терминов: пособие для учителя. Москва: Просвещение, 1985. 399 с.
4. Бутко Е. Я. Геоинформатика как метод познания // Образовательные ресурсы и технологии. 2016. № 5 (17). С. 56—62. DOI: 10.21777/2312-5500-2016-5-56-62.
5. Taylor D. R. F. Cybercartography: Theory and Practice /eds. T. Lauriault. 1st ed. Amsterdam, Boston: Elsevier Science Publ., 2006. 594 p.
6. Флегонтов А. В., Вилков В. Б., Черных А. К. Моделирование задач принятия решений при нечетких исходных данных. Санкт-Петербург: Лань, 2023. 332 с.
7. Розенберг И. Н. Онтологический подход в геоинформатике // Образовательные ресурсы и технологии. 2016. № 5 (17). С. 86—95. DOI: 10.21777/2312-5500-2016-5-86-95.
8. Кудж С. А. О философии геоинформатики // Перспективы науки и образования. 2016. № 6 (24). С. 7—16.

References

1. Zamyatina N. Yu. Cognitive spatial combinations as a subject of geographical research. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya = News of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2002; (5): (32—37). (In Russ.).
2. Polanyi M. *Lichnostnoye znaniye: na puti k postkriticheskoy filosofii = Personal knowledge: on the way to post-critical philosophy*. Moscow: Progress, 1958: 344 p. (In Russ.).
3. Rosenthal D. E., Telenkova M. A. *Slovar'-spravochnik lingvisticheskikh terminov: posobiye dlya uchitelya = Dictionary-reference book of linguistic terms: a manual for teachers*. Moscow: Education, 1985: 399 p. (In Russ.).
4. Butko E. Ya. Geoinformatics as a method of cognition. *Obrazovatelnie resyrsi I tehnologii = Educational resources and technologies*. 2016; 5(17): (56—62). DOI: 10.21777/2312-5500-2016-5-56-62. (In Russ.).
5. Taylor D. R. F. *Cybercartography: Theory and Practice* / eds. T. Lauriault. 1st ed. Amsterdam, Boston: Elsevier Science Publ., 2006: 594 p.
6. Flegontov A. V., Vilkov V. B., Black A. K. *Modelirovaniye zadach prinyatiya resheniy pri nechetkikh iskhodnykh dannykh*. Modeling of decision-making problems with fuzzy initial data. St. Petersburg: Lan, 2023: 332 p. (In Russ.).
7. Rosenberg I. N. Ontological approach in geoinformatics. *Obrazovatelnie resyrsi I tehnologii = Educational resources and technologies*. 2016; 5(17): (86—95). DOI: 10.21777/2312-5500-2016-5-86-95. (In Russ.).
8. Kudzh S. A. On the philosophy of geoinformatics. *Perspektivi nauki I obrazovaniya = Prospects of Science and Education*. 2016; 6 (24): (7—16).

Информация об авторе

Миляков Денис Федорович, кандидат технических наук, АО «Научный центр прикладной электродинамики» (НЦ ПЭ), Россия, Санкт-Петербург; инженер I категории, denism@navis.spb.su.

Information about author

Denis Milyakov, PhD, Scientific Center for Applied Electrodynamics, Russia, St. Petersburg.

Статья поступила 10.01.2025

Принята после доработки в печать 28.02.2025

The article was received on 10.01.2025

The article was accepted after revision on 28.02.2025

Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 140—150.
Hydrometeorology and Ecology. 2025;(78):140—150.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК [556.537+556.537](28)(5711.21)
doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-140-150

Оценка скоростей деформаций меандрирующих рек Ямала

Анастасия Ивановна Баскакова¹, Дмитрий Игоревич Исаев²

¹ Независимый исследователь, baskakovan96@gmail.com

² Российский государственный гидрометеорологический университет

Аннотация. В статье рассматривается изменение планового положения свободно меандрирующих речных русел юго-западной части Ямальского полуострова. Выполнено совмещение разновременного положения речных русел за период более 53 лет. Рассчитаны основные параметры излучин и их изменения с использованием методики пятиугольных полигонов. Показано, что изменение параметров отдельных излучин рассматриваемых рек не соответствует гидроморфологической теории руслового процесса. При нормальных скоростях плановых деформаций 1,1 м/год на отдельных участках зафиксированы скорости деформаций до 7,3 м/год на нехарактерных участках излучин. Установлено, что для рассматриваемых излучин имеется тенденция к усложнению формы, что объясняется влиянием мерзлотных процессов на руслоформирование.

Ключевые слова: русловый процесс, Ямал, меандры, параметры излучин, многолетняя мерзлота, размыв русла.

Для цитирования: Баскакова А. И., Исаев Д. И. Оценка скоростей деформаций меандрирующих рек Ямала // Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 140—150. doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-140-150.

HYDROLOGY

Original article

Estimation of deformation rates of meandering rivers of Yamal

Anastasiya I. Baskakova¹, Dmitriy I. Isaev²

¹ State Hydrological Institute, St.-Petersburg, Russia, baskakovan96@gmail.com

² Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

Summary. The paper presents the results of a comparison of the position of the bends of meandering rivers flowing on the territory of the Yamal Peninsula for 1967—1970, 1986 and 2021. The positions of the channel in 1967—1970 and in 1986 were restored based on archival aerial photographs. The position of the riverbed in 2021 was obtained from modern satellite imagery. The object of the study was sections of the meandering channels of the rivers Enzoryakha, Erkatayakha, Shchuchya, Yuribey, Yasavey-Yakha,

with a total length of 1283 km, flowing in the territory of discontinuous permafrost, in conditions of the manifestation of cryogenic landforms.

As a result of comparing the positions of river coastlines at different times, it was found that for plan deformations the average rates of channel displacements are small and amount to 0,3—1,1 m/year, while the maximum rates of planned deformations reached 7,3 m/year. It was noted that in most of the sections considered, the maximum displacement rates are observed in those sections of the bends for which maximum erosion rates are not typical.

An assessment was made of changes in the size of the main characteristics of the bends - the relative completeness of the bends, the relative elongation of the bends and the relative severity of the bends, using the pentagonal polygon technique, which consists in determining the planned position of the inflection points. It has been established that the maximum rates of planned deformations at most of the considered bends are not associated with the meandering process and are caused by changes in the permafrost landscape caused by the degradation of permafrost.

Keywords: Channel process, Yamal, meander, meanders parameters, permafrost, riverbed erosion.

For citation: Baskakova A. I., Isaev D. I. Estimation of deformation rates of meandering rivers of Yamal. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(78):(140—150). doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-140-150. (In Russ.).

Введение

Освоение Ямальского полуострова, активно развивающееся в последние годы, требует грамотной оценки природных процессов, протекающих в регионе. Строительство сооружений на Ямале неизбежно связано с гидрографической сетью полуострова. Проектные работы при этом должны опираться на прогноз русловых деформаций. Развитие мерзлотных процессов, высокая степень заболоченности, изменение климата и иные факторы создают особые условия для процесса русловых переформирований, зачастую определяя их исключительные проявления.

Согласно СТО ГУ ГГИ 08.29-2009, для территории Ямала наибольшее распространение имеют свободно меандрирующие русла рек. Свободное меандрирование как тип руслового процесса, согласно гидроморфологической теории [1], проявляется в развитии речных излучин от форм слабовыраженной синусоиды до петлеобразных очертаний в плане с дальнейшим прорывом перешейка излучины и образованием старичного озера. Визуальная оценка форм речных излучин Ямала позволяет сделать вывод об особенностях развития этого процесса в условиях вечной мерзлоты.

В отечественной практике, на наш взгляд, существует острая необходимость в развитии методологии оценки русловых процессов рек в условиях многолетней мерзлоты. Современная нормативная документация требует усовершенствования методик с учетом современных натурных наблюдений. Авторами [2, 3] опубликованы работы, посвященные исследованиям различных аспектов руслоформирования в условиях криолитозоны. Кроме того, некоторые работы по данной теме опубликованы сотрудниками лаборатории эрозии почв и русловых процессов МГУ [4, 5].

В настоящее время в зарубежной практике тема меандрирующих рек в условиях многолетней мерзлоты также вызывает значительный научный интерес. В работе [6] рассматривается влияние многолетнемерзлых грунтов и отсутствия

растительности на руслоформирование. Авторы указывают на значительное увеличение скоростей плановых деформаций под влиянием термокарста. В работе [7] указана роль изменения температуры воды на скорости береговой эрозии рек. Особое внимание зарубежные ученые уделяют моделированию размывов свободно меандрирующих рек в различных условиях [8, 9].

Целью настоящего исследования является оценка параметров излучин рек, скоростей их деформаций, протекающих в условиях многолетней мерзлоты.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных использованы топографические карты меандрирующих рек Ямала масштабом 1:10000 и 1:25000, полученные по данным съемок, выполненных отделом русловых процессов Государственного Гидрологического Института в 1967—1970 гг., и современные снимки спутника Landsat за 2021 г. Для оценки скоростей деформаций использован метод совмещения съемок за разные годы.

Для определения параметров излучин в качестве основы использована методика, опубликованная в [2]. Суть метода заключается в следующем: в речную излучину вписывается пятиугольник, основанием которого является линия шага излучины, проведенная по точкам перегиба, далее определяется вершина излучины как наиболее удаленная от линии шага точка и назначаются две точки на верхнем и нижнем крыльях излучины, характеризующие ее ширину. В соответствии с типизацией излучин, изложенной в [10], для омегаобразных излучин определение их ширин не вызывает особых затруднений, а для сегментных излучин ширина принимается по средней линии. На рис. 1 расстояние 1—5 соответствует шагу излучины λ ; расстояние 2—4 характеризует ширину излучины $B_{\text{ш}}$; расстояние 1—2—3—4—5 хорошо соответствует периметру излучины S . Таким образом, имея координаты всех пяти характерных точек, можно рассчитать степень развитости излучины S/λ , вытянутость h/λ , относительную ширину $B_{\text{ш}}/\lambda$ и др.

Результаты оценки скоростей деформаций

Работа по совмещению разновременных плановых положений речных русел выполнена для участков пяти рек Ямала: р. Ензорьяха, р. Щучья, р. Юрибей, р. Еркагаяха, р. Ясавей-Яха. Эти реки относятся к категории средних, что позволяет рассматривать скорости их русловых деформаций как характерные для рассматриваемого региона. Результаты совмещения съемок представлены на рисунках 2—6.

Анализ полученных совмещений показывает, что для всех изученных участков речных русел общее смещение положения береговых линий незначительно, что в целом характерно для рек Ямала. Низкие темпы размыва Ямальских рек объясняются низкими температурами воздуха и подстилающих многолетнемерзлых грунтов, определяющих ограниченную возможность свободного руслового потока оказывать воздействие на форму русла. Характерные скорости деформаций для рассматриваемых участков приведены в табл. 1.

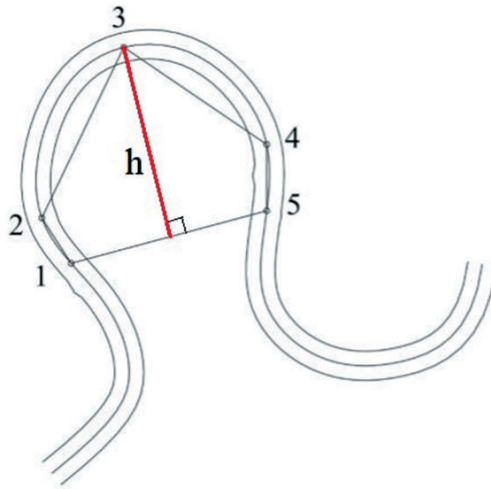


Рис. 1. Схема определения параметров излучин:

1 и 5 — точки перегиба излучины; 2 и 4 характеризуют ширину излучины; 3 — максимально удалена от линии шага излучины; h — нормаль от 3 до 1—5.

Fig. 1. Scheme for determining the parameters of bends:

1 and 5 — inflection points of the bend; 2 and 4 characterize the width of the bend; 3 — maximum distance from the bend step line; h — normal from 3 to 1—5.

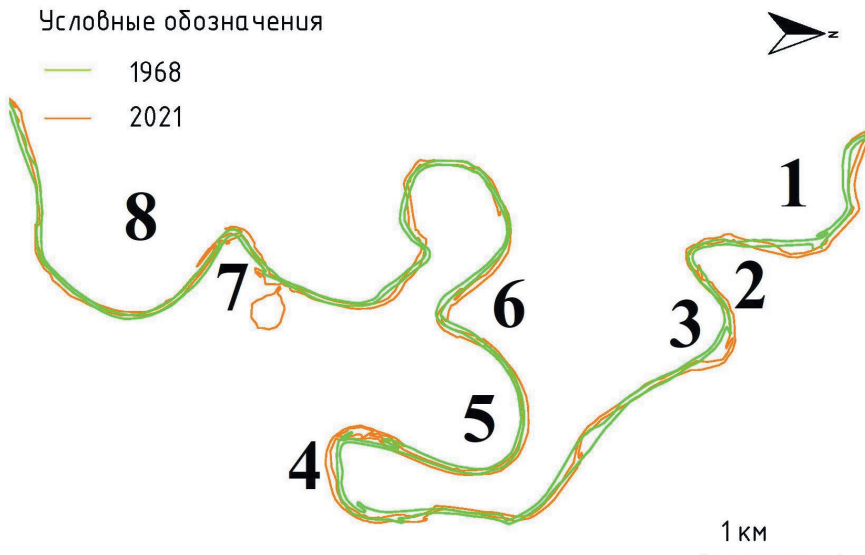


Рис. 2. Совмещение положения русла реки Энзорьяха.

Fig. 2. Coincidence of the position of the Enzoryakha River bed.

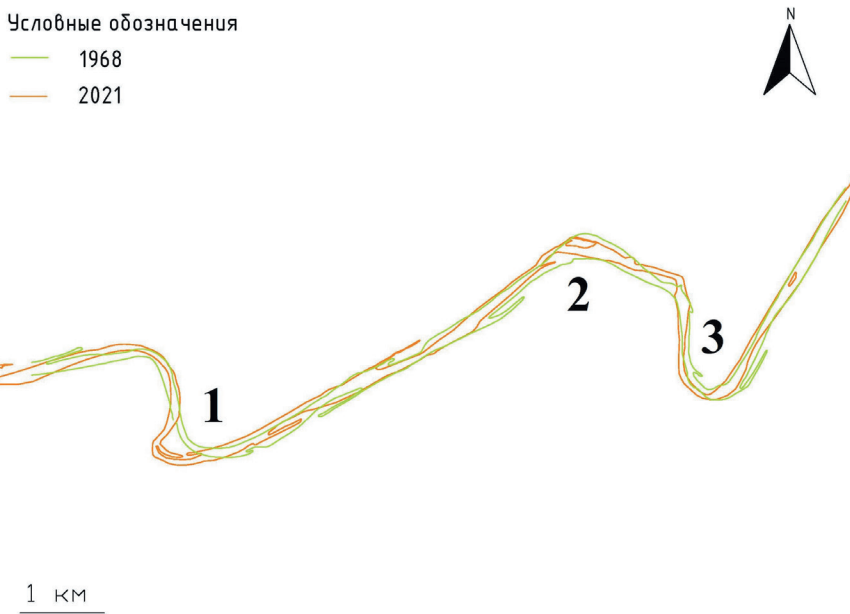


Рис. 3. Совмещение положения русла реки Еркатаяха.

Fig. 3. Coincidence of the position of the Erkatayaha River bed.

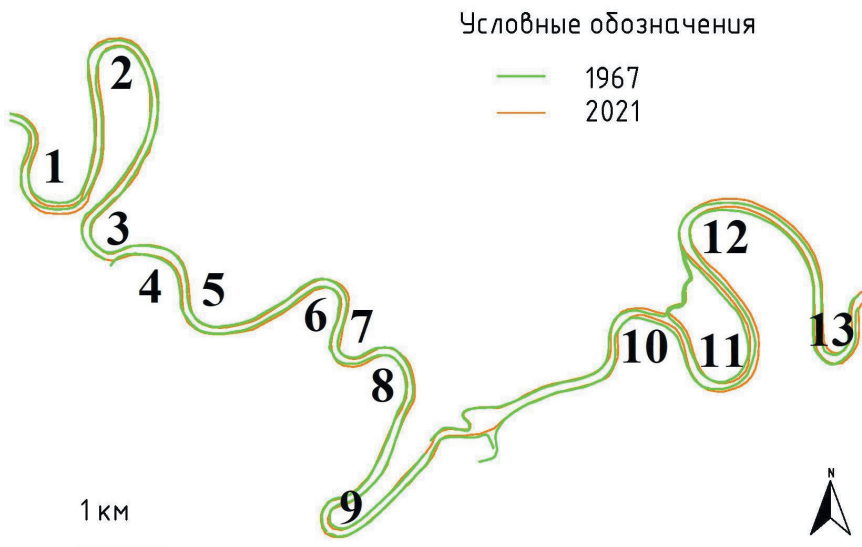


Рис. 4. Совмещение положения русла реки Щучья.

Fig. 4. Coincidence of the position of the Shchuchya River bed.

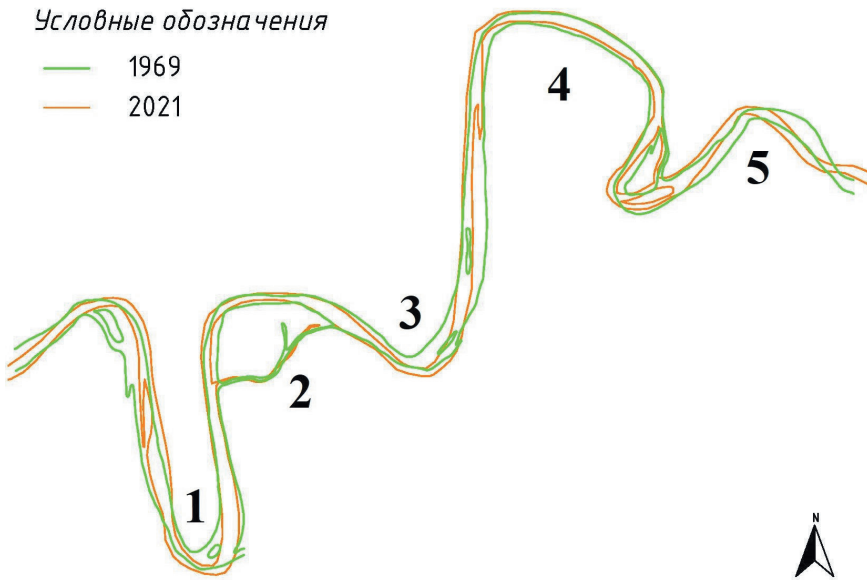


Рис. 5. Совмещение положения русла реки Юрибей.

Fig. 5. Coincidence of the position of the Yuribey River bed.



Рис. 6. Совмещение положения русла реки Ясавей-Яха.

Fig. 6. Coincidence of the position of the Yasavei-Yaha River bed.

Скорости русловых деформаций
Rates of channel deformations

| Река | Период, гг. | Средняя скорость смещения на участке, м/год | Максимальная скорость смещения на участке, м/год |
|------------|-------------|---|--|
| Ензорьяха | 1968—2021 | 0,6 | 2,1 |
| Еркатаяха | 1968—2021 | 0,9 | 7,3 |
| Щучья | 1967—2021 | 0,3 | 0,9 |
| Юрибей | 1969—2021 | 1,1 | 3,2 |
| Ясавей-Яха | 1969—2021 | 0,7 | 4,4 |

Однако практически на всех рассмотренных реках отмечаются локальные участки, на которых речное русло значительно изменило свое положение. Наиболее заметно это на сегментной излучине р. Еркатаяха (см. рис. 4 излучина 1).

Для каждого разновременного положения русла этих пяти рек определены параметры излучин по вышеизложенному методу. На рис. 7 приведены гистограммы распределения изменения параметров излучин за период с 1968 г. по 2021 г. Для удобства анализа на гистограммах показано «положение неизменения» — положение, при котором параметр для разных по времени съемок не менялся.

При классическом сценарии свободного меандрирования происходит сближение центральных участков выше и ниже расположенных излучин с последующим образованием прорыва перешейка [11], что в рамках рассмотрения параметров излучин должно проявляться в значительном увеличении ширины и степени развитости излучины в течение времени. Высота h для развитых излучин с течением времени нарастает, но с наименьшими скоростями.

Из анализа гистограмм на рис. 7 видно, что для большинства излучин характерен незначительный рост всех рассматриваемых параметров, что в целом характерно для свободно меандрирующих рек, протекающих в широких долинах. Однако на всех реках имеются излучины, для которых указанные параметры показывают не рост, а уменьшение. Это можно объяснить тем, что на этих излучинах появились дополнительные вершины, которые изменили конфигурацию основных ее элементов. Усложнение конфигурации таких излучин нехарактерно для свободного меандрирования и свидетельствует о влиянии факторов среды. Вероятной причиной подобных аномалий следует считать несистемное развитие таликовых подрусовых зон.

На рассмотренных реках отмечаются локальные участки с резким ростом скоростей деформаций, не объясняющиеся гидроморфологической теорией (излучина 1 на р. Еркатаяхе, излучина 7 на р. Ензорьяхе). При детальном изучении исходных спутниковых снимков обнаружено, что на такой резкий рост вытянутости повлияла просадка термокарста в вершине излучины, обусловившая провал русла.

На р. Юрибей (излучины 3, 5), р. Ясавейяхе (излучина 2) и р. Щучья (излучина 3) отмечаются сужающиеся излучины при одновременном развитии вытянутости и развитости. Это объяснимо локальными разрушениями долины реки

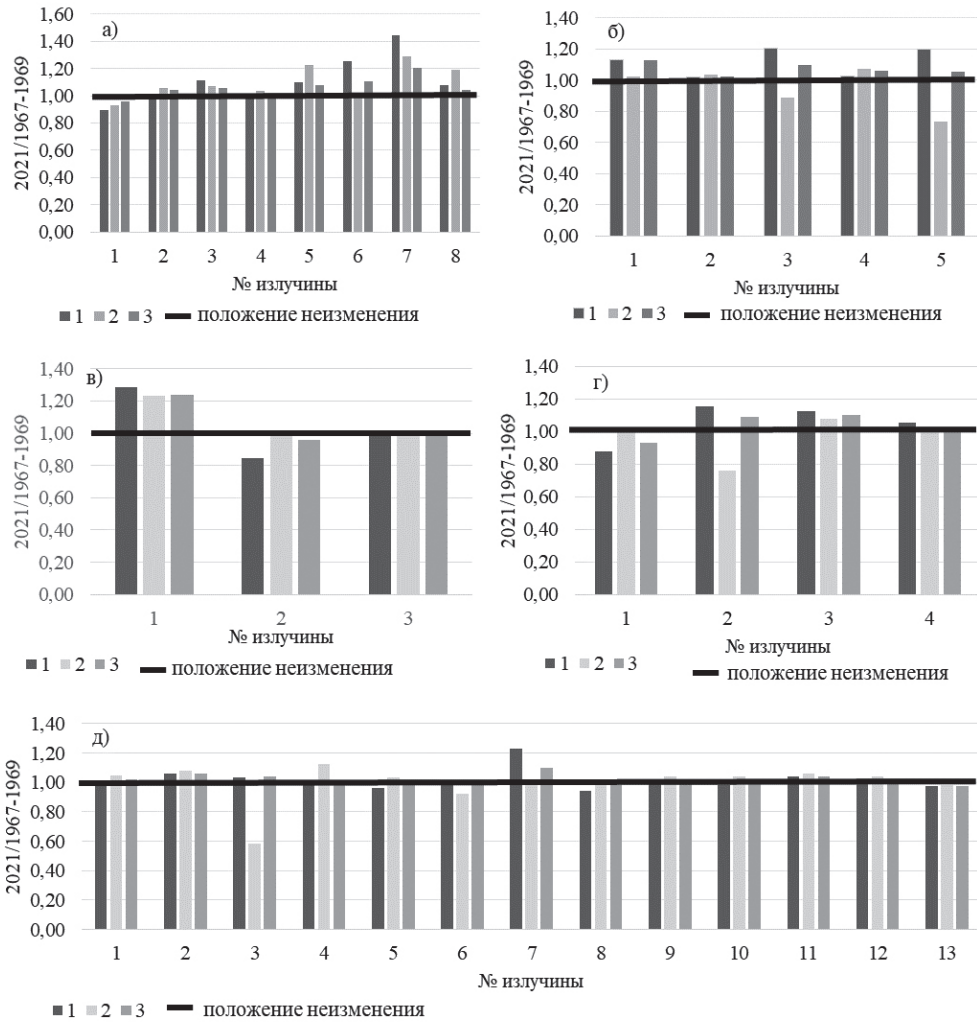


Рис. 7. Гистограммы распределения изменения параметров излучин *а* — р. Энзорьяха, *б* — р. Юрибей, *в* — р. Еркатаяха, *г* — р. Ясавейяха, *д* — р. Щучья.

1 — изменение вытянутости излучины $(h/\lambda)_{2021}/(h/\lambda)_{1967-1969}$;

2 — изменение полноты излучины $(B_n/\lambda)_{2021}/(B_n/\lambda)_{1967-1969}$;

3 — изменение относительной выраженности излучины $(S/\lambda)_{2021}/(S/\lambda)_{1967-1969}$.

Fig. 7. Histograms of distribution of changes in parameters of bends *a* — r. Enzoryakha, *b* — r. Yuribey, *c* — r. Erkatayakha, *d* — r. Yasaveyakha, *y* — r. Shchuchya.

1 — changing the elongation of the bend $(h/\lambda)_{2021}/(h/\lambda)_{1967-1969}$;

2 — changing the completeness of the bend $(B_n/\lambda)_{2021}/(B_n/\lambda)_{1967-1969}$;

3 — changing in the relative severity of the bend $(S/\lambda)_{2021}/(S/\lambda)_{1967-1969}$.

на границах пояса меандрирования, что вызвано деградацией многолетнемёрзлых форм рельефа.

Заключение

В настоящей работе представлены результаты совмещения положения речных русел за 53-летний период, полученные по данным съёмок, выполненных отделом русловых процессов Государственного Гидрологического Института в 1967—1970 гг. и современные снимки спутника Landsat за 2021 г. Это позволило выполнить оценку изменения параметров излучин за разные годы на ряде рек полуострова Ямал. Анализ результатов показал, что на темпы и характер русловых переформирований всех рассмотренных участков рек локальное влияние оказывают мерзлотные процессы.

При общих малых скоростях деформаций не более 1,1 м/год отмечаются участки с максимальными скоростями размыва до 7,3 м/год. По результатам дешифрирования установлено, что на всех рассмотренных участках рек максимальные скорости объясняются изменениями криогенных форм рельефа [13].

В связи с этим стоит отметить, что при оценке русловых процессов меандрирующих рек в зоне многолетней мерзлоты необходимо оценивать локальные элементы мерзлотного рельефа. В условиях изменения климата на форму речного русла наибольшее влияние могут оказывать именно мерзлотные формы рельефа (термокарст) и их разрушения.

Список литературы

1. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Снисченко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Изд. Гидрометеоиздат, 1982. 273 с.
2. Исаев Д. И., Иванова О. И., Баскакова А. И. Методика описания речных излучин (на примере рек Ямала) // Гидрометеорология и экология. 2021. №63. С. 227—235. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-227-235.
3. Баскакова А. И. Использование теории ландшафтоведения для оценки распространения различных типов речных русел на территории Арктической зоны Российской Федерации // Проблемы Арктики и Антарктики, 2024. Том 70, №2. №63. С. 174—184. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-174-184>.
4. Камышев А. А., Куракова А. А., Тарбеева А. М. Распространение и морфометрические характеристики четковидных русел северной части степной зоны Русской равнины // Геоморфология и палеогеография, 2024. №4. С. 134—149.
5. Чалов Р. С., Чалова Е. Р. Русловые процессы на реках полуострова Ямал и их картографирование // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о земле, 2024. №3. С. 308—314. doi:10.35634/2412-9518-2024-34-3-308-314.
6. Levy J. Meandering river evolution in an unvegetated permafrost environment // *Geomorphology*. 2023. Vol. 432, 108705. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4333052>.
7. Douglas M. M. Ablation-Limited Erosion Rates of Permafrost Riverbanks // *JGR Earth Surface*. 2023. Vol. 128, Issue 8. – URL: <https://doi.org/10.1029/2023JF007098>.
8. Crosato A. Analysis and modelling of river meandering: Proefschrift ter verkrijging van de graad van doctor / Alessandra Crosato. Technische Universiteit Delft. Amsterdam, The Netherlands, 2008. 268 p.
9. Treat C. Hydrologic Controls on Peat Permafrost and Carbon Processes: New Insights From Past and Future Modeling // *Frontiers Environmental Science*. 2022. Vol. 10. URL: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.892925>.

10. Чалов Р. С., Завадский А. С., Панин А. В. Речные излуины. М.: Изд-во МГУ, 2004. 371 с.
11. Попов И. В. Методологические основы гидроморфологической теории руслового процесса: Избранные труды. СПб.: Нестор-История, 2012. 304 с.
12. Маккавеев Н. И. Экспериментальная геоморфология. Выпуск II. Издательство Московского университета, 1969. 194 с.
13. Достовалов Б. Н. Кудрявцев В. А. Общее мерзлотоведение. М.: Изд. МГУ, 1967. 444 с.

References

1. Kondratev N. E., Popov I. V., Snishchenko B. F. *Osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsesa = Fundamentals of the hydromorphological theory of channel process*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1982: 273 p. [In Russ.].
2. Isaev D. I., Ivanova O. I., Baskakova A. I. Methodology for describing river bends (using the example of the Yamal rivers). *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorological and ecology*. 2021, 66: 227—235. [In Russian].
3. Baskakova A. I. Using the theory of landscape science to assess the distribution of various types of river beds in the Arctic zone of the Russian Federation. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of Arctic and Antarctic*. 2021; 2(70): (174—184). [In Russ.].
4. Kamyshev A. A., Kurakova A. A., Tarbeeva A. M. Distribution and morphometric characteristics of the chetkovid riverbeds of the northern part of the steppe zone of the Russian plain. *Geomorphologia i paleogeografiya = Geomorphology and paleogeography*. 2024; 4(55): (134—149). [In Russ.].
5. Chalov R. S., Chalova E. R. Riverbed processes on the rivers of the Yamal Peninsula and their mapping. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o zemle = Bulletin of the Udmurt University. Biology series. Earth Sciences*. 2024; 3(34): (308—314). [In Russ.].
6. Levy J. Meandering river evolution in an unvegetated permafrost environment. *Geomorphology*. 2023; (432): 108705. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4333052>.
7. Douglas M. M. Ablation-Limited Erosion Rates of Permafrost Riverbanks. *JGR Earth Surface*. 2023; 128(8). URL: <https://doi.org/10.1029/2023JF007098>.
8. Crosato A. Analysis and modelling of river meandering: Proefschrift ter verkrijging van de graad van doctor / Alessandra Crosato; Technische Universiteit Delft. Amsterdam, The Netherlands, 2008: 268 p.
9. Treat C. Hydrologic Controls on Peat Permafrost and Carbon Processes: New Insights From Past and Future Modeling. *Frontiers Environmental Science*. 2022: 10 URL: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.892925>.
10. Chalov R. S., Zavadsky A. S., Panin A. V. *Rechnye izluchiny = River bends*. М.: Publishing house of Moscow University, 2004: 371 p. [In Russ.].
11. Popov I. V. *Metodologicheskie osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsesa: Izbrannyye trudy = Methodological foundations of the hydromorphological theory of the riverbed process: Selected works*. Saint-Petersburg: Nestor-History, 2012: 304 p. [In Russ.].
12. Makkaveev N. I. *Ekspierimentalnaya geomorfologiya. Vypusk II = Experimental geomorphology. Issue II*. Moscow: Moscow University Publishing House, 1969:194 p. [In Russ.].
13. Dostovalov B. N. Kudryavtsev V. A. *Obshchee merzlotovedenie = General permafrost study*. Moscow: Moscow University Publishing House, 1967: 444 p. [In Russ.].

Сведения об авторах

Баскакова Анастасия Ивановна, независимый исследователь.

Исаев Дмитрий Игоревич, канд. геогр. наук, доцент, заведующий кафедрой водно-технических изысканий, Российский государственный гидрометеорологический университет.

Information about authors

Baskakova Anastasia Ivanovna, postgraduate student, State Hydrological Institute.

Isaev Dmitry Igorevich, PhD in Geogr., Associate Professor, Head of the Department of Water-Engineering Surveys, Russian State Hydrometeorological University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 14.01.2025

Принята к печати 25.02.2025

The article was received on 14.01.2025

The article was accepted on 25.02.2025

Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 151—165.
Hydrometeorology and Ecology. 2025;(78):151—165.

ГИДРОЛОГИЯ. В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ

Научная статья

УДК 001.891.573:[556.535.2: 519.23](28)(470.2)

doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-151-165

Построение регрессионных моделей для оценки уровенного режима озер Северо-Западной части России

Анна Александровна Батмазова, Екатерина Владимировна Гайдукова

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

Аннотация. Рассматривается применение регрессионных уравнений для моделирования уровня режима озер в условиях дефицита исходной информации на примере средних и малых озер Республики Карелия, Мурманской и Архангельской областей по стандартным метеорологическим данным. В работе с помощью аппарата множественной линейной регрессии выявляются гидрометеорологические факторы, являющиеся нетипичными для моделирования уровня режима озер. Также учитывается возможный временный сдвиг при влиянии рассматриваемых факторов на искомую величину — уровень озера.

Ключевые слова: регрессионный анализ, относительная влажность воздуха, уровеньный режим, средние озера, малые озера.

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ № FSZU-2023-0002.

Для цитирования: Батмазова А. А., Гайдукова Е. В. Построение регрессионных моделей для оценки уровня режима озер Северо-Западной части России // Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 151—165. doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-151-165

HYDROLOGY. DISCUSSION

Original article

Construction of regression models for assessing the level regime of lakes in North-West Russia

Anna A. Batmazova, Ekaterina V. Gaidukova

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

Summary. The article considers the experience of using step-by-step regression analysis for modeling the level regime of lakes in conditions of a deficit of initial information using the example of medium and small lakes of the Republic of Karelia, Murmansk and Arkhangelsk regions. In the work, using the apparatus of multiple linear regression, hydrometeorological factors are identified that are atypical for modeling the level regime of lakes. A step-by-step selection of predictors was carried out with justification for their

choice. Regression equations were constructed based on data with different discreteness, which was determined depending on the degree of regulation of the lakes. An assessment of the effectiveness of regression equations constructed on both dependent and independent material was performed. The following criteria were used to evaluate the effectiveness: S/σ_A , S/σ , NSE . During the analysis, a constant predictor was found for all lakes - relative air humidity. It was decided to use it as a replacement for atmospheric precipitation. The best lead time for modeling water levels of unregulated lakes was determined to be three days, at which the highest coefficient of determination of the model is observed. An analysis of the efficiency of the obtained models led to the conclusion that it is better to use several criteria, since the numerical representation of some efficiency criteria does not always coincide with the conclusions that can be made when evaluating the graphic material, i.e. graphs of the course of actual and modeled water levels.

Keywords: regression analysis, relative humidity, level regime, medium lakes, small lakes.

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

For citation: Batmazova A. A., Gaidukova E. V. Construction of regression models for assessing the level regime of lakes in North-West Russia. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(78):(151—165). doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-151-165. (In Russ.).

Введение

Изучение уровня режима озера как показателя водообмена является важной задачей при моделировании и прогнозировании состояния объекта с целью формирования и разработки схем использования и охраны водных ресурсов территории. Комплексному исследованию состояния водного объекта как в гидрологическом, так и в экологическом плане препятствует недостаток наблюдений на большинстве озер.

Вопрос о моделировании временных рядов гидрологических, метеорологических и экологических величин решается учеными различными подходами, но самым распространенным способом является построение регрессионных моделей (уравнений), позволяющих оценить взаимосвязь всех рассматриваемых факторов. Следует отметить, что регрессионные уравнения могут быть использованы не только для моделирования рядов, но и для их восстановления или удлинения по известным предикторам.

Например, в статье [1] авторы рассматривают возможность восстановления многолетних рядов температуры воздуха на европейской территории России на основе одного или нескольких индивидуальных аналогов по уравнению парной или множественной регрессии. Авторы статьи [2] объясняют, что метод гидрологической аналогии, требования к которому предъявляются в СП 33-101-2003, является скорее частным случаем пространственной интерполяции, и предлагают возможность формализации условий выбора аналога регрессионным уравнением с достаточно высоким коэффициентом корреляции и статистически значимыми коэффициентами. В результате на основе этого уравнения можно осуществить синтез многолетних данных в рассматриваемом пункте по информации в пункте-аналоге. В статье [3] выводятся региональные уравнения связи испаряемости и температуры воздуха, представляющие из себя полиномиальные и линейные регрессионные уравнения, которые могут использоваться для уточнения годовых и многолетних значений испаряемости, суммарного испарения для расчета притока воды в озеро и для их расчета на неизученных водосборах. В исследовании

Института водных проблем [4] рассматривается построение детерминированной физической модели колебания уровней бессточных водоемов, содержащей две компоненты: уровень водоема, формируемый водным балансом, и температуру водной поверхности, обусловленную изменениями теплового баланса. В исследовании [5] описывается моделирование колебаний уровня оз. Чаны, где подача на водосбор внешних воздействий осуществляется по двум моделям: первая модель основана на построении системы ортогональных полиномов и характеризуется линейной регрессией между смежными значениями случайных величин, а вторая модель — линейной корреляцией между равномерно распределенными значениями случайных величин, но с нелинейной регрессией между исходными случайными величинами.

В данном исследовании рассматриваются малые и средние озера (по классификации [6]) бассейнов Балтийского, Белого и Баренцева морей, расположенных на территории Республики Карелия, в Мурманской и Архангельской областях: Ведлозеро, Лексозеро, Сандал, Суоярви, Верхнее Куйто, Лёкшмозеро, Ондозеро, Пермусозеро, Ловозеро и Пулозеро. На берегах перечисленных объектов организованы реакционные зоны и расположены населенные пункты, использующие водные ресурсы в хозяйственных целях. Некоторые из исследуемых озер являются частью гидроэнергетических систем: водохранилищами являются либо сами озера, либо водохранилища находятся на вытекающих реках.

Цель данного исследования заключается в построении для уровней озер уравнений регрессии, учитывающих на водосборах рассматриваемых озер особенности изменения гидрометеорологических характеристик, которые оцениваются по доступной информации с гидропостов и метеостанций.

Для достижения цели выполнялись следующие задачи:

- выбор предикторов, которые учитывают гидрометеорологические процессы, происходящие в бассейнах Балтийского, Белого и Баренцева морей;
- построение физически обоснованных регрессионных моделей;
- оценка эффективности полученных моделей статистическими критериями.

Регрессионные модели могут быть использованы при восстановлении и/или удлинении рядов уровней воды озер. А также регрессионный анализ позволяет оценить взаимодействие характеристик и, в случае отсутствия данных наблюдения по одной из них (например, отсутствие данных по непосредственному притоку или оттоку из озера), определить связанную переменную, которая будет характеризовать изменение искомой величины.

Еще один аспект актуальности исследования заключается в применимости разрабатываемых моделей к малоизученным в гидрометеорологическом плане территориям. Определяются дополнительные характеристики, оказывающие значимые воздействия на моделируемую величину.

Объекты исследования и исходная информация

Основная информация об исследуемых озерах северо-западной части России представлена в табл. 1.

Информация об исследуемых озерах
Information about the study lakes

| № | Водный объект | Площадь зеркала, км ² | Площадь водосбора, км ² | Зарегулированность |
|----|---------------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| 1 | Лексозеро | 166 | 3450 | – |
| 2 | Ведлозеро | 58 | 564 | Сезонное |
| 3 | Сандал | 185 | 6620 | Частично многолетнее |
| 4 | Суоярви | 58,5 | 2120 | – |
| 5 | Верхнее Куйто | 240 | 7150 | – |
| 6 | Лёкшмозеро | 54,4 | 197 | – |
| 7 | Ондозеро | 182 | 2380 | Годичное |
| 8 | Пермусозеро | 24,2 | 503 | – |
| 9 | Ловозеро | 208,5 | 3770 | Сезонное |
| 10 | Пулозеро | 8,62 | 1130 | – |

На рис. 1 показано местоположение озер, речных гидрологических постов (ГП), озерных гидрологических постов (ОГП) и метеорологических станций (МС).

Озерные гидрологические посты: 1 — ОГП оз. Лексозеро — пос. Реболы [7—8]; 2 — ОГП оз. Ведлозеро — с. Ведлозеро; 3 — ОГП оз. Сандал — д. Тивдия [9—11]; 4 — ОГП оз. Суоярви — г. Суоярви; 5 — ОГП оз. Верхнее Куйто — д. Вокнаволоок; 6 — ОГП оз. Лёкшмозеро — с. Орлово; 7 — ОГП оз. Ондозеро — д. Ондозеро; 8 — оз. Пермусозеро — г. Оленегорск; 9 — ОГП оз. Ловозеро — с. Ловозеро; 10 — ОГП оз. Пулозеро — с. Пулозеро.

Гидрологические посты: ГП р. Лендерка — пос. Лендеры; ГП р. Видлица — с. Большие Горы; ГП р. Суна — д. Кивач; ГП р. Шуя — д. Бесовец; ГП р. Войница — п. Войница и р. Судно — д. Вокнаволоок; ГП р. Лёкшма — д. Кузьмино; ГП р. Онда — п. Лососий Порог; ГП р. Куреньга — г. Оленегорск; ГП р. Сергевань — 3 км от устья, р. Воронья — Исток; ГП р. Кола — 1429 км Октябрь. ж/д.

Метеорологические станции отбирались с помощью авторской программы *HMDistance* по ближайшему расстоянию к озерному гидрологическому пункту: МС Лодейное Поле, Сортавала, Петрозаводск, Паданы, Реболы, Кондопога, Краснощелье, Ловозеро, Мончегорск, Калевала, Пудож, Коннево, Сегежа, Мурманск.

По перечисленным ОГП и ГП была собрана информация по среднесуточным уровням воды озер и втекающих (вытекающих) рек, которые пересчитывались в среднемесячные или среднегодовые значения соответственно для озер с сезонной и многолетней зарегулированностью. В базу данных был включен период с 2008 г. по 2022 г.

База данных была дополнена рядами метеорологических характеристик с суточной дискретностью: среднесуточная температура воздуха (T); атмосферное давление на уровне станции (P_0) и на уровне моря (P); относительная влажность воздуха (U); среднесуточная скорость ветра (Ff); температура точки росы (Td);

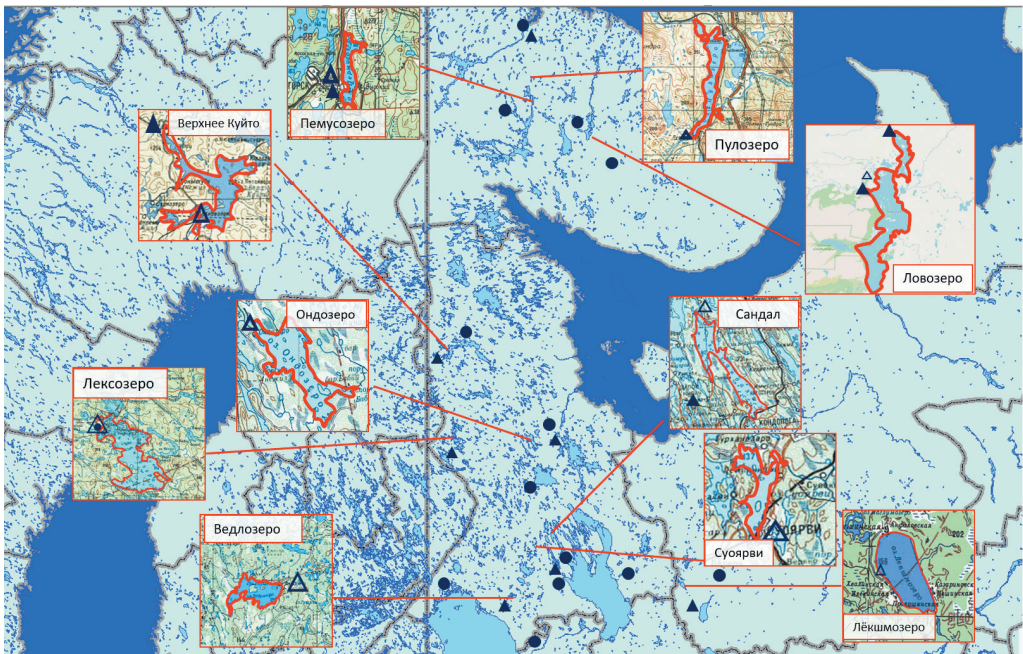


Рис. 1. Карта-схема гидрометеорологической изученности исследуемых озер.

● — метеостанция; ▲ — речной гидропост; △ — озерный гидропост; — — границы озер.

Fig. 1. Basemap of hydrometeorological study of studied lakes.

● — meteorostation; ▲ — river hydropost; △ — lake hydropost; — — lake boundaries.

облачность нижнего яруса (Cld) [12]; атмосферные осадки (RR); высота снежного покрова (S); дефицит насыщения водяного пара (Def).

Методика исследования

В исследовании осуществляется построение регрессионных уравнений, в которых искомой характеристикой является уровень воды в озере, а предикторами — значимые для уровня режима озер факторы влияния.

Отбор предикторов.

Основой является статистическое уравнение множественной линейной регрессии вида:

$$y = b_1x_1 + \dots + b_nx_n + b_0 + \varepsilon, \quad (1)$$

где y — искомая функция уравнения; b_0 — свободный член регрессионного уравнения; b_1, \dots, b_n — параметры регрессии; x_1, \dots, x_n — предикторы уравнения, которые в той или иной степени влияют на функцию отклика; ε — остатки, не описываемые уравнением регрессии [13].

Чтобы определить конкретный набор предикторов для каждого озера, можно использовать как метод включения переменных [13], так и поэтапный

регрессионный анализ. При любом подходе из всех моделей в качестве оптимальной выбирается та, у которой «стандартная ошибка модели минимальна или достаточна из физических соображений, коэффициент детерминации достаточно высок ($R^2 > 0,6$), модель адекватна по F -критерию, а вероятность ошибки расчета (p -level) для всех коэффициентов регрессии (включая свободный член) меньше заданного уровня значимости». [14]. В работе применялся второй способ, так как стояла задача из базы данных всех доступных гидрометеорологических величин выявить те, которые будут являться статистически обоснованными предикторами. Регрессионный анализ осуществлялся в несколько этапов, которые кратко описаны ниже.

1. Построение корреляционной матрицы с целью поиска мультиколлинеарных факторов и оценка нагрузки этих факторов. Например, для оз. Верхнее Куйто мультиколлинеарными предикторами (с коэффициентами корреляции $R > 0,7$) оказались температура воздуха T и температура точки росы Td ($R = 0,97$); атмосферное давление на станции P_0 и атмосферное давление на уровне моря P ($R = 0,99$). Из пары мультиколлинеарных факторов исключается тот, у которого коэффициент регрессии β , полученный по стандартизированным данным, меньше. В нашем случае $\beta_T = 1,21$; $\beta_{Td} = -1,27$; $\beta_{P_0} = -0,10$; $\beta_P = 0,11$. Следовательно, из анализа исключаются T и P_0 .

2. Построение регрессионного уравнения для анализа значимости предикторов. Для этого по критерию Стьюдента проверяется условие p -значение $< 0,05$. Предикторы, для которых это условие не выполняется, исключаются из анализа. В нашем случае для рассматриваемого примера оз. Верхнее Куйто при первой итерации исключается скорость ветра Ff с p -значением $= 0,23$ и давление на уровне моря P с p -значением $= 0,46$. Дополнительно проверялось условие значимости модели по F -критерию.

3. Анализ остатков уравнения регрессии. Строится частотная диаграмма, нормально-вероятностный график и диаграмма рассеяния. Это необходимо для понимания, что остатки распределены нормально и не зависят от предсказанных по уравнению регрессии значений отклика. На примере оз. Верхнее Куйто видно, что остатки распределены симметрично, а в соотношении остатков и предсказанных значений зависимости не наблюдается (см. рис. 2).

Перечисленные этапы позволяют отобрать статистически значимые предикторы. Результаты оценивания полученных регрессионных уравнений для рассматриваемых озер представлены в табл. 2. Для всех переменных в этих уравнениях выполняется условие p -level $< 0,05$. С формальной точки зрения, представленные уравнения являются оптимальными по статистическим критериям. Однако содержательного смысла в некоторых переменных нет. Например, в уравнении для оз. Верхнее Куйто переменные U и Def дают пренебрежимо малый вклад в коэффициент детерминации, при этом стандартная ошибка модели почти не уменьшается, поэтому оптимальным следует считать только уравнение с переменными $H_{\text{пр}2}$ и $H_{\text{пр}1}$. Примерно такая же ситуация встречается и в других уравнениях. В табл. 2 такие переменные выделены скобками.

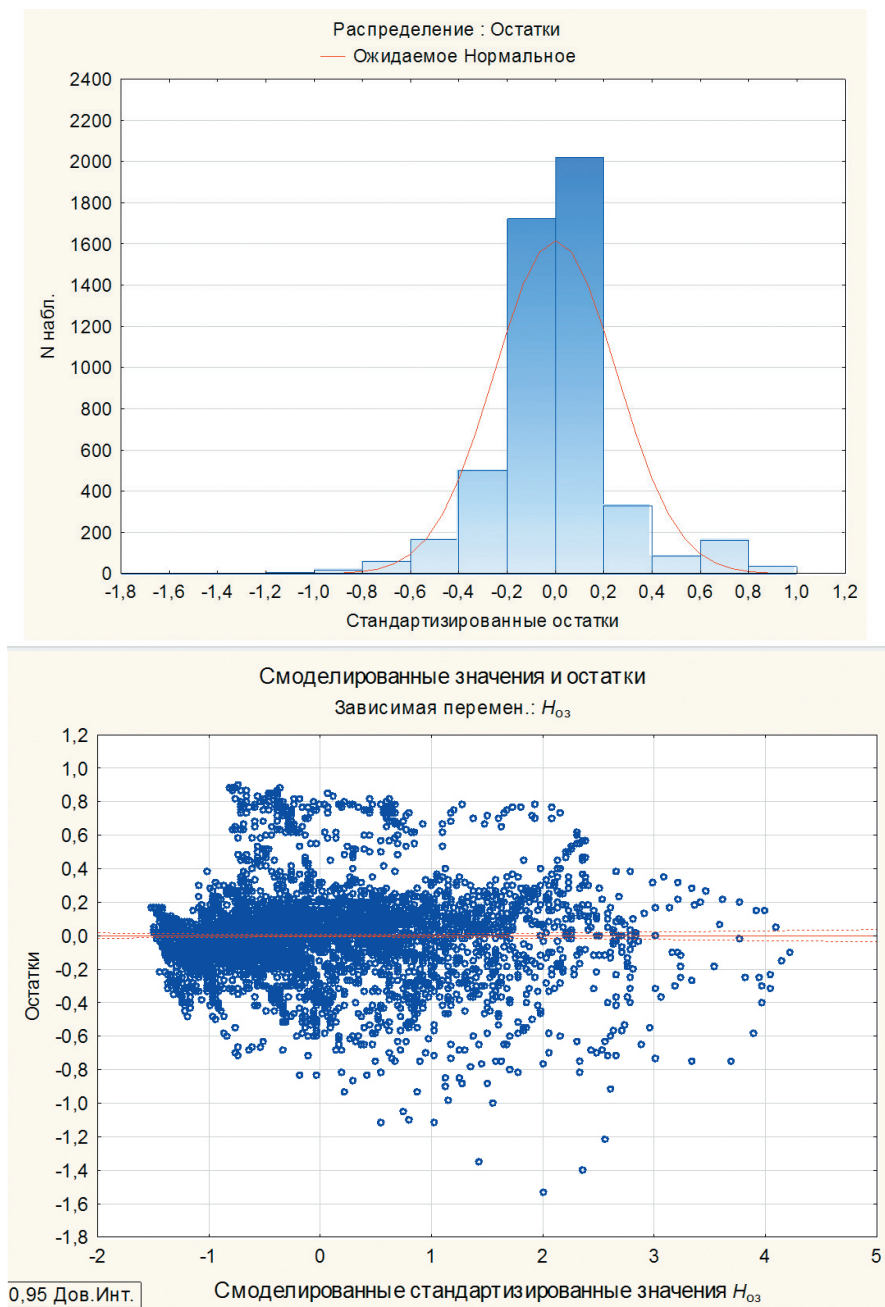


Рис. 2. Распределение остатков регрессионной модели, оз. Верхнее Куйто.

Fig. 2. Distribution of residuals of the regression model, Lake Verkhnee Kuito.

Статистические оценки параметров стандартизированных регрессионных уравнений
уровней воды исследуемых озер в зависимости
от гидрометеорологических характеристик за 2008—2021 гг.

Statistical estimates of parameters of standardized regression
equations of water levels of the studied lakes depending
on hydrometeorological characteristics for 2008–2021

| Дискретность | Предиктор | R^2 | σ |
|---------------|-----------|-------|----------|
| Верхнее Куйто | | | |
| Сутки | $H_{пр2}$ | 0,902 | 0,312 |
| | $H_{пр1}$ | 0,933 | 0,258 |
| | (U) | 0,934 | 0,256 |
| | (Def) | 0,936 | 0,253 |
| Лексозеро | | | |
| Сутки | $H_{отг}$ | 0,919 | 0,284 |
| | (U) | 0,920 | 0,282 |
| | (S) | 0,920 | 0,282 |
| Ведлозеро | | | |
| Месяц | $H_{отг}$ | 0,829 | 0,415 |
| | U | 0,849 | 0,392 |
| | S | 0,860 | 0,378 |
| Сандал | | | |
| Месяц | S | 0,213 | 0,889 |
| | $H_{отг}$ | 0,357 | 0,807 |
| | Def | 0,383 | 0,792 |
| | U | 0,582 | 0,654 |
| Суоярви | | | |
| Сутки | $H_{отг}$ | 0,814 | 0,432 |
| | S | 0,841 | 0,399 |
| | (U) | 0,842 | 0,398 |
| Пермусозеро | | | |
| Месяц | U | 0,251 | 0,868 |
| | S | 0,419 | 0,766 |
| | $H_{отг}$ | 0,516 | 0,702 |
| Ловозеро | | | |
| Месяц | $H_{отг}$ | 0,883 | 0,342 |
| | $H_{пр}$ | 0,907 | 0,306 |
| | (U) | 0,911 | 0,300 |
| Пулозеро | | | |
| Сутки | $H_{отг}$ | 0,914 | 0,292 |
| | S | 0,927 | 0,270 |
| | (U) | 0,927 | 0,269 |

Результаты исследования

Построение регрессионных моделей и оценка их эффективности.

По приведенному выше алгоритму анализировалось каждое из исследуемых озер. В итоге получилось десять регрессионных уравнений для моделирования без временного сдвига в рядах предикторов. Уравнения построены по данным за период с 2008 г. по 2021 г. и апробированы на независимом материале за 2022 г. При построении уравнений использовались разные шаги дискретизации, выбор которых зависит от того, является ли озеро зарегулированным: если нет, то использовались суточные значения гидрометеорологических величин; если да, то данные обрабатывались в соответствии с типом зарегулированности озера (см. табл. 1). Для этого использовались среднемесячные значения переменных.

Регрессионные уравнения для стандартизированных данных приведены в табл. 3.

Таблица 3

Регрессионные уравнения для исследуемых озер
Regression equations without lead time for the studied lakes

| | | |
|---|--|--|
| 1 | Лекозеро | |
| | Сутки | |
| | $H_{оз} = 0,96H_{отг} - 0,022U + 0,012S$ | |
| 2 | Ведлозеро | |
| | Сутки | Месяц |
| | $H_{оз} = 0,88H_{отг} - 0,11S - 0,083U$ | $H_{оз} = 0,91H_{отг} - 0,116U - 0,109S$ |
| 3 | Сандал | |
| | Сутки | Месяц |
| | $H_{оз} = 0,60Def + 0,52U + 0,37H_{отг} - 0,22S$ | $H_{оз} = 0,94Def + 0,82U + 0,38H_{отг} - 0,14S$ |
| 4 | Суоярви | |
| | Сутки | |
| | $H_{оз} = 0,87H_{отг} - 0,16S - 0,011U$ | |
| 5 | Верхнее Куйто | |
| | Сутки | |
| | $H_{оз} = 0,55H_{пр2} + 0,43H_{пр1} + 0,076U + 0,065Def$ | |
| 6 | Лёкшмозеро | |
| | Сутки | |
| | $H_{оз} = -0,34S + 0,17H_{отг} - 0,035U + 0,027P_0$ | |
| 7 | Ондозеро | |
| | Месяц | Год |
| | $H_{оз} = 0,56H_{отг} - 0,25U - 0,004T$ | $H_{оз} = 0,60H_{отг} + 0,33U - 0,15T$ |
| 8 | Пермусозеро | |
| | Сутки | |
| | $H_{оз} = -0,39S + 0,25H_{отг} - 0,24U$ | |
| 9 | Ловозеро | |
| | Сутки | Месяц |
| | $H_{оз} = 0,84H_{отг} + 0,11H_{пр} - 0,07U$ | $H_{оз} = 0,77H_{отг} + 0,18H_{пр} - 0,08U$ |

| | |
|----|---|
| 10 | Пулозеро Сутки $H_{03} = 0,88H_{отт} - 0,13S - 0,01U$ |
|----|---|

Из табл. 2 и 3 можно увидеть, что наиболее часто предикторами в уравнениях являются уровень воды рек, впадающих в озера или вытекающих из них и относительная влажность воздуха. Данная характеристика имеет значимую корреляцию с интегральным влагосодержанием атмосферы [15], которое формирует облачность и соответственно выпадение осадков. В работе показано, что в двух случаях (Сандал и Верхнее Куйто) предиктором служит также дефицит насыщения водяного пара *Def*. Он выявлен путем описанного выше алгоритма и объяснить справедливость его применения, помимо соблюдения условий регрессионного анализа, можно фактом отсутствия у оз. Сандал и оз. Верхнее Куйто данных по вытекающим рекам. В одном случае (оз. Ондозеро) предиктором является температура воздуха *T*, которая в ходе регрессионного анализа вытеснила из ряда предикторов высоту снежного покрова *S*.

Оценка эффективности.

Полученные уравнения оценивались на эффективность по критериям: S/σ_{Δ} (где *S* — среднеквадратическая погрешность, σ_{Δ} — среднеквадратическое отклонение моделируемой величины с учетом шага дискретизации), S/σ (где σ — среднеквадратическое отклонение моделируемой величины относительно среднего значения) [16] и зарубежному критерию *NSE* (критерий Нэша—Сатклиффа). Также оценивалась обеспеченность метода *P* (%), которая определяется по формуле $P = (n'/n) \times 100$, (где *n'* — количество смоделированных значений с погрешностью, меньшей допустимой, *n* — количество всех смоделированных значений), коэффициент детерминации R^2 и определялся наилучший возможный период заблаговременности, т. е. уравнения включали предикторы со сдвижкой по времени (для получения заблаговременности при моделировании).

В табл. 4—5 приведены значения перечисленных критериев эффективности для уравнений за расчетный период с 2008 г. по 2021 г. и на независимом периоде (2022 г.) с различной заблаговременностью. Стоит отметить, что для озер, которые не зарегулированы или имеют сезонное регулирование, в качестве наилучшего периода заблаговременности (с наивысшим значением R^2 и *NSE*) был определен временной сдвиг $\tau = 3$ суток. Для озер с годичным и многолетним регулированием информация в табл. 4—5 представлена для $\tau = 0$ и 1 месяц.

Проанализируем табл. 4—5, подтвердив численные значения критериев эффективности графиками хода фактических и смоделированных уровней воды (см. рис. 3). Рассмотрим на примере озера Сандал с заблаговременностью $\tau = 1$ месяц: функция отклика построенная за 2008–2021 гг. модели имеет умеренную прямую связь с обуславливающими ее предикторами, $R^2 = 0,58$; критерий эффективности $S/\sigma = 0,68$ и $S/\sigma = 0,72$ для расчетного и независимого периода соответственно, что в обоих случаях удовлетворяет условию $S/\sigma \leq 0,80$ при $n \geq 25$. Оценка критерия Нэша—Сатклиффа *NSE*, как и критерий S/σ , характеризует качество смоделированных величин и

изменяется в пределах от 0 до 1. Соответственно, если $NSE = 1$, то смоделированные значения идеально сопоставимы с фактическими, если $NSE = 0$, то это значит, что полученное уравнение характеризуется такой же способностью к моделированию, как и средние значения ряда, если $NSE < 0$, то вместо смоделированного значения лучше использовать среднее значение по ряду [17]. Для озера Сандал за период параметризации $NSE = 0,53$, а за поверочный период $NSE = 0,48$, что говорит о возможности применения полученного уравнения с целью моделирования уровня режима, что подтверждается и графически (см. рис. 3).

Таблица 4

Результаты оценки эффективности регрессионных уравнений за период с 2008 г. по 2021 г.

Results of assessing the effectiveness of regression equations for the period 2008–2021

| Водный объект | Временной сдвиг τ | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------------------|---------------------|-------|---------|-----------|------------|-------|---------|---------|------------|-------|---------|
| | 3 суток | | | | 0 месяцев | | | | 1 месяц | | | |
| | R^2 | S/σ_{Δ} | NSE | $P, \%$ | R^2 | S/σ | NSE | $P, \%$ | R^2 | S/σ | NSE | $P, \%$ |
| Лексозеро | 0,95 | 1,83 | 0,95 | 33,3 | 0,58 | 0,65 | 0,58 | 66,1 | 0,58 | 0,68 | 0,53 | 67,7 |
| Ведлозеро | 0,84 | 2,59 | 0,83 | 29,8 | | | | | | | | |
| Сандал | | | | | | | | | | | | |
| Суоярви | 0,83 | 2,73 | 0,80 | 23,2 | | | | | | | | |
| Верхнее Куйто | 0,96 | 1,28 | 0,96 | 54,5 | | | | | | | | |
| Лёкшмозеро | 0,16 | 6,05 | 0,10 | 9,5 | 0,31 | 0,83 | 0,31 | 57,7 | 0,32 | 0,83 | 0,32 | 63,5 |
| Ондозеро | | | | | | | | | | | | |
| Пермусозеро | 0,32 | 3,10 | 0,27 | 20,3 | | | | | | | | |
| Ловозеро | 0,88 | 1,82 | 0,88 | 38,4 | 0,91 | 0,30 | 0,91 | 97,0 | 0,36 | 0,81 | 0,35 | 73,7 |
| Пулозеро | 0,92 | 1,12 | 0,91 | 55,8 | | | | | | | | |

Таблица 5

Результаты оценки эффективности регрессионных уравнений на независимом периоде

Results of assessing the effectiveness of regression equations for the verification period

| Водный объект | Временной сдвиг τ | | | | | | | | |
|---------------|------------------------|-------|---------|------------|-------|---------|------------|-------|---------|
| | 3 суток | | | 0 месяцев | | | 1 месяц | | |
| | S/σ_{Δ} | NSE | $P, \%$ | S/σ | NSE | $P, \%$ | S/σ | NSE | $P, \%$ |
| Лексозеро | 1,79 | 0,91 | 34,3 | 0,64 | 0,59 | 75,0 | 0,72 | 0,48 | 45,5 |
| Ведлозеро | 2,47 | 0,86 | 17,7 | | | | | | |
| Сандал | | | | | | | | | |
| Суоярви | 2,34 | 0,87 | 21,3 | | | | | | |
| Верхнее Куйто | 0,60 | 0,99 | 77,6 | | | | | | |
| Лёкшмозеро | 11,69 | -1,96 | 6,4 | 1,43 | -1,05 | 25,0 | 0,73 | 0,44 | 63,6 |
| Ондозеро | | | | | | | | | |
| Пермусозеро | 2,49 | 0,60 | 28,2 | | | | | | |
| Ловозеро | 1,81 | 0,90 | 29,8 | 0,28 | 0,92 | 100,0 | 0,80 | 0,36 | 72,7 |
| Пулозеро | 1,10 | 0,92 | 51,9 | | | | | | |

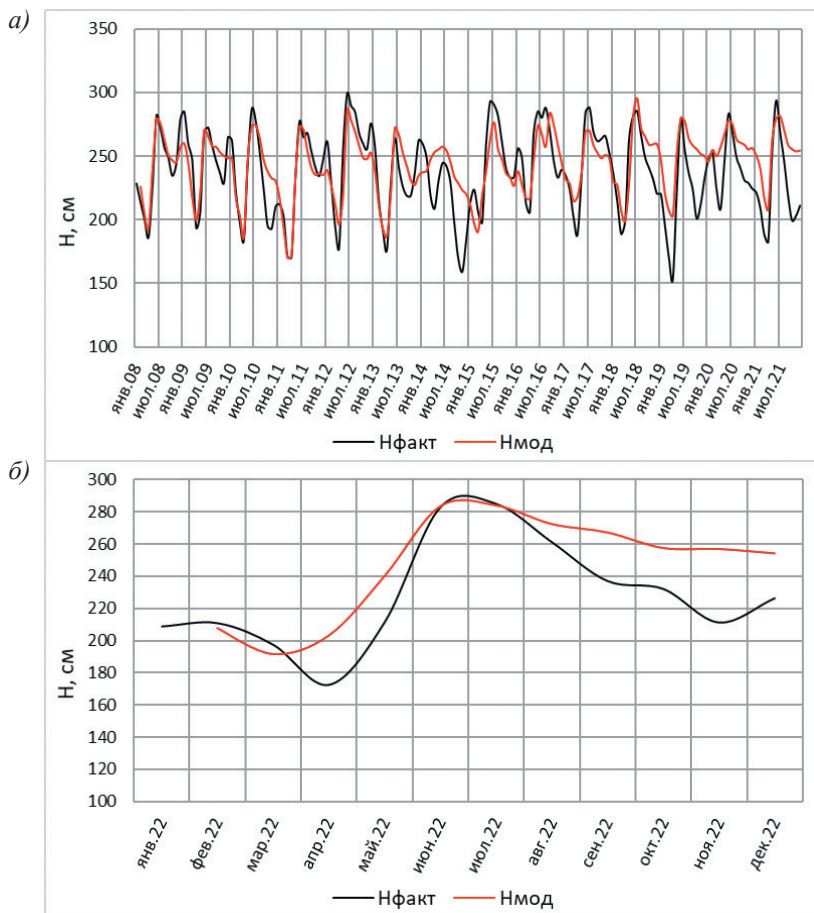


Рис. 3. График изменений фактических и смоделированных уровней воды оз. Сандал
a — за расчетный период; *б* — на независимом периоде.

Fig. 3. Graph of changes in actual and simulated lake water levels Sandal
a — for the calculated period; *b* — in the independent period.

На графиках видно, что смоделированные уровни в целом повторяют ход уровней фактических, улавливая пики, хотя в некоторых местах не захватывают минимальные значения.

Заключение

Применение регрессионного анализа позволило выявить предикторы, которые влияют на уровеньный режим озер бассейнов Балтийского, Белого и Баренцева морей. Наиболее часто предикторами в уравнениях являются уровень воды рек, впадающих в озера или вытекающих из них и относительная влажность воздуха.

Определен наилучший период заблаговременности для моделирования уровней воды незарегулированных озер $\tau = 3$ суток, при котором наблюдается наибольший коэффициент детерминации регрессионного уравнения.

Применение критериев эффективности к полученным моделям обозначило проблему использования рассматриваемых подходов. Целесообразно использовать критерии в комплексе и интерпретировать результаты в зависимости от поставленной задачи, опираясь также и на визуальное сопоставление результатов моделирования и фактического изменения рассматриваемой характеристики.

Результаты моделирования для ряда озер (например, Лёкшмозеро) оказались действительно неудовлетворительными по всем критериям, из чего следует, что необходим пересмотр факторов, влияющих на функцию отклика, дискретности и расчетного периода.

Список литературы

1. Лобанов В. А., Жильцова Е. Л., Лемешко Н. А. и др. Восстановление многолетних рядов температуры воздуха на европейской территории России // Метеорология и гидрология. 2005. №2. С. 5—14.
2. Лобанов В. А., Лобанова Е. В., Байков А. В. и др. Методы регионального моделирования в расчетах стока // Инженерные изыскания. 2011. №1. С. 70—77.
3. Сало Ю. А., Назарова Л. Е., Балаганский А. Ф. Расчет испаряемости и суммарного испарения с водосборов Северо-Запада России // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. №9. С. 95—101.
4. Найденев В. И. Отчет о НИР № 96-05-65043. Российский фонд фундаментальных исследований. 1998.
5. Болгов М. В., Коробкина Е. А. О моделировании колебаний уровня озера Чаны для управления его гидрологическим режимом // Водное хозяйство России. 2012. №1. С. 4—21.
6. Нежиховский Р. А. Наводнения на реках и озерах. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 183 с.
7. Александров Б. М., Покровский В. В., Смирнов А. Ф., Урбан В. В. Озеро Лексозеро (Муезерский район, Республика Карелия). Рыбалка на Лексозере. Карта озера Лексозеро: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vedlozero.ru/karelia/ozera-karelii/leksozero> (дата обращения: 25.08.2024).
8. Лексозеро (Лекш-озеро, Лекша, Льякса): [Электронный ресурс] / textual.ru // Государственный водный реестр / Минприроды России. 2009 (дата обращения 26.08.2024).
9. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 2. Карелия и Северо-Запад / под ред. Е. Н. Таракановой. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 700 с.
10. Озеро Сандал. Продолжение дискуссии: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://kondopoga.bezformata.com/listnews/ozero-sandal-prodolzhenie-diskussii/73984759/> (дата обращения: 18.09.2024).
11. Рыбальский Н. Г. и др. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2012 году». М.: НИА-Природа, 2013. 370 с.
12. Батмазова А. А., Гайдукова Е. В., Дрегваль М. С. Особенности построения регрессионной модели для оценки и прогноза уровня озера Ловозеро // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. №7(145). С. 1—11. doi: 10.60797/IRJ.2024.145.67.
13. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.
14. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Физико-статистический метод прогноза гидрологических характеристик (на примере Северо-Европейского бассейна). Мурманск: ПИНРО, 2003. 129 с.
15. Смирнов Н. П., Малинин В. Н. Водный баланс атмосферы как гидрологическая задача. Л.: Изд. ЛГУ, 1988. 200 с.
16. Георгиевский Ю. М., Шаночкин С. В. Гидрологические прогнозы. СПб.: РГГМУ, 2007. 436 с.

17. Сумачев А. Э. Оценка возможности прогнозирования максимального ледоходного уровня воды с использованием максимальной толщины льда на примере рек бассейна Северной Двины // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. №54. Научно-теоретический журнал. СПб: РГГМУ, 2019. С. 48—57.

References

- Lobanov V. A., Zhiltsova E. L., Lemeshko N. A. et al. Reconstruction of long-term series of air temperature in the European territory of Russia. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2005; (2): (5—14). (In Russ.).
- Lobanov V. A., Lobanova E. V., Baikov A. V. et al. Methods of regional modeling in runoff calculations. *Inzhenernie iziskaniya = Engineering surveys*. 2011; (1): (70—77). (In Russ.).
- Salo Yu. A., Nazarova L. E., Balagansky A. F. Calculation of evaporation and total evaporation from catchments in North-West Russia. *Trudy Kareliiskogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016; (9): (95—101). (In Russ.).
- Naidenov V. I. Otchet o NIR №. 96-05-65043. Russian Foundation for Basic Research. 1998. (In Russ.).
- Bolgov M. V., Korobkina E. A. On modeling fluctuations in the level of Lake Chany to control its hydrological regime. *Vodnoe khozyaistvo Rossii = Water Management of Russia*. 2012; (1): (4—21). (In Russ.).
- Nezhikhovskiy R. A. *Navodneniya na rekakh i ozerakh = Flooding of rivers and lakes*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988: 183 p. (In Russ.).
- Aleksandrov B. M., Pokrovskiy V. V., Smirnov A. F., Urban V. V. Lake Leksozero (Muezersky District, Republic of Karelia). Fishing on Leksozero. Map of Lake Leksozero. Available at: <https://vedlozero.ru/karelia/ozera-karelii/leksozero> (accessed on: 25.08.2024). (In Russ.).
- Leksozero (Leksh-ozero, Leksha, Lyeksa). Available at: <https://textual.ru/gvr/index.php?card=153424> (accessed on: 26.08.2024). (In Russ.).
- Tarakanova E.N. *Resursi poverkhnostnykh vod SSSR. Gidrologicheskaya izuchennost'. T.2. Kareliya i Severo-Zapad = Surface Water Resources of the USSR: Hydrological Study. Vol. 2. Karelia and the North-West*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965; 700 p. (In Russ.).
- Lake Sandal. Discussion continued. Available at: <https://kondopoga.bezformata.com/listnews/ozero-sandal-prodolzhenie-diskussii/73984759/> (accessed on: 18.09.2024). (In Russ.).
- Rybalsky N. G. *Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i ispolzovanii vodnykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2012 godu» = State report «On the state and use of water resources of the Russian Federation in 2012»*. M.: NIA-Priroda, 2013: 370 p. (In Russ.).
- Batmazova A. A., Gaidukova E. V., Dregval M. S. Features of constructing a regression model for assessing and forecasting the level of Lake Lovozero. *Mezhdunarodnii nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International scientific research journal*. 2024; 7(145):(1—11). (In Russ.). doi: 10.60797/IRJ.2024.145.67.
- Malinin V. N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoi informatsii = Statistical methods of analysis of hydrometeorological information*. St. Petersburg, izd. RGGMU, 2008: 408 p. (In Russ.).
- Malinin V. N., Gordeeva S. M. *Fisiko-statisticheskii metod prognoza gidrologicheskikh kharakteristik (na primere Severo-Evropeiskogo basseina) = Physical-statistical method for forecasting hydrological characteristics (using the North European Basin as an example)*. Murmansk: PINRO, 2003: 129 p. (In Russ.).
- Smirnov N. P., Malinin V. N. *Vodnyy balans atmosfery kak gidrologicheskaya zadacha = Water balance of the atmosphere as a hydrological problem*. L.: Leningrad State University Press, 1988: 200 p. (In Russ.).
- Georgievskiy Yu. M., Shanochkin S. V. *Gidrologicheskie prognozy = Hydrological forecasts*. St. Petersburg, izd. RGGMU, 2007: 436 p. (In Russ.).
- Sumachev A. E. Assessment of the possibility of predicting the maximum ice-flowing water level using the maximum ice thickness using the example of rivers in the Northern Dvina basin. *Uchyonye zapiski RGGMU = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2019; (54): (48—57). (In Russ.).

Информация об авторах

Батмазова Анна Александровна, аспирант, ассистент кафедры инженерной гидрологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, batmazovaa@mail.ru.

Гайдукова Екатерина Владимировна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной гидрологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, oderiut@mail.ru.

Information about authors

Batmazova Anna Aleksandrovna, postgraduate student, assistant of the Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia.

Gaidukova Ekaterina Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 29.09.2024

Принята после доработки в печать 22.02.2025

The article was received on 29.09.2024

The article was accepted after revision on 22.02.2025

ХРОНИКА. ИСТОРИЯ. ПЕРСОНАЛИИ

CHRONICLE. STORY. PERSONALIES

УДК 550.3-051

Жизнь, государственная и общественная деятельность выдающегося российского геофизика, академика Б. Б. Голицына

Алла Олеговна Волгушева

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

Аннотация. В статье рассматривается личная, профессиональная и научная деятельность Бориса Борисовича Голицына — известного геофизика, академика, доктора философии, члена Королевского общества, возглавлявшего Международную сейсмологическую ассоциацию, директора Николаевской Главной Астрономической обсерватории, автора сейсмометрических приборов и научных трудов по сейсмологии, признанных во всем мире.

Ключевые слова: Борис Борисович Голицын, геофизик, Николаевская Главная Астрономическая обсерватория, Главное Военное Метеорологическое Управление, Страсбургский университет, Международная сейсмологическая ассоциация.

Life, state and public activities of the outstanding Russian geophysicist, academician B. B. Golitsyn

Alla O. Volgusheva

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

Происхождение и семья

18 февраля 1862 г. в семье Голицыных родился сын, названный Борисом. Это был старинный дворянский род, корни которого следует искать в Литве XIV столетия, поскольку один из многочисленных потомков Литовского князя Гедемина — Михаил Иванович Голица-Булкак переехал в Московское царство Ивана IV, а сын его стал именоваться князем Голицыным. Сам Борис Борисович Голицын — потомок князя, фельдмаршала Михаила Михайловича Голицына, который был сподвижником Петра I. Его отец Борис Николаевич Голицын, окончив математический факультет Харьковского Университета, служил офицером в Генеральном Штабе и кавалерградском полку, а после отставки был предводителем Дворянства Новооскольского уезда Курской губернии. Мать Бориса Борисовича Мария Григорьевна Кушелева недолго прожила с его отцом и вскоре вышла замуж во второй раз за секретаря итальянского посольства в Петербурге Маркиза Инконтри, переехав в Италию.

Воспитанием Бориса Голицына занималась его бабушка графиня Екатерина Дмитриевна Кушелева, одна из придворных фрейлин, поэтому в детстве ему представилась возможность довольно часто посещать Большой Стрельнинский дворец (Константиновский), где он играл в детские игры с Великим князем Вячеславом Константиновичем, сыном Великого Князя Константина Николаевича и Великой Княгини Александры Иосифовны. Прекрасное домашнее образование Борис начал получать с раннего детства, когда к нему был приставлен гувернёр англичанин Роджерс, имевший за спиной образование Кембриджского университета, поэтому мальчик свободно мог говорить по-английски.

В 12 лет его определили в частную школу графа Апраксина, где работали лучшие преподаватели Санкт-Петербурга и где, помимо обучения, большое внимание уделялось воспитанию. В этой школе Борису удалось проучиться всего одну зиму, так как умерла Е. Д. Кушелева, и мальчик, оставшись сиротой, был взят на воспитание в семью сестры бабушки, графини Татьяны Дмитриевны Строгановой (в девичестве Васильчиковой), которая проживала в усадьбе Вольшово Псковской области [1].

Годы учёбы и роль научных наставников

На протяжении жизни Б. Б. Голицыну попадались яркие и незаурядные личности, которые определенным образом влияли на формирование его характера, профессиональную карьеру, траекторию жизни. Юный Борис самостоятельно определил место своего дальнейшего обучения, выбор пал на Морское училище. Для подготовки к предстоящему вступительному экзамену его отдали в семью О. Д. Изыльметьева, одного из ротных командиров, преподающего в училище астрономию. Метод Изыльметьева — это метод самоподготовки, ученик мог обращаться к учителю только после того, как изучит материал, и если вдруг у него возникнут вопросы. Такой способ подготовки оказался очень действенным и позволил Б. Б. Голицыну поступить, будучи шестым в большом списке абитуриентов.

Во время учёбы Борис Борисович начал государственную службу ещё в 16-летнем возрасте: во второй роте его произвели в унтер-офицеры, а уже через год в фельдфебели. Летом 1877—1879 гг. он участвовал в походах Морского училища по Балтийскому морю. Все студенты любили эти летние кампании, во время которых была возможность приобщиться к разносторонней практике морского дела. Значимой фигурой для Бориса, да и для всех учащихся, был начальник отряда В. Н. Брылкин, который пользовался огромным авторитетом, так как сам был неизменно увлечённым и преданным своему делу профессионалом. В автобиографии Б. Б. Голицын упоминал начальника Морского училища, контр-адмирала А. П. Епанчина, благодаря общению с которым у него сформировались важные жизненные качества: выносливость и самостоятельность.

В 1880 г. пятилетнее обучение в училище подошло к концу, были сданы трудные выпускные экзамены, при этом Борис был уверен, что именно учёба в Морском училище отразилась на нем самым благоприятным образом, несмотря

на то, что он был очень домашним молодым человеком [1]. По окончании училища Б. Б. Голицына назначили на полуброненосный рангоутный фрегат «Герцог Эдинбургский», где были очень непростые условия службы. Через год, когда фрегат вернулся в Кронштадт, Голицына произвели в мичманы и он должен был отправиться на Дальний Восток, но у него возникло страстное желание поступить в университет, он списался с фрегата и остался в Петербурге, но Морское ведомство предложило поступить ему в Морскую академию вопреки его желанию.

Внезапные признаки туберкулёза заставили его прервать карьеру и уехать к матери в Италию, но время проведённое за границей не прошло даром, он записался в несколько частных учебных заведений, увлёкся изучением политической экономии, математики, физики, химии, истории, а также историей средневековой итальянской живописи [2].

Через два года Борис Борисович возвратился в Петербург и поступил на гидрографическое отделение в Морскую академию, а еще через два года одним из первых её закончил, опередив весь курс, однако два обстоятельства послужили причиной разрыва его с флотом: желание заниматься исследовательской деятельностью, а также обида, связанная с присвоением очередного офицерского звания. Во время его учёбы вышел новый закон о морском цензе, который предполагал определённое число месяцев плавания для присвоения очередного чина, в итоге Голицыну не хватило одного месяца для присвоения ему лейтенанта, а Главный морской штаб не пошёл навстречу.

Его принципиальность проявилась в действиях: он перечеркнул свою карьеру морского офицера и решил поступать в Петербургский университет. Это был самый настоящий кризисный момент, когда опять нашёлся человек, повлиявший на его выбор, дав ему точку опоры и уверенность в своих силах. Им стал бывший начальник Главного Гидрографического управления и почётный член императорской академии наук Ф. Ф. Веселаго, который убедил Бориса, что годы учёбы в академии не только не прошли бесследно, а напротив заложили для него прочный фундамент знаний. Отсутствие аттестата зрелости не позволило ему поступить в Петербургский университет и, чтобы не терять время, весной 1887 года он поступил в Страсбургский университет на физико-математический факультет, где он стал учеником и преданным почитателем выдающихся учёных, повлиявших на него.

К ним относился Август Кундт, о котором у Голицына много благодарственных отзывов: «Кундт умел внушить своим ученикам чувство особой преданности и уважения к Физическому институту, который в их глаза являлся прямо каким-то храмом ...» [3]. Тема будущей докторской диссертации «О законе Дальтона» была определена после многочисленных размышлений и проведённых опытов. Отъезд Кундта из Страсбурга в Берлин расстроил Голицына, ему не хватало его как блестящего экспериментатора и научного наставника. Его новый научный руководитель Фридрих Кольрауш, несмотря на свои весомые научные заслуги, не смог продолжить традиции своего предшественника, среди студентов не было той творческой сплочённости и темп научной работы снизился, однако, несмотря на это, Голицын с благодарностью отзывался и о Кольрауше: «Его

многочисленные научные работы, отличавшиеся всегда особенною тщательностью и изяществом в отделке, заслужили ему весьма почётное место в среде современных физиков» [4]. Разница между этими учёными мужами была скорее не в области научной значимости, а в области человеческих отношений между студентами и профессорами.

Наряду со значимыми научными наставниками необходимо упомянуть и студентов—единомышленников. Бесспорно, что каждый студент приносит в учебный процесс свои уникальные идеи, опыт и перспективы, что обогащает коллективное обсуждение и позволяет взглянуть на предмет изучения под разными углами. Некоторые становятся не только партнёрами в учёбе, но и друзьями, порой на всю оставшуюся жизнь. Таким другом для него стал студент Петр Николаевич Лебедев, а в будущем создатель первой русской научной школы физиков, профессор Московского университета (1900—1911 гг.). Друзья снимали комнату у одной и той же хозяйки, вместе обедали и вели бесконечные научные беседы. В архиве Академии наук содержится переписка Б. Б. Голицына с известными учёными и государственными деятелями, в том числе и переписка с П. Н. Лебедевым (СПбФ АРАН).

В промежутках между семестрами Борис Борисович бывал либо в Италии у матери, либо проводил время в России, в имении Строгановых в Вольшово. Во время очередного визита в Россию он познакомился с директором Пулковской обсерватории академиком Г. И. Вильдтом, который сыграл важную роль в дальнейшей научной карьере Голицына. По окончании учёбы в Страсбурге были сданы докторские экзамены, защищена диссертация и присуждена высшая степень докторского диплома, однако в России, куда он вернулся после окончания учёбы, докторская степень ничего не значила, поэтому пришлось вновь проходить обучение на физико-математическом факультете Московского университета и защищать магистерскую диссертацию на тему «Исследования по математической физике», однако с защитой диссертации все оказалось непросто, она превратилась в настоящую драму, разыгранную в научных кругах. Не вдаваясь в подробности, следует заметить, что содержание его диссертации не являлось причиной её критики и неприятия, он угодил в жернова партийной борьбы на физико-математическом факультете между учёными с одной стороны, и руководством университета с другой. Данная полемика вышла за границы Московского университета, князь Голицын предпочёл в ней не участвовать, ибо такое положение дел выбило его из колеи, и он уехал в Страсбург, где «господствовали всегда благожелательные отношения и работалось всегда хорошо и легко» [1, с. 207], — писал он в своей автобиографии.

Профессиональный путь

Началом профессиональной деятельности Б. Б. Голицына можно считать преподавательскую работу в Московском университете (1891—1893 гг.) ещё до написания магистерской диссертации: на старших курсах — чтение специальных разделов математической физики, на младших — ведение практических занятий по различным разделам физики. После скандала с диссертацией и короткой работой

в Страсбурге ранней осенью 1893 г. его пригласили в Юрьевский университет, где от него потребовалось много усилий, так как педагогическая нагрузка была большой и разнообразной, о чем он писал П. Н. Лебедеву (СПбФ АРАН).

В 1894 г. князю Голицыну предложили читать физику в Николаевской Морской Академии, где он проработал до 1914 г. и много успел сделать: значительно расширил программу преподавания различных отделов физики, при переезде Морской Академии в собственное помещение на 11-ую линию Васильевского Острова он добился у Морского Министерства дополнительных денежных ассигнаций, благодаря чему были закуплены новые приборы для физического кабинета [1, с. 209].

В 1895 г. Голицына избрали экстраординарным академиком, а уже 1898 г. он стал ординарным академиком по отделу физики. Борис Борисович параллельно вёл научные исследования в сфере сейсмологии и геофизики. В 1896 г. принимал участие в экспедиции на Новую Землю, где выполнял фотограмметрические наблюдения.

В начале 1899 г. Министр финансов С. Ю. Витте пригласил князя Голицына на пост управляющего Экспедицией государственных бумаг, где он проработал до 1905 г. Его деятельность привела к коренной реорганизации и техническому переоснащению данной организации, ему удалось улучшить условия труда, быта и отдыха своих подчинённых [5]. Несмотря на большую занятость, Борис Борисович работал как в комиссиях Академии наук, так и выполнял обязанности её секретаря.

В 1910 г. ему вручили диплом доктора Манчестерского университета. В 1911 г. избрали президентом Международной сейсмологической ассоциации, а в 1913 г. Академия наук избрала князя директором Главной физической обсерватории (ГФО), где он проработал до 1916 г., сумев при этом сделать необычайно много:

- было приобретено множество новых приборов;
- набран научный персонал (физиков и математиков);
- создано собственное печатное научное издание «Геофизический сборник»;
- женщинам стали давать должности наравне с мужчинами.

В целом можно отметить его большой авторитет у коллег, демократичность и доступность в общении с подчинёнными.

В годы Первой Мировой войны

В начале войны Голицыным была осуществлена реорганизация деятельности метеослужбы и ГФО:

- подготовлен «Климатический бюллетень» для нужд Северной Армии;
- сокращена деятельность по инспекции метеостанций;
- организована большая механическая мастерская для снабжения страны собственными приборами по причине невозможности получать приборы из-за границы.

В 1915 г. на базе подразделения военной метеорологии ГФО было создано Главное Военное Метеорологическое Управление (ГВМУ), начальником которого был назначен Б. Б. Голицын, который, в свою очередь, подчинялся Августейшему заведующему авиацией и воздухоплаванием в действующей армии [6]. Таким образом, благодаря службе предсказания погоды для армии и флота, которую создал князь Голицын, стали возможными подготовка кадров, создание в армии воздухоплавательных и авиационных частей и химических команд, крайне необходимых, поскольку известно, что на Западном фронте немцы применяли отравляющие вещества.

Заключение

4 мая в 1916 г. Б. Б. Голицын неожиданно умер в возрасте 55 лет от воспаления лёгких. Этот выдающийся учёный был прекрасным семьянином. В Метрических книгах Москвы (Церковь св. Бориса и Глеба на Поварской улице), которая хранится в Центральном Государственном Архиве Москвы, записано, что 31 мая 1891 г. Голицын обвенчался с Марией Константиновной Хитрово, дочерью бывшего казанского вице-губернатора Константина Никаноровича Хитрово и Марии Ивановны Хитрово, с которой прожил всю жизнь (ЦГА Москвы).

В его адрес сказано много хороших и искренних слов, в заключении, хотелось бы привести цитату его школьного товарища и друга П. Мижуева: «Живой и отзывчивый на все доброе, князь Борис Борисович никогда не уходил в сторону от жизни, никогда не замыкался слишком в своем рабочем кабинете. Он сохранял всю свою жизнь любовь к искусству, к природе... в житейских взаимоотношениях был всегда совершенно независимым человеком. Далекий от всякого карьеризма, он никогда ничего не искал, ничего для себя не домогался...никогда для себя не требовал наград за подвиг благородный» [7].

Однако его ценят благодарные потомки. В 1970 г. Международный астрономический союз присвоил кратеру на обратной стороне Луны его имя. В 1994 г. была учреждена премия им Б. Б. Голицына за выдающиеся научные работы в области геофизики, именован «Академик Голицын» назвали научно-исследовательское судно. Гимназия № 278 Адмиралтейского района Санкт-Петербурга носит его имя.

Список литературы

1. Материалы для биографического словаря действительных членов Академии наук. ПГ., 1917. С. 193—195.
2. Оноприенко В. И. Голицын. 1862—1916. М.: Наука, 2002. 16 с.
3. Кундт А. Голицын Б. [Некролог] // Известия Императорской Академии наук. 5-я серия. 1894. Т. 1. Вып. 2. С. 27.
4. Кольрауш Ф. 1849—1910 гг. Некролог. // Известия Академии наук. 5 серия 1910. Т. 4. С. 187—188.
5. Хайрулин К. Ш., Прилипко Г. И., Хорева Н. А. Академик Голицын и его деятельность в главной физической обсерватории // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. Вып. 581. Санкт-Петербург. 2016. С. 238.
6. Прямыцын В. Н. Отечественная гидрометеорология в годы Первой Мировой и Гражданской войн (1914—1921 гг.). СПб. : Дмитрий Буланин. С. 210.

7. Мижуев П. Академик Б. Б. Голицын: Воспоминания школьного товарища и друга // Биржевые ведомости. 1916. Утр. Вып. 6 мая. № 15541. С. 5.

Информация об авторе

Волгушева Алла Олеговна, кандидат исторических наук, доцент, кафедра социально-гуманитарных наук РГГМУ, 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.

Статья поступила 20.01.2025

Принята в печать 22.02.2025

The article was received on 20.01.2025

The article was accepted on 22.02.2025

Памяти А. Д. Егорова



27 января 2025 г. на 78 году жизни скоропостижно скончался профессор, доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Александр Дмитриевич Егоров.

В 1964 г. Александр Дмитриевич поступил в Московский физико-технический институт и в 1970 г. успешно закончил его по специальности аэродинамика и термодинамика с присвоением квалификации инженер-физик. По окончании университета он поступил в очную аспирантуру и в 1973 г. защитил кандидатскую диссертацию на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. В этом же году А. Д. Егоров начал работать в Центральной аэрологической обсерватории в г. Долгопрудный старшим инженером. В 1975 г. он переехал в Ленинград и начинал работать в должности младшего научного сотрудника в Главной геофизической обсерватории (ГГО) им. А. И. Воейкова. Здесь произошло становление его как ученого. В ГГО он прошел все научные ступени: с 1980 г. по 1985 г. — старший научный сотрудник, 1985 г. — 1994 г. — ученый секретарь института, 1994 г. — 1998 г. — ведущий научный сотрудник, с 1998 г. по 2005 г. — заведующий отделом, а с 2005 г. по 2015 г. — главный научный сотрудник ГГО. В 1989 г. Егоров А. Д. защитил докторскую диссертацию и стал доктором физ.-мат. наук.

Одновременно Александр Дмитриевич Егоров начал заниматься учебной деятельностью. С 2005 г. по 2009 г. он работал в должности профессора в Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, а с 2005 г. по 2016 г. — заведующего кафедрой математики и теоретической механики Российского государственного

гидрометеорологического университета (РГГМУ). С 2016 г. по 2019 г. он работал в должности профессора кафедры математики и теоретической механики РГГМУ.

А. Д. Егоров является основоположником многопозиционного лидарного зондирования атмосферы. Принадлежащие ему теоретические решения использованы в научных экспериментах (ГАРЭКС в 1977 г.; АФАЭКС в 1979 г.; КЛЭ с 1983 г. по 1984 г.; АВТОЭКС в 1988—1989 гг. и др.), где им были выполнены лидарные измерения атмосферных характеристик. Принимал участие в международном симпозиуме PARTES в 1998 г. Александр Дмитриевич Егоров разработал критерий образования отсоединенного пограничного слоя, создал электро-гидромеханическую модель шаровой молнии. Результаты научной деятельности отражены в 4 монографиях, в более 200 научных публикациях в отечественных и зарубежных журналах. Он являлся автором и соавтором более 30 изобретений.

С 1990 г. по 2016 г. был членом диссертационного совета ГГО им. А. И. Воейкова, а с 1990 г. являлся членом диссертационного совета по метеорологии РГГМУ. Под научным руководством А. Д. Егорова защищено 6 кандидатских диссертаций, из них 3 диссертанта впоследствии стали докторами наук. С 2005 г. по 2016 г. являлся членом Ученого совета РГГМУ.

В 1972 г. А. Д. Егоров стал лауреатом премии МК ВЛКСМ, МОС НТО, МОС ВОИР; в 1983 г., 1985 г., 1986 г., 1988 г. награжден почетной грамотой Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды; в 1997 г. ему вручен знак Почетного работника Гидрометеослужбы России. Кроме того, в 2010 г. он награжден дипломом за лучший инновационный проект в сфере науки и высшего профессионального образования Санкт-Петербурга и дипломом международного конкурса «Национальная безопасность».

Светлая память об Александре Дмитриевиче Егорове навсегда останется в наших сердцах.

Коллеги, друзья, ученики

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 78

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Литературный редактор Л. В. Кипнес, канд. пед. наук, доцент
Технический редактор М. В. Иванова

Выход в свет 18.04.2025. Формат 70×100 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Электронно-сетевое издание. Усл. печ. л. 14,22. Заказ № 1494
Адрес издателя, редакции и типографии: РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет
