

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 72

Научно-теоретический журнал

Издается с октября 2005 года
Выходит 4 раза в год

ISSN 2713-3001

Санкт-Петербург
РГГМУ
2023

УДК 001(051.2)«540.1»
ББК 72я5

Гидрометеорология и экология. № 72. Научно-теоретический журнал. Санкт-Петербург : РГГМУ, 2023. 188 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:

Чилингаров А. Н., д-р геогр. наук, проф., член-корр. РАН, президент РГГМУ — *председатель совета*

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

Леонтьев Д. В., канд. юрид. наук, проректор по развитию РГГМУ, и.о. проректора по научной работе — *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; **Малори Жан**, PhD, профессор, почетный президент РГГМУ (Франция); **Орыщенко А. С.**, д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН, зав. кафедрой СПбПУ; **Поздняков Ш. Р.**, д-р геогр. наук; **Сальников В. Г.**, д-р геогр. наук, проф., декан ф-та географии и природопользования Казахского национального университета им. Аль-Фараби; **Сильников М. В.**, д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН, директор Института военно-технического обучения и безопасности СПбПУ; **Тимофеева А. Г.**, канд. геогр. наук, директор Института непрерывного обучения РГГМУ; **Федоров М. П.**, д-р техн. наук, проф., академик РАН, СПбПУ.

Редакционная коллегия:

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

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

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

Алексеев Г. В., д-р геогр. наук, проф.; **Белоненко Т. В.**, д-р геогр. наук, проф.; **Биденко С. И.**, д-р техн. наук, проф.; **Блиновская Я. Ю.**, д-р техн. наук, проф.; **Вильфанд Р. М.**, д-р техн. наук, проф.; **Вуглинский В. С.**, д-р геогр. наук, проф.; **Гриценко В. А.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Дмитриев В. В.**, д-р геогр. наук, проф.; **Ермаков Д. М.**, д-р физ.-мат. наук; **Зиновьев А. Т.**, д-р техн. наук; **Иванов В. В.**, д-р физ.-мат. наук; **Костяной А. Г.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Кудрявцев В. Н.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Курашов Е. А.**, д-р биол. наук, проф.; **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.; **Шапран 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 2713-3001

Журнал входит в Перечень ВАК по направлению науки о Земле и окружающей среде, 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, Вороневская ул., д. 79. Тел.: (812) 633-01-88 (доб. 421), e-mail: rio@rshu.ru.

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2023

© Авторы публикаций, 2023

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

№ 72

A theoretical research journal

Published since October, 2005
4 issues a year

ISSN 2713-3001

St. Petersburg
RSHU
2023

UDC 001(051.2)«540.1»
LBC 72я5

Hydrometeorology and Ecology. No. 72. St. Petersburg : RSHU Publishers, 2023. 188 p.

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

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

The Editorial Board:

Chilingarov A. N., Grand PhD in Geography, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, President of RSHU — *Chairman*

Mikheev V. L., PhD in Juridical Sciences, Associate Professor, Rector of RSHU — *Vice-Chairman*

Leont'ev D. V., PhD in Juridical Sciences, Vice-Rector for Development, Acting Vice-rector for 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; **Kvint V. L.**, Grand PhD in Economics, Professor, leading researcher of the RAS Central Economic and Mathematical Institute; **Malaurie Jean**, PhD, Professor, Honorary President of RSHU, France; **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; **Timofeeva A. G.**, PhD in Geography, Director of the Institute of permanent education RSHU.

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); **Shechukin G. G.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Vilfand R. M.**, Grand PhD in Engineering, Professor; **Vuglinsky V. S.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Zinoviev A. T.**, Grand PhD in Engineering Sciences; **Yakushev D. I.**, Grand PhD in Engineering, Professor; SPU MI.

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

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

Certificate ПИ № 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 2713-3001

The Journal included in the List of the Higher Attestation Commission in the direction of science of the Earth 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), 2023
© Authors of publications, 2023

Содержание

Метеорология

- А. Д. Кузнецов, Т. Е. Симакина, С. В. Крюкова, А. Г. Саенко.* Влияние погрешностей радиолокационной пеленгации аэрологических радиозондов на точность ветрового зондирования 407
- С. В. Морозова, Е. А. Полянская, М. А. Алимтиева.* Особенности межгодовой изменчивости приповерхностной температуры воздуха Северного и Южного полушарий по данным архива HadCRUT5 420
- М. Л. Торопова, Н. Е. Веремей, Ю. П. Михайловский, А. Б. Куров, А. А. Синькевич.* Прогноз развития грозových облаков с использованием ансамблевого подхода на базе моделей малой размерности 432

Метеорология. Обзор

- А. П. Соколина, О. В. Волобуева, Я. В. Дробжева, И. А. Иванова, И. В. Лаврова, О. Н. Топтунова.* Влияние космической погоды на безопасность полетов 449

Гидрология

- Д. М. Ермаков, Е. В. Пашинов, А. В. Кузьмин, С. А. Втюрин, А. П. Чернушич.* Концепция расчета элементов регионального гидрологического баланса с использованием спутникового радиотепловидения 470

Океанология

- Е. В. Волощук, Т. Р. Ерёмкина, Е. К. Ланге, А. С. Аверкиев.* Влияние климатических изменений и антропогенной деятельности на гидрометеорологический режим и состояние экосистемы Финского залива Балтийского моря 493

Геоэкология

- А. А. Майсс, Н. А. Майсс, Я. Ю. Блиновская, М. В. Высоцкая.* Отходы рыбопромыслового флота и их влияние на морскую среду 512
- В. В. Позднякова, М. А. Кустикова.* Обзор методов дистанционного обнаружения морских залежей углеводородов 525

Геоинформатика

- Х. Солиман, Д. А. Карпенкова (Украинцева), В. Г. Бурлов, А. А. Домостроева.* Оценивание морского ветроэнергетического потенциала на сирийском побережье на основе математического моделирования в среде ГИС 556

Хроника

- Э. Р. Еникеева, Я. В. Бубнова.* Иван Фёдорович Крузенштерн (1770—1846): мореплаватель и ученый 574
- К 75-летию Валерия Николаевича Малинина 583
- К 85-летию Георгия Георгиевича Щукина 586

Contents

Meteorology

- A. D. Kuznetsov, T. E. Simakina, S. V. Kryukova, A. G. Saenko.* Influence of radar direction finding errors of aerological radiosonds on the accuracy of wind sounding 407
- S. V. Morozova, E. A. Polyanskaya, M. A. Alimpieva.* Peculiarities of interannual variability of near-surface air temperature in the Northern and Southern Hemispheres according to HadCRUT5 archive data 420
- M. L. Toropova, N. E. Veremei, Y. P. Mikhailovskii, A. B. Kurov, A. A. Sin'kevich.* Forecast of the development of thunderstorms using the ensemble approach on the basis of low-dimensional models. 432

Meteorology. Review

- A. P. Sokolina, O. V. Volobueva, Y. V. Drobzheva, I. A. Ivanova, I. V. Lavrova, O. N. Toptunova.* Impact of space weather on flight safety 449

Hydrology

- D. M. Ermakov, E. V. Pashinov, S. A. Vturin, A. V. Kuzmin, A. P. Chernushich.* The concept of calculating the elements of the regional hydrological balance with the use of satellite radiothermvision 470

Oceanology

- E. V. Voloshchuk, T. R. Eremina, E. K. Lange, A. S. Averkiev.* Climate change impact and anthropogenic activity on the hydrometeorological regime and the ecosystem of the Baltic Sea 493

Geoecology

- A. A. Maiss, N. A. Maiss, Y. Yu. Blinovskaya, M. V. Vysotskaya.* Fishing fleet waste and its impact on the marine environment 512
- V. V. Pozdniakova, M. A. Kustikova.* The offshore hydrocarbon deposits remote detection methods review 525

Geoinformatics

- H. Soliman, D. A. Karpenkova (Ukraintseva), V. G. Burlov, A. A. Domostroeva.* Assessment of offshore wind energy potential on the Syrian coast based on mathematical modeling in a GIS environment 556

- Chronicle** 574

Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 407—419.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(72): 407—419.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 551.554:551.508.85
doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-407-419

Влияние погрешностей радиолокационной пеленгации аэрологических радиозондов на точность ветрового зондирования

***Анатолий Дмитриевич Кузнецов, Татьяна Евгеньевна Симакина,
Светлана Викторовна Крюкова, Андрей Геннадьевич Саенко***

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург,
Россия, tatiana.simakina@gmail.com

Аннотация. Методом замкнутых численных экспериментов с использованием архива реальной первичной радиолокационной информации проведено исследование влияния погрешностей в измерении наклонной дальности и угловых координат радиозонда существующими аэрологическими радиолокационными комплексами («Вектор», АВК-1, МАРЛ-А) на точность определения вертикальных профилей скорости и направления ветра. Моделирование, выполненное с использованием метода Монте-Карло, показало, что погрешность измерения наклонной дальности в большей степени влияет на точность восстановления скорости ветра, погрешность измерения угловых координат определяет точность направления ветра.

Ключевые слова: аэрологическое зондирование, вертикальные профили скорости и направления ветра, погрешности радиолокационных измерений, точность восстановления, метод Монте-Карло.

Для цитирования: 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.

Original article

Influence of radar direction finding errors of aerological radiosonds on the accuracy of wind sounding

*Anatoly D. Kuznetsov, Tatyana E. Simakina,
Svetlana V. Kryukova, Andrey G. Saenko*

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russian,
tatiana.simakina@gmail.com

Summary. The method of closed numerical experiments using the archive of real primary radar information was used to study the influence of errors in measuring the slant range and angular coordinates of the radiosonde by the existing aerological radar systems — «Vector», AVK-1, MARL-A on the accuracy of determining the vertical profiles of wind speed and direction. Modeling of errors in the direction finding of the radiosonde was carried out using the Monte Carlo method — an ensemble of 2250 time series of random errors in the measurements of the slant range and angular coordinates of the radiosonde was modeled. With such modeling it was assumed that the errors contained in the time series have a normal distribution law with zero mean and standard deviation from the mean corresponding to the passport data on the direction finding accuracy of the considered aerological information-measuring complexes.

The reliability of the results obtained is due to the choice of a “typical” wind speed profile for the warm season at the Voeykovo station near St. Petersburg. This profile when setting zero values of errors was taken as a reference one. The proposed method for finding a “typical” profile in a given season and in a given location is based on a correlation analysis of radio sounding results. By subtracting from 2250 profiles obtained in the presence of errors in the direction finding data, reference profiles, errors in determining the wind speed and direction by various aerological radars were found and their statistical analysis was performed.

It is shown that when using aerological radar AVK-1, the accuracy of restoring the wind profile in the warm season at Voeykovo station will average 1.6 m/s in speed and 5.3° in direction. For the MARL-A radar, the corresponding values will be 1 m/s and 3.3°, for the Vector radar - 0.9 m/s in speed and 2.6° in direction.

Numerical modeling has shown that the error in measuring the slant range to a greater extent affects the accuracy of restoring the wind speed, and the error in measuring the angular coordinates determines the accuracy of the wind direction.

Keywords: aerological sounding, vertical profiles of wind speed and direction, errors of radar measurements, recovery accuracy, Monte Carlo method.

For citation: Kuznetsov A. D., Simakina T. E., Kryukova S. V., Saenko A. G. Influence of radar direction finding errors of aerological radiosonds on the accuracy of wind sounding. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(72): 407—419 (In Russ). doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-407-419.

Введение

Аэрологическое зондирование атмосферы с помощью радиозондов, датой рождения которого является 30 января 1930 года, а родиной — Россия, продолжает оставаться одним из важнейших способов получения метеорологической информации.

Вертикальные профили метеорологических параметров атмосферы, измеряемые с помощью зондов, используются в качестве эталонных при калибровке

создаваемых приборов, лидарных профилометров, для верификации дистанционных систем определения профиля температуры и влажности, метеорологических радиолокаторов. Несмотря на то, что радиозондовые установки выступают как образцовые средства измерений [1—3], характеристики точности самих данных радиозондирования определены недостаточно и малоизвестны потребителям [4] в силу невозможности проведения метрологических процедур поверки таких установок в свободной атмосфере. Производители приемных устройств станций слежения за радиозондом гарантируют только стандартные погрешности измерения координат (дальности, угла места и азимута), а значения скорости и направления ветра не проверяются при испытаниях систем зондирования в реальной атмосфере и их погрешности не сертифицированы. Наиболее перспективным методом изучения качества получаемых данных о ветре становится вычислительный эксперимент.

Целью данной работы явилась количественная оценка влияния точности телеметрической радиолокационной информации на результаты ветрового аэрологического зондирования в свободной атмосфере.

Актуальность настоящей работы определяется тем, что от качества расчета термодинамических параметров атмосферы (в том числе параметров ветра) по измерениям системы аэрологического зондирования зависят: точность оперативного прогнозирования погоды, надежность измерения вертикального сдвига ветра в пограничном слое, существенного для прогнозирования загрязнения окружающей среды, правильность локализации различных атмосферных образований (облаков, фронтов, струйных течений) и высоты пограничного слоя атмосферы. Точные измерения ветра на высотах, а также измерения вертикального сдвига ветра критически важны при запуске космических аппаратов и других типов ракет для обеспечения безопасной посадки воздушных судов. Погрешности данных о ветре на высотах ограничивают точность современной артиллерии, поэтому с точки зрения безопасности эти данные важны при проведении военных операций [2].

Методика исследования

Радиолокационная информация по слежению за радиозондом используется для расчета высоты, к которой привязываются измерения характеристик ветра. Параметры ветра определяются косвенным методом, путем последовательных измерений положения радиозонда [5].

Исходная телеметрическая информация, использованная в данной работе, содержит время полета радиозонда (мин), вертикальный и горизонтальный углы (деления угломера), наклонную дальность (м). Пример представления первичных данных аэрологического радиозондирования атмосферы иллюстрирует рис. 1. Строка «Ветер» расшифровывается как направление ветра у поверхности земли 220 градусов, скорость ветра 3 м/с.

Наличие исходной телеметрической информации позволяет произвести расчет высотных профилей скорости и направления ветра по методике, представленной ниже на рис. 2 [6].

012_q.txt Данные радиолокационного зондирования за 08-06-1987					
Зонд №: 2 широта: 60°		Станция №: 26063 долгота: -30°		Высота станции: 70 м	
P = 999.3 гПа Ветер: 22003		T = 19.6 °C Высота Солнца: 46°		U = 51 %	
* Сертификат *		R01 = 30.480 A = 0.14477 K = 120.2	R02 = 30.480 B = 4222.13 N = -6.7	Q0P = 1600 C = 92.060 M = -0.09	
T[мин]	у.м. [ДУ]	азм. [ДУ]	дальн[м]	T[мин]	Q[мкс]
0.5	5.89	8.36	190	0.2	2024
1	5.32	7.94	390	0.7	2062
1.5	5.01	8.27	590	1.2	1583
2	4.79	8.05	690	2.2	2106
2.5	4.93	8.22	890	3.5	2033
3	4.99	8.29	1110	3.9	2160
4	5.40	8.32	1540	4.2	1581
5	5.92	8.58	2030	5.3	2253
6	5.94	9.23	2590	5.5	1580
7	5.51	9.45	3140	6.3	1844
8	5.05	9.66	3840	6.4	2327
9	4.71	9.78	4600	7.1	1909
10	4.45	9.78	5370	8.2	2391
12	4.01	10.06	6990	8.4	1580
14	3.79	10.28	8910	9.6	2465
16	3.42	10.52	11030	9.8	1582
18	3.23	10.65	13270	10.4	2398
20	2.99	11.01	16090	11.3	1583
22	2.76	11.27	19510	11.5	2493
24	2.64	11.34	22830	11.8	2487
26	2.55	11.46	25790	12.2	2179
28	2.46	11.76	29030	13.3	2586
30	2.35	12.21	33130	14	2610
32	2.23	12.66	37560	15.3	2723
34	2.16	13.08	42060	15.7	1583
36	2.06	13.46	46670	16.3	2131
38	1.99	13.59	51410	16.9	2832
40	1.97	13.66	54990	17	1585
42	2.09	13.67	57940	17.5	2864
44	1.99	13.62	62960	17.9	2182
46	2.01	13.54	65070	19.1	2985
48	2.05	13.61	67070	20	1586
50	2.09	13.63	68010	21.2	3110
				21.4	1587
				22	2204
				22.7	3263
				24	3503
				24.3	1587

Рис. 1. Исходная телеметрическая информация в текстовом формате.

Fig. 1. Initial telemetry information in text format.

В декартовой системе координат определяются проекции положения радиозонда на горизонтальную поверхность в различные моменты времени (обозначены как x_i и y_i ; $i = 1, 2, \dots$), t_i — время, прошедшее с момента запуска радиозонда [мин], α_i и β_i — соответственно вертикальный и горизонтальный углы [градусы], измеренные радиолокатором в моменты времени t_i , D_i — наклонная дальность [м], H_i — высота радиозонда над поверхностью земли [м], $V_{i,i-1}$ и $d_{i,i-1}$ — средняя скорость [м/с] и направление ветра [градусы] в слое высот H_i и H_{i-1} и приписываемые высоте середины этого слоя, $t_0 = 0$ (мин); $x_0 = 0$ (м); $y_0 = 0$ (м).

Методом моделирования случайных погрешностей в определении наклонной дальности и угловых координат радиозонда различными аэрологическими

$$\begin{aligned}
 H_i &= D_i \sin \alpha_i \\
 x_i &= H_i \cos \alpha_i \cos \beta_i \\
 y_i &= H_i \cos \alpha_i \sin \beta_i \\
 \Delta t_{i,i-1} &= t_i - t_{i-1} \\
 \Delta x_{i,i-1} &= x_i - x_{i-1} \\
 \Delta y_{i,i-1} &= y_i - y_{i-1} \\
 V_{i,i-1} &= \frac{\sqrt{\Delta x_{i,i-1}^2 + \Delta y_{i,i-1}^2}}{60 \Delta t_{i,i-1}} \\
 \gamma_{i,i-1} &= \operatorname{arctg} \left| \frac{\Delta y_{i,i-1}}{\Delta x_{i,i-1}} \right| \\
 d_{i,i-1} &= \begin{cases} 180^\circ + \gamma_{i,i-1} & \text{если } \Delta x_{i,i-1} > 0 \quad \Delta y_{i,i-1} > 0 \\ \gamma_{i,i-1} & \text{если } \Delta x_{i,i-1} < 0 \quad \Delta y_{i,i-1} < 0 \\ 360^\circ - \gamma_{i,i-1} & \text{если } \Delta x_{i,i-1} < 0 \quad \Delta y_{i,i-1} > 0 \\ 180^\circ - \gamma_{i,i-1} & \text{если } \Delta x_{i,i-1} > 0 \quad \Delta y_{i,i-1} < 0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

Рис. 2. Методика расчета высотных профилей скорости и направления ветра по пеленгационным данным.

Fig. 2. Method for calculating altitude profiles of wind speed and direction from direction finding data.

радиолокационными станциями (РЛС) являлся метод статистических испытаний или метод Монте-Карло [7], который состоит в том, что задаются статистические характеристики погрешностей измерения и с использованием генератора случайных чисел рассчитываются случайные погрешности с нужными статистическими свойствами. В нашем случае предполагалось, что погрешности подчиняются нормальному закону распределения с нулевым средним значением и заданным среднеквадратическом отклонением.

Как известно, плотность вероятности нормальной случайной величины ζ с заданным средним значением a и среднеквадратичным отклонением σ имеет следующий вид:

$$p(\zeta) = \frac{1}{\sigma_\zeta \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\zeta - a)^2}{2\sigma_\zeta^2} \right]$$

Для нормальной случайной величины ζ с параметрами $a = 0$ и $\sigma = 1$ может быть получен следующий алгоритм расчета по двум псевдослучайным числам γ , имеющим равномерный закон распределения на промежутке $[0, 1]$ (метод Бокса-Мюллера) [8]:

$$\zeta_1 = \cos(2\pi\gamma_2)\sqrt{-2\ln\gamma_1}$$

$$\zeta_2 = \sin(2\pi\gamma_2)\sqrt{-2\ln\gamma_1}$$

На основе этих соотношений генерация псевдослучайной величины τ , имеющей нормальное распределение со средним значением a и СКО σ , может быть произведена на основе следующего соотношения:

$$\tau_i = a + \sigma_\tau \zeta_i, \quad i = 1, 2, \dots$$

Исследование влияния случайных погрешностей в пеленгационных данных на точность ветрового зондирования выполнено на основе так называемых замкнутых численных экспериментов. При таком подходе для каждого из рассмотренных случаев зондирования сначала использовались фактические данные пеленгации радиозонда аэрологической РЛС (см. рис. 1), причем в данном случае тип РЛС не имеет значения. Такие данные содержали временные ряды вертикальных и горизонтальных углов и наклонной дальности для каждого отдельного запуска радиозонда. Эти данные пеленгации считались реперными (не содержащими погрешностей измерений) и по ним рассчитывались вертикальные профили скорости и направления ветра, которые так же считались реперными.

Затем в радиолокационные измерения вносились случайные погрешности по следующей методике. Для каждого временного отсчета были рассчитаны три погрешности в измерении вертикального и горизонтального углов и наклонной дальности. При задании среднеквадратических отклонений для расчета этих погрешностей использовались паспортные данные реальных аэрологических радиолокаторов РЛС АВК-1, МАРЛ-А и «Вектор» (табл. 1). В результате были получены три независимых временных ряда погрешностей, которые добавлялись к исходным данным пеленгации (см. рис. 1). По этим данным рассчитывались вертикальные профили скорости и направления ветра.

Таблица 1

СКО пеленгации аэрологических РЛС

Mean square errors of direction finding of upper-air radar stations

Радиолокационные станции	АВК-1	МАРЛ-А	«Вектор»
$\Delta\alpha$, градусы	0.2	0.12	0.05
$\Delta\beta$, градусы	0.2	0.12	0.05
ΔD , м	30	45	15

Для каждого зондирования процедура моделирования временных рядов погрешностей радиолокационных измерений производилась многократно (в данной работе — 2250 раз).

Затем производилась статистическая обработка 2250 вертикальных профилей, содержащих погрешности в определении скорости и направления ветра: определялся средний вертикальный профиль, профиль СКО. Профили ошибок в определении скорости и направления ветра различными аэрологическими РЛС

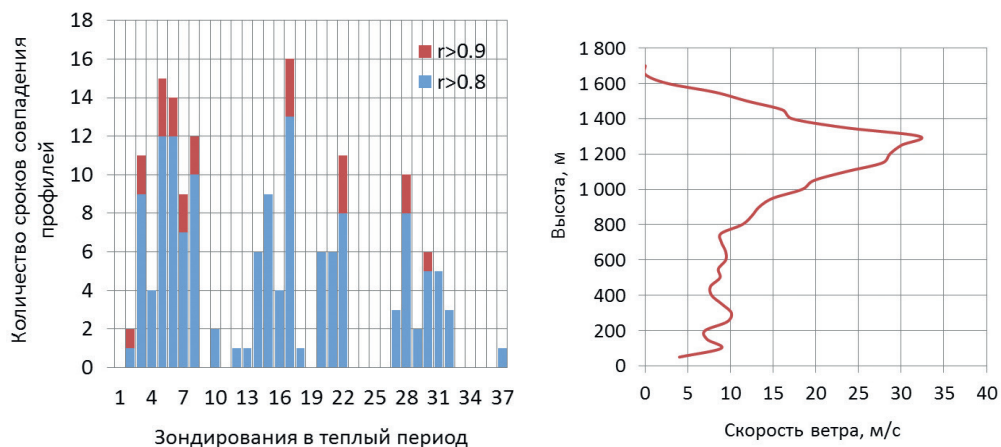


Рис. 3. Выбор «типичного» профиля скорости ветра на станции Воейково в теплый период года.

Fig. 3. Selection of a “typical” wind speed profile at the Voeikovo station during the warm season.

находились путем вычитания из 2250 профилей, полученных при наличии погрешностей в пеленгационных данных, реперных профилей.

Моделирование выполнялось на основе реальных данных, полученных на аэрологической станции Воейково в теплый период 2020 г. Для иллюстрации влияния погрешности пеленгации на точность восстановления профилей ветра выбран «типичный» профиль скорости ветра. «Типичным» считался профиль, наиболее характерный для данного сезона и данного района. Выбор такого профиля выполнялся на основе наибольшего количества коэффициентов корреляции со значением более 0,8. По данным тридцати семи зондирований в теплый период года, профиль, представленный на рис. 3, «похож» на 16 других (коэффициент корреляции более 0,8), из них максимально «похож» на три (коэффициент корреляции более 0,9).

Результаты исследований

Для оценки влияния погрешностей в измерении угловых координат радиозонда и наклонной дальности до него на точность параметров ветра были проведены расчеты, при которых одна погрешность менялась, а другая — принималась нулевой. Так, на рис. 4 а представлены зависимости точности определения вертикального профиля скорости и направления ветра (задаваемых СКО от реперных значений) по 2250 статистическим испытаниям при различных случайных ошибках только в угловых координатах, на рис. 4 б — только в наклонной дальности. Анализ результатов расчетов показал, что погрешность в измерении угловых координат радиозонда обусловила СКО скорости ветра до 0,5 м/с, направления до 3,2°, ошибки в наклонной дальности до 11 м/с и 1,9° соответственно.

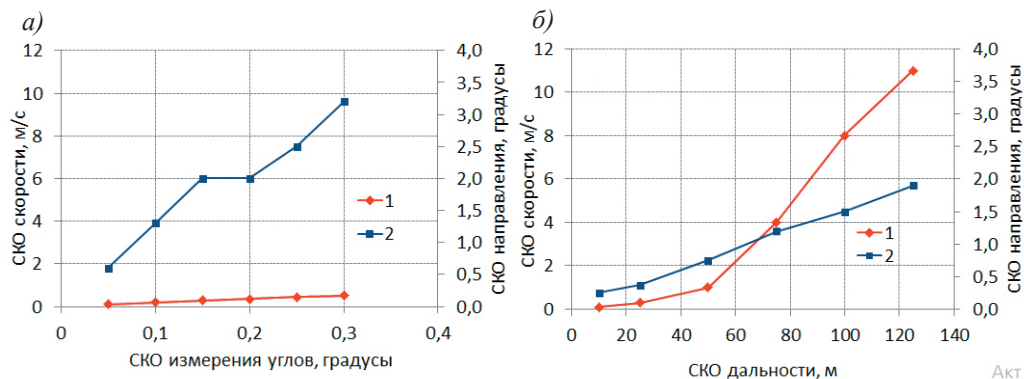


Рис. 4. Погрешности определения вертикального профиля скорости (1) и направления ветра (2) при различных случайных ошибках:

a — только в угловых координатах; *б* — только в наклонной дальности.

Fig. 4. Errors in determining the vertical profile of wind speed (1) and direction (2) for various random errors:

a — only in angular coordinates; *б* — only in slant range.

Таким образом, точность восстановления скорости ветра в большей степени определяется точностью измерения наклонной дальности, а направления ветра — точностью угловых координат.

В целом по результатам 2250 испытаний для реальных погрешностей РЛС (табл. 1) средние случайные погрешности профилей параметров ветра, осредненные по высоте, составили:

АВК-1:	$\Delta v_{\max} = 1,6 \text{ м/с};$	$\Delta d_{\max} = 5,3^\circ$
МАРЛ-А:	$\Delta v_{\max} = 1,0 \text{ м/с};$	$\Delta d_{\max} = 3,3^\circ$
«Вектор»:	$\Delta v_{\max} = 0,9 \text{ м/с};$	$\Delta d_{\max} = 2,6^\circ$

Пример сопоставления восстановленных профилей при разном уровне случайных погрешностей в измерении угловых координат и наклонной дальности представлен на рис. 5 и рис. 6 для скорости и направления ветра соответственно.

Пример вертикального распределения профилей средних значений ошибок определения скорости и направления ветра для РЛС АВК-1, МАРЛ-А и «Вектор» представлен на рис. 7 и рис. 8.

Как следует из анализа представленных графиков, максимальная ошибка между реперными профилями направления и скорости ветра и профилями, вычисленными с учетом ошибок пеленгации, находится в пограничном слое атмосферы и составляет $\pm 11,5^\circ$ и $\pm 1,9 \text{ м/с}$. Значения СКО профиля ошибок скорости ветра для РЛС АВК-1, МАРЛ-А и «Вектор» составляют соответственно 0,29, 0,57 и 0,86 м/с. Для направления ветра значения СКО профиля ошибок для РЛС АВК-1, МАРЛ-А и «Вектор» составляют соответственно 1,0; 2,1 и 3,2 градуса.

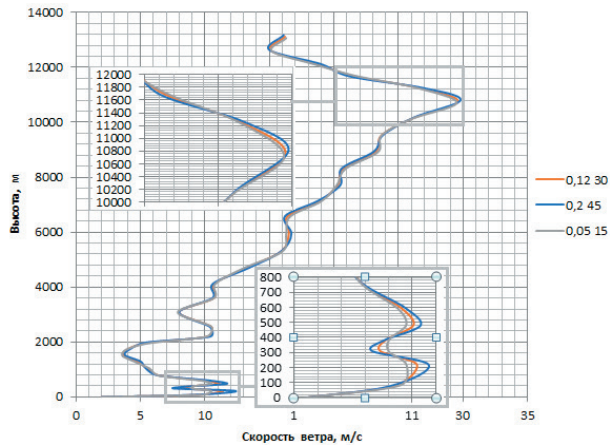


Рис. 5. Сопоставление восстановленных профилей скорости ветра по данным РЛС АВК-1 (погрешности $0,2^\circ$; $0,2^\circ$; 45 м), МАРЛ-А (погрешности $0,12^\circ$; $0,12^\circ$; 30 м) и «Вектор» (погрешности $0,05^\circ$; $0,05^\circ$; 15 м).

Fig. 5. Comparison of the reconstructed wind speed profiles according to AVK-1 radar data (errors 0.2° ; 0.2° ; 45 m), MARL-A (errors 0.12° ; 0.12° ; 30 m) and «Vector» (errors 0.05° ; 0.05° ; 15 m).

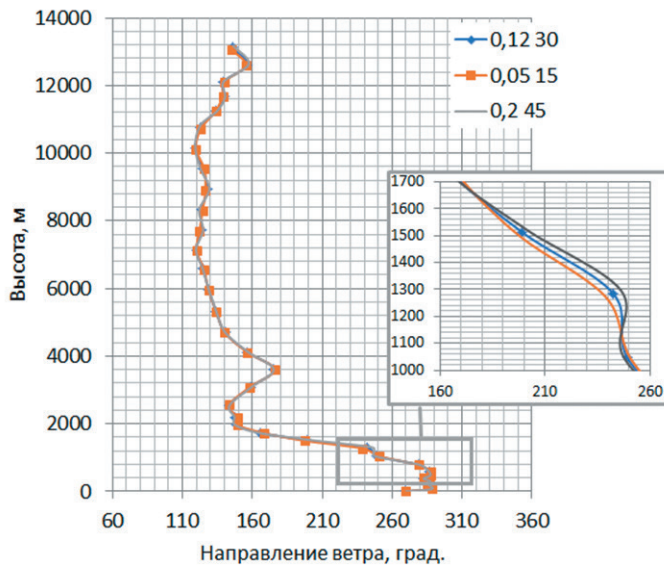


Рис. 6. Сопоставление восстановленных профилей направления ветра по данным РЛС АВК-1 (погрешности $0,2^\circ$; $0,2^\circ$; 45 м), МАРЛ-А (погрешности $0,12^\circ$; $0,12^\circ$; 30 м) и «Вектор» (погрешности $0,05^\circ$; $0,05^\circ$; 15 м).

Fig. 6. The reconstructed wind direction profile according to AVK-1 radar data (errors 0.2° ; 0.2° ; 45 m), MARL-A (errors 0.12° ; 0.12° ; 30 m) and «Vector» (errors 0.05° ; 0.05° ; 15 m).

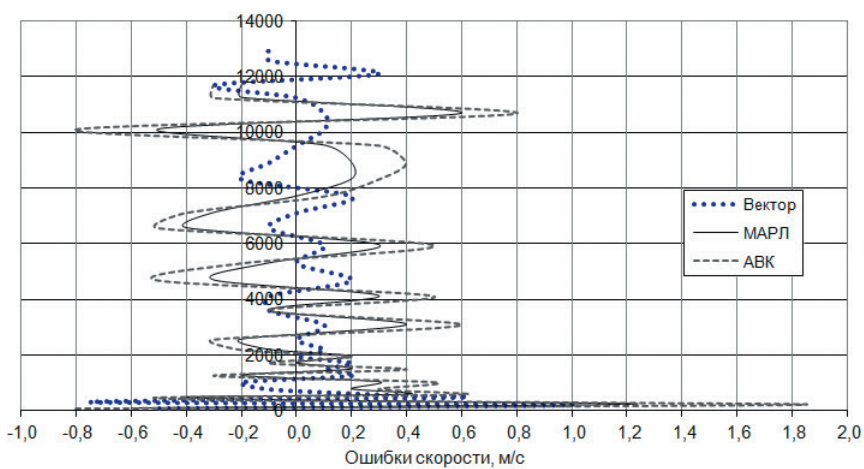


Рис. 7. Профиль средних значений ошибок определения скорости ветра для РЛС АВК-1, МАРЛ-А и «Вектор».

Fig. 7. Profile of average wind speed errors for AVK-1, MARL-A and «Vector» radars.

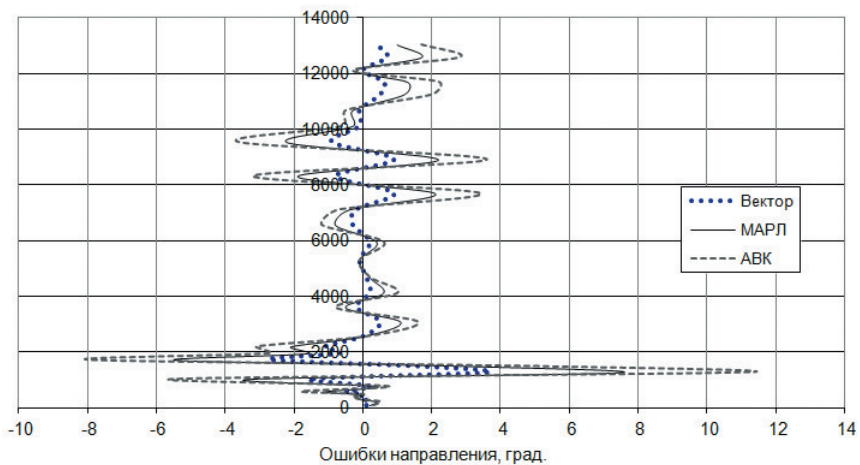


Рис. 8. Профиль средних значений ошибок определения направления ветра для РЛС АВК-1, МАРЛ-А и «Вектор».

Fig. 8. Profile of average values of wind direction errors for AVK-1, MARL-A and «Vector» radars.

Заключение

Проведенные расчеты СКО скорости и направления ветра на реальных аэрологических данных зондирования атмосферы с заданными погрешностями определения пространственных координат радиозонда позволили определить потенциальные возможности систем зондирования атмосферы по точности измерений. Достоверность полученных результатов обусловлена выбором «типичного» профиля скорости ветра для теплого сезона на станции Воейково. Предложенная методика нахождения «типичного» профиля в данный конкретный сезон и в данном месте основана на корреляционном анализе результатов радиозондирования.

Численное моделирование показало, что погрешность измерения наклонной дальности в большей степени влияет на точность восстановления скорости ветра, а погрешность измерения угловых координат определяет точность направления ветра.

Наибольшие абсолютные погрешности скорости и направления ветра наблюдаются в нижнем слое атмосферы, т.е. при небольших углах подъема антенны РЛС. Это может быть вызвано сильным боковым ветром в момент запуска, что, вследствие узкой диаграммы направленности антенны РЛС, может приводить к срывам автосопровождения зонда по угловым координатам. Так, в летнее время при использовании РЛС «Вектор» ошибка по скорости ветра может составить до 9 %, по направлению — $3,8^\circ$. С увеличением высоты при той же точности восстановления относительная погрешность нахождения скорости ветра будет увеличиваться, поскольку растет скорость ветра. При значительных удалениях до радиозонда увеличение погрешности определения высоты подъема зонда обусловлено ограниченной точностью измерения угловых координат.

Среди рассматриваемых в настоящей работе типов аэрологических радиолокаторов система «Вектор» заметно превзошла РЛС АВК-1 и МАРЛ-А по точности определения вертикальных профилей скорости и направления ветра. АВК-1, МАРЛ-А считаются устаревшими, хотя по-прежнему используются на сети. В настоящее время происходит внедрение современной системы аэрологического зондирования ПОЛЮС, основанной на навигационном способе сопровождения радиозонда. Комплексование радиолокационной и радионавигационной информации и усовершенствование методики обработки данных радиозондирования должно повысить точность определения пространственных координат радиозонда, сократить время поиска его сигналов, тем самым повысив достоверность получаемой метеорологической информации.

Список литературы

1. Калмыков В. М., Ермилов Д. В., Соловьев С. И., Белов Д. Б. Методика оценки точности измерений параметров ветра беззондовым метеокомплексом // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 11. Ч. 2. С. 396—401.
2. Самородский М. В., Искоркин, Д. В., Быстрицкий, Ю. К. Метод определения профиля вертикального ветра. Модель движения шара-пилота // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 6. С. 249—265.

3. Болелов Э. А. Метеорологическое обеспечение полетов гражданской авиации: проблемы и пути их решения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21. № 5. С. 117—129. doi.org/10.26467/2079-0619-2018-21-5-117—129.
4. Иванов В. Э., Фридзон М. Б., Ессяк С. П. Радиозондирование атмосферы. Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств / под ред. В. Э. Иванова. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 596 с.
5. Болелов Э. А., Ермошенко Ю. М., Фридзон М. Б. Повышение надежности системы радиозондирования атмосферы за счет комплексирования методов сопровождения радиозонда в полете // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 222. С. 114—119.
6. Киселёв В. Н., Кузнецов А. Д. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы). СПб.: РГГМУ, 2004. 428 с.
7. Раменская, А. В. Метод Монте-Карло и инструментальные средства его реализации: методические указания / А. В. Раменская, К. В. Пивоварова; Оренбургский гос. ун-т. Оренбург: ОГУ, 2018. 58 с.
8. Box G. E. P., Muller Mervin E. A Note on the generation of random normal deviates // Annals of Mathematical Statistics. 1958. Vol. 29. P. 610—611. doi:10.1214 / aoms / 1177706645, JSTOR: 2237361.

References

1. Kalmykov V. M., Ermilov D. V., Soloviev S. I., Belov D. B. Method for estimating the accuracy of measurements of wind parameters by a probeless meteorological complex. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskkiye nauki = News of TulGU. Technical science*. 2016; 11(2): (396—401). (In Russ.).
2. Samorodsky M. V., Iskorkin D. V., Bystritsky Yu. K. Method for determining the vertical wind profile. The model of the motion of the pilot ball. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskkiye nauki = News of TulGU. Technical science*. 2018; (6): (249—265). (In Russ.).
3. Bolelov E. A. Meteorological support of civil aviation flights: problems and ways to solve them. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA = Scientific Bulletin of MSTU GA*. 2018; 21(5):(117—129). (In Russ.). <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2018-21-5-117-129>.
4. Ivanov V. E., Fridzon M. B., Essyak S. P. *Radiozondirovaniye atmosfery. Tekhnicheskkiye i metrologicheskkiye aspekty razrabotki i primeneniya radiozondovykh izmeritel'nykh sredstv = Radio sounding of the atmosphere. Technical and metrological aspects of the development and application of radiosonde measuring instruments*. Yekaterinburg, 2004: 596 p. (In Russ.).
5. Bolelov E. A., Ermoshenko Yu. M., Fridzon M. B. Improving the reliability of the atmospheric radio sounding system by combining the methods of tracking the radiosonde in flight. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA = Scientific Bulletin of MSTU GA*. 2015;2:(114—119). (In Russ.).
6. Kiselev V. N., Kuznetsov A. D., Kiselev V. N., Kuznetsov A.D. *Metody zondirovaniya okruzhayushchey sredy (atmosfera) = Methods for sounding the environment (atmosphere)*. St. Petersburg: RGGMU, 2004: 428 p. (In Russ.).
7. Ramenskaya A. V. *Metod Monte-Karlo i instrumental'nyye sredstva yego realizatsii : metodicheskkiye ukazaniya = Monte Carlo method and tools for its implementation: guidelines*. Orenburg: OGU, 2018: 8 p. (In Russ.).
8. Box G. E. P., Muller Mervin E. A Note on the generation of random normal deviates. *Annals of Mathematical Statistics*. 1958; 29(2):610—611. doi: 10.1214/aoms/ 1177706645, JSTOR: 2237361.

Информация об авторах

Анатолий Дмитриевич Кузнецов, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры экспериментальной физики атмосферы метеорологического факультета РГГМУ, kuznetsov1946@inbox.ru.

Татьяна Евгеньевна Симакина, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы метеорологического факультета РГГМУ, tatiana.simakina@gmail.com.

Светлана Викторовна Крюкова, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы метеорологического факультета РГГМУ, krukos@rambler.ru.

Андрей Геннадьевич Саенко, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы метеорологического факультета РГГМУ, amkamc@mail.ru.

Information about authors

Anatoly Dmitrievich Kuznetsov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, professor of Department of Experimental Atmospheric Physics of the Meteorological Faculty, The Russian State Hydrometeorological University, kuznetsov1946@inbox.ru.

Tatyana Evgenievna Simakina, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Experimental Atmospheric Physics of the Meteorological Faculty, The Russian State Hydrometeorological University, tatiana.simakina@gmail.com.

Svetlana Viktorovna Kryukova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Experimental Atmospheric Physics of the Meteorological Faculty, The Russian State Hydrometeorological University, krukos@rambler.ru.

Andrey Gennadievich Saenko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Experimental Atmospheric Physics of the Meteorological Faculty, The Russian State Hydrometeorological University, amkamc@mail.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 23.04.2023

Принята к печати после доработки 22.07.2023

The article was received on 23.04.2023

The article was accepted after revision on 22.07.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 420—431.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(72): 420—431.

Научная статья
УДК 551.524.3
doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-420-431

Особенности межгодовой изменчивости приповерхностной температуры воздуха Северного и Южного полушарий по данным архива HadCRUT5

Светлана Владимировна Морозова, Елена Александровна Полянская, Мария Александровна Алимпиева

Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия, swetwl@yandex.ru

Аннотация. На основе статистического анализа рядов аномалий приземной температуры воздуха в Северном и Южном полушариях выделены временные интервалы, характеризующиеся однонаправленной тенденцией изменения температуры — естественные климатические периоды. Показано, что время их наступления в полушариях не всегда совпадает. Также различны скорости роста/падения температуры внутри идентичных естественных климатических периодов. Изменчивость температур статистически значимо различается при переходе от одного естественного климатического периода к другому в Южном полушарии. В Северном полушарии статистическая значимость в изменчивости температур обнаружилась при переходе от первой фазы глобального потепления к периоду относительного похолодания и от периода относительного похолодания ко второй фазе глобального потепления.

Ключевые слова: глобальное потепление, средние температуры полушария, природно-климатические периоды, изменчивость температуры, фазы глобального потепления.

Для цитирования: Морозова С. В., Полянская Е. А., Алимпиева М. А. Особенности межгодовой изменчивости приповерхностной температуры воздуха Северного и Южного полушарий по данным архива HadCRUT5 // Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 420—431. doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-420-431.

Original article

Peculiarities of interannual variability of near-surface air temperature in the Northern and Southern Hemispheres according to HadCRUT5 archive data

Svetlana V. Morozova, Elena A. Polyanskaya, Maria A. Alimpieva

Saratov State University, Saratov, Russia, swetwl@yandex.ru

Summary. The article presents a statistical analysis of the series of surface temperature anomalies in the Northern and Southern hemispheres. The correlation between the temperatures of the hemispheres is

high and amounts to 0.903 ± 0.005 . The rise in temperatures in the Northern Hemisphere is greater than in the Southern Hemisphere. Temperature variability is greater in the Northern Hemisphere. In the course of near-surface air temperature, long periods are distinguished during which temperature changes are uniform. Such periods are called natural climatic periods of the state of the earth's climate system. In both hemispheres, identical natural climatic periods are distinguished. These periods are called: 1) the period before the beginning of the first phase of global warming, 2) the first phase of global warming, 3) the period of relative cooling, 4) the second phase of global warming. In the time of onset of natural climatic periods in the North and South is different. The first phase of global warming started earlier in the Northern Hemisphere, the second phase of global warming started earlier in the Southern Hemisphere. Statistical characteristics were calculated for each phase and a trend analysis was carried out. Intraproduct temperature variability showed statistical significance during the transition from one natural climatic period to another in the Northern Hemisphere. In the Southern Hemisphere, temperature variability showed statistical significance only during the transition from the period of relative cooling to the second phase of global warming. In the Northern Hemisphere, temperatures rise during all natural climatic periods except for the period of relative cooling. In the Southern Hemisphere, temperatures drop before the first phase of global warming and during a period of relative cooling. In both hemispheres, the fastest increase in temperatures is observed in the second phase of global warming. During the period of relative cooling, the temperature dropped more strongly in the Northern Hemisphere. Temperature changes in the Northern Hemisphere turned out to be statistically significant during the transition from the first phase of global warming to the period of relative cooling and from the period of relative cooling to the second phase of global warming. In the Southern Hemisphere, the differences in the means turned out to be statistically significant during the transition from one natural climatic period to another.

Keywords: global warming, average hemispheric temperatures, climatic periods, temperature variability, statistical characteristics.

For citation: Morozova S. V., Polyanskaya E. A., Alimpieva M. A. Peculiarities of interannual variability of near-surface air temperature in the Northern and Southern Hemispheres according to HadCRUT5 archive data. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(72): 420—431 (In Russ). doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-420-431.

Введение

В оценочных докладах ИРСС [1, 2], а также во многих статьях и монографиях, например в [3—5], обсуждаются закономерности о межгодовой изменчивости температуры воздуха у земной поверхности в Северном и Южном полушариях. В монографии Г. В. Груза и Э. Я. Раньковой [4] анализируются наблюдаемые изменения климата и дается оценка их ожидаемых изменений на основе анализа приземной температуры воздуха на территории России. В монографии Б. Г. Шерстюкова [5] излагаются результаты анализа изменения современного климата на основе данных о температуре воздуха по глобальной сети метеорологических станций, а также предлагается статистическая модель климата для прогноза изменения температуры на ближайшие двадцать лет.

Известно, что изменения температуры представляют собой случайные колебания с трендовой составляющей. Для наблюдающихся периодов роста и падения температуры воздуха в научной литературе закрепились определенные названия — малый ледниковый период в Европе, первая и вторая фазы (волны) глобального потепления, между которыми имел место относительно небольшой период стабилизации температуры, проявившийся как относительное похолодание [1, 2, 5, 6]. Иногда этот промежуток называется паузой в глобальном потеплении [2]. С. В. Морозова предложила называть промежутки, выделяемые по временных

аномалиям средней полушарной температуры воздуха, естественными климатическими периодами (ЕКП) состояния земной климатической системы (ЗКС) [7—9]. Таким образом, ЕКП — это довольно продолжительные по времени интервалы, в которые температура воздуха характеризуется определенной (рост, падение, практически не меняющейся) тенденцией. Для Северного полушария дается физическое и статистическое обоснование выделения естественных климатических периодов состояния ЗКС и их границ [7—9]. Отметим, что впервые термин «естественный климатический период» (ЕКП) был введен в 1994 г. в работе [10] относительно климатических изменений, выделяемых по колебаниям уровня Каспийского моря.

В настоящем исследовании ставилась задача установить, выделяются ли аналогичные естественные климатические периоды в Южном полушарии по аналогии с Северным. В связи с этим целью настоящей работы стало сравнение статистических характеристик изменения приповерхностной температуры воздуха в Северном и Южном полушариях, оценка синхронности наступления естественных климатических периодов в обоих полушариях, а также оценка скорости роста/падения температуры внутри однотипных климатических интервалов.

Материалы и методы исследования

Необходимые для исследования ряды аномалий приповерхностной температуры воздуха Северного и Южного полушарий были взяты с сайта <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/> [11]. Материалы этого сайта, поддерживаемые совместно отделом климатических исследований Университета Восточной Англии и Hadley-центром, являются общепризнанными наравне с массивами Национального климатического центра США (www.cru.uea.ac.uk) и Института космических исследований США (<http://data.giss.nasa.gov/gistemp>). Безусловно, данные этих центров не являются идеальными. Например, Б. Г. Шерстюковым [12] показано, что для территории России модель HadCM3 занижает температуру января и июля, причем январские температуры занижаются на 3—8 °С и более.

Основные погрешности связаны с пространственной неоднородностью данных, ошибками наблюдений, сложностями получения информации из труднодоступных районов, недостаточной разработанностью методик компиляции наземных и спутниковых данных [13—16]. В этих работах содержатся сведения о методике обработки данных в процессе создания массивов, анализируются источники неоднородности, приводятся оценки погрешностей. Например, в публикации [16] описывается способ корректировки данных модели HadCM3 на основе дисперсий и указывается, что тенденции, проявляющиеся в ходе температуры, намного превышают неопределенность, имеющуюся в массивах данных. Авторы этих и подобных публикаций утверждают, что эти массивы вполне можно использовать для исследования изменений глобального климата.

Авторами настоящей статьи использовался массив данных HadCRUT5. Он представляет собой среднемесячные аномалии приповерхностной температуры по отношению к периоду 1961—1990 гг. на регулярной сетке 5° широты и

5° долготы. В публикации [17] описывается эта версия и указывается, что по сравнению с версией HadCRUT4 улучшено качество информации о температуре воздуха над океанической поверхностью и в Арктическом бассейне. На сайте (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data//temperature/>) отмечается, что в построении пространственной модели данных HadCRUT5 не используются подстроечные сетки, а применяется гауссовский процесс с простой ковариационной структурой. Считается, что такой способ более продуктивен в устранении неопределенностей /погрешностей в значениях температуры, особенно над водной поверхностью.

Для временных рядов температуры рассчитывались основные статистические характеристики — средние, дисперсии, средние квадратические отклонения. К исходным рядам применялся корреляционный анализ и тренд-анализ. Для оценки статистической значимости изменений использовались критерии Стьюдента и Фишера [18—20]. Уровень значимости выбран 0,05 ($\alpha = 0,05$). Исследование выполнено только для средних годовых температур воздуха. Временной промежуток составлял 1880—2022 гг. Авторами статьи использовался не весь имеющийся на сайте [11] временной ряд температур, а только с 1880 года. Это связано с тем, что степень охвата территории данными до 1880 года составляет менее половины, после 1880 года — уже превышает 70 %.

Результаты исследования

Анализ результатов исследования начнем с оценки тесноты линейной связи между рядами аномалий приповерхностной температуры воздуха Северного и Южного полушарий. Коэффициент корреляции между этими рядами составляет $0,903 \pm 0,005$, что подтверждает тесную связь между приземными температурами воздуха полушарий.

На рис. 1 представлено изменение годовых аномалий приповерхностной температуры воздуха Северного и Южного полушарий, их скользящие 11-летние средние и аппроксимация этих изменений линейным трендом.

Как видно из рис. 1, средние полушарные температуры растут, причем скорость их роста в Северном полушарии несколько выше, чем в Южном полушарии. Величины трендов равны $0,006$ °C/год в Северном полушарии и $0,005$ °C/год в Южном. В Северном полушарии ошибка модели $0,847$ °C, $R^2 = 0,740$; в Южном полушарии — $0,575$ °C, $R^2 = 0,806$. В ходе температуры воздуха выделяются довольно продолжительные периоды, в течение которых изменения температуры являются относительно однородными. Причем эти периоды проявляются почти синхронно в обоих полушариях. Синхронность изменений, вполне возможно, может быть связана с каким-то фактором (факторами), влияющим однонаправленно на температуру полушарий и, следовательно, глобальную температуру. Можно предположить, что этот фактор (факторы) имеет естественную природу. Заметим, что сведения о естественной природе колебаний температуры содержатся во многих публикациях, например, в [21—24].

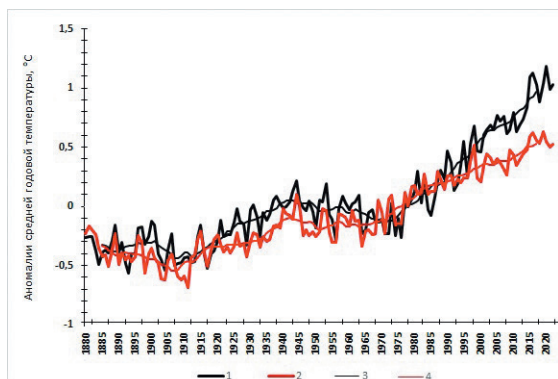


Рис. 1. Временной ход годовых аномалий приповерхностной температуры воздуха Северного (1) и Южного (2) полушарий, построенный по данным архива HadCRUT5 [11]. Жирными линиями показаны 11-летние скользящие средние для СП (3) и ЮП (4).

Fig. 1. Time course of surface air temperature anomalies in the Northern (1) and Southern (2) hemispheres, built according to the HadCRUT5 archive data [11]. Bold lines show 11-year moving averages for NH (3) and SH (4).

Как и следовало ожидать, изменчивость температур в Северном полушарии существенно выше, чем в Южном. Дисперсии температуры равны соответственно $0,148\text{ }^{\circ}\text{C}^2$ и $0,095\text{ }^{\circ}\text{C}^2$. Сравнение дисперсий температур полушарий с помощью критерия Фишера показало статистическую значимость ($F_{\text{ф}} > F_{\text{кр}}$) различий в изменчивости температур воздуха полушарий. Выявленные отличия объясняются, очевидно, свойствами подстилающей поверхности, а именно различием доли материков и океанов в них.

Отметим, что на рис. 1 можно проследить увеличивающиеся со временем различия значений приповерхностных температур воздуха в Северном и Южном полушариях. В начале исследуемого периода, примерно до середины нулевых годов XX века, разница между температурами полушарий была гораздо меньше, чем в конце рассматриваемого временного промежутка. Различие между температурами полушарий наиболее сильно возрастает с середины 90-х годов XX века. В данный период более высокая скорость роста температуры Северного полушария в определенной степени может быть связана с неоднородностью исходных данных, являющейся следствием расположения большинства метеостанций в промышленных районах с наибольшей плотностью искусственно вырабатываемой энергии. Тепловые купола над промышленными районами способствуют завышению приземных температур воздуха. Другим возможным фактором более высокой скорости роста температуры в Северном полушарии является процесс потепления Арктики [10, 25—27], оценки которого в связи с более полным освещением спутниковыми данными ее безлюдных территорий стали надежными [17].

В табл. 1 приведены оценки трендов средних годовых приземных температур воздуха Северного и Южного полушарий.

Таблица 1

Оценка линейных трендов для Северного и Южного полушарий с 1880—2022 гг.
Assessing the Significance of linear trends for the Northern and Southern Hemispheres
from 1880—2022

Полушарие	Коэффициенты модели		Коэффициент детерминации	Ошибка модели, °С
	a , °С/год	b , °С		
Северное	0,009	-0,560	0,860	0,847
Южное	0,007	0,900	0,806	0,575

Примечание: коэффициенты модели a и b в табл. 1 являются параметрами линейного уравнения $y = ax + b$.

Как видно из табл. 1, степень соответствия линейной модели реальному процессу в Северном полушарии составляет 86 %, в Южном — 81 %. Ошибка модели составляет 0,85 °С в Северном полушарии и 0,58 °С в Южном.

Авторами статьи выделены следующие естественные климатические периоды в ходе приповерхностной температуры воздуха Северного полушария:

- 1) период между окончанием ледникового периода в начале XIX века и началом развития первой волны глобального потепления — 1880—1903 гг.;
- 2) первая фаза глобального потепления — 1904—1945 гг.;
- 3) фаза относительного похолодания — 1946—1975 гг.;
- 4) вторая фаза глобального потепления — 1976—2022 гг.

Южного полушария:

- 1) период перед началом развития первой волны глобального потепления — 1880—1911 гг.;
- 2) первая фаза глобального потепления — 1912—1943 гг.;
- 3) фаза относительного похолодания — 1944—1964 гг.;
- 4) вторая фаза глобального потепления — 1965—2022 гг.

Укажем, что подобные периоды выделялись разными авторами и ранее. Например, В. Н. Малинин и С. М. Гордеева [28] выделили два идентичных интервала потепления для Северного и Южного полушарий: 1880—1940 гг. и с 1976 г., которые разделены периодом относительного похолодания (1941—1975 гг.), более выраженного в Северном полушарии. Г. В. Груза и Э. Я. Ранькова [4] выделили в глобальном потеплении три интервала — потепление 1910—1945 гг., слабое похолодание 1946—1975 гг. и наиболее интенсивное потепление после 1976 года. Б. Г. Шерстюков [5] также указывает, что глобальное потепление имеет две фазы: первая — с 1910 по 1945 гг., вторая — с середины 70-х годов XX века, что соответствует Заявлению ВМО о состоянии глобального климата (http://www.wmo.ch/web/wcp_prog/htm).

Авторы настоящей статьи в выделении ЕКП придерживались дат, приведенных в работах [4, 5], и «привязывания» к экстремумам во временном ходе параметра, выделяемых графически в соответствии с рекомендациями [29]. На рис. 2 и рис. 3 представлены изменения приповерхностных температур воздуха Северного и Южного полушарий для естественных климатических периодов состояния земной климатической системы. В Северном полушарии (рис. 2) температуры росли

в первую и вторую фазы глобального потепления, понижались в период относительного похолодания. Их слабый рост отмечался и перед развитием первой фазы глобального потепления. Отметим, что скорость роста температур во вторую фазу глобального потепления была почти в полтора раза больше, чем в первую.

В Южном полушарии (рис. 3) угловые коэффициенты трендов от одного ЕКП к другому меняют знак. Температуры понижались перед началом развития первой фазы глобального потепления и в период относительного похолодания, в первую и вторую фазы потепления температуры росли. Как и в Северном полушарии скорость роста температур во вторую фазу потепления также выше, чем в первую.

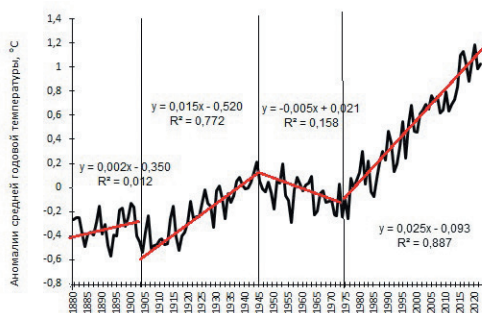


Рис. 2. Изменение средних годовых аномалий приземной температуры воздуха в Северном полушарии для естественных климатических периодов (по данным архива HadCRUT5 [11]).

Fig. 2. Change in the average annual anomalies of surface air temperature for the Northern Hemisphere, divided into natural climatic periods (according to the HadCRUT5 archive data [11]).

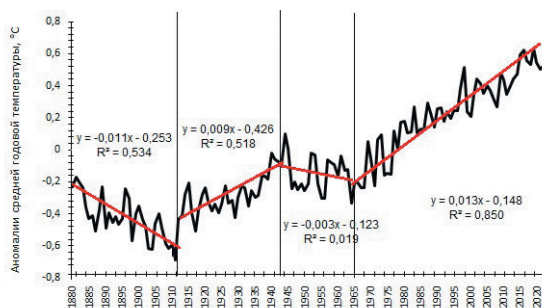


Рис. 3. Изменение средних годовых аномалий приземной температуры воздуха в Южном полушарии для естественных климатических периодов (по данным архива HadCRUT5 [11]).

Fig. 3. Change in the average annual anomalies of the surface air temperature for the Southern Hemisphere, divided into natural climatic periods of the state of the ECS (built according to the HadCRUT5 archive data [11]).

Самая высокая скорость роста температуры в обоих полушариях отмечается во вторую фазу глобального потепления. Укажем, что первая фаза глобального потепления начала развиваться в Северном полушарии раньше, чем в Южном. Вторая фаза глобального потепления, наоборот, примерно на десятилетие раньше начала развиваться в Южном полушарии.

В табл. 2 приведены статистические оценки изменения температуры воздуха полушарий для ЕКП состояния земной климатической системы.

Таблица 2

Статистические характеристики
приповерхностной температуры воздуха для отдельных ЕКП
Statistical characteristics of near-surface air temperature for individual NCP

Полушарие	Период, гг.	X_{cp} , °C	A , °C	σ , °C	As	Ex	Доверительные интервалы X_{cp} , °C
Северное	1880—1903	-0,33	0,98	0,12	-0,02	-1,15	[-0,39; -0,27]
	1904—1945	-0,20	0,69	0,19	-0,01	-1,15	[-0,28; -0,16]
	1946—1975	-0,06	0,94	0,12	-0,17	-0,49	[-0,11; -0,01]
	1976—2022	0,51	0,48	0,36	-0,03	-0,86	[0,40; 0,62]
Южное	1880—1911	-0,43	0,25	0,13	0,09	-0,58	[-0,47; -0,39]
	1912—1943	-0,28	0,37	0,11	0,41	-0,18	[-0,34; -0,22]
	1944—1964	0,13	0,43	0,12	0,04	-1,15	[-0,20; -0,10]
	1965—2022	0,23	0,49	0,24	-0,40	-0,55	[0,26; 0,37]

Примечание: A — амплитуда, σ — среднее квадратическое отклонение, As — коэффициент асимметрии, Ex — коэффициент эксцесса.

Как видно из табл. 2, наибольший размах колебаний температуры наблюдается в Северном полушарии. В Южном полушарии размах колебаний увеличивается от периода к периоду. В Северном полушарии такой закономерности не обнаруживается. Статистически значимые изменения средних от одного ЕКП к другому подтверждается доверительными интервалами.

Тестирование внутрипериодных дисперсий с помощью критерия Фишера показало статистическую значимость изменений в Северном полушарии при переходе от одного ЕКП к другому. Для Южного полушария получено, что статистически значимое расхождение между дисперсиями имеет место только при переходе от периода относительного похолодания (пауза) ко второй фазе глобального.

Заключение

В результате выполненного исследования можно сформулировать следующие выводы.

1. В Северном и Южном полушариях выделяются аналогичные естественные климатические периоды состояния земной климатической системы, но их проявления имеют свои особенности в каждом из полушарий.

2. Время наступления идентичных естественных климатических периодов в Северном и Южном полушариях не всегда совпадает. Первая фаза глобального

потепления в Северном полушарии начала развиваться раньше, чем в Южном. Вторая фаза потепления начала развиваться раньше в Южном полушарии, чем в Северном.

3. Наибольшая скорость роста температур и в Северном, и в Южном полушариях характерна для второй фазы глобального потепления.

4. В период относительного похолодания температура Северного полушария понижалась быстрее, чем в Южном.

5. Выявлены статистически значимые различия средних температур Северного и Южного полушарий при переходе от одного естественного климатического периода к другому.

Список литературы

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2022. 676 с.
2. IPCC 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. doi: 10.1017/9781009325844.
3. Переведенцев Ю. П. Теория Климата. Казань: Казанский государственный университет, 2009. 504 с.
4. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012. 194 с.
5. Шерстюков Б. Г. Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. Обнинск: Изд-во ВНИИГМИ-МЦД, 2008. 246 с.
6. Морозова С. В. Вопросы изменения климата. Саратов: изд-во Саратовского университета, 2011. 98 с.
7. Морозова С. В. Роль планетарных объектов циркуляции в глобальных климатических процессах. Саратов: изд-во Саратовского университета, 2019. 132 с.
8. Морозова С. В., Полянская Е. А., Алимбиева М. А. Особенности проявления глобальных климатических тенденций на юго-востоке Русской равнины // Гидрометеорология и образование. 2021. № 4. С. 20—30.
9. Morozova S. V., Polyanskaya E. A., Kononova N. K. et al. Peculiarities of the global climate tendencies in the south-east Russian plains / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Volume 381. <https://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/381/1>.
10. Малинин В. Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб.: РГГМИ, 1994. 160 с.
11. Ряды аномалий приповерхностной температуры воздуха [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/> (дата обращения: 20.02.2023).
12. Шерстюков Б. Г. Оценка точности физико-математических моделей ECHAM4, HadCM3 и CGCM2 по данным на территории России // Труды ГУ ВНИИГМИ-МЦД. 2010. Вып. 175. С. 3—19.
13. Hansen J, Ruedy R, Sato M, and Lo K. Global surface temperature change // Rev. Geophys., 2010. 48. RG4004. P. 1-29. doi:10.1029/2010RG000345.
14. Jones P. D., Lister D. H., Osborn T. J., Harpham C., et al. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010 // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2012. V. 117. Issue D5. doi: 10.1029/97RG02282.
15. Rahmstorf S., Foster G., Cahill N. Global temperature evolution: recent trends and some pitfalls // Environmental Research Letters. 2017. V. 12. No 5. P. 054001. doi 10.1088/1748-9326.
16. Brohan P., Kennedy J.J., I. Harris I. et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850 // Journal of Geophysical research. 2006. V. 111. D12106. doi:10.1029/2005JD006548.

17. Morice P., Colin P., John J. Kennedy, et al. An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 data set // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2021. V. 126. No 3. doi: 10.1029/2019JD032361.
18. Сикан А. В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2007. 279 с.
19. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1972. 368 с.
20. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Издание 2, испр. и доп. СПб.: РГГМУ, 2020. 424 с.
21. Логинов В. Ф., Микуцки В. С., Бровка Ю. А. Изменение скорости современного потепления климата в различные месяцы года и их возможные причины // *Гидрометеорология и образование*. 2023. № 1. С. 6—42.
22. Малинин В. Н., Гордеева С. М., Наумов Л. М. Влагосодержание атмосферы как климатообразующий фактор // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 3. С. 243—351.
23. Шерстюков Б. Г. Колебательная система климата, резонансы, дальние связи, прогнозы. Обнинск.: Изд-во ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2021. 222 с.
24. Шерстюков Б. Г. Глобальное потепление и его возможные причины // *Гидрометеорология и экология*. 2023. № 70. С. 7—37. doi: 10.33933/2713-3001-2023-70-7-37.
25. Иванов В. В. Современные изменения гидрометеорологических условий в Северном Ледовитом океане, связанные с сокращением морского ледяного покрова // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 64. С. 407—434. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-407-434.
26. Алексеев Г. В. Потепление климата Арктики: расхождение между глобальными моделями климата и наблюдениями и возможные причины // *Гидрометеорология и экология*. 2023. № 71. С. 207—230. doi: 10.33933/2713-3001-2023-71-207-230.
27. Малинин В. Н., Вайновский П. А. К сравнению характеристик межгодовой изменчивости площади морского льда Северного и Южного полушарий // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2019. № 57. С. 77—90. doi: 10.33933/2074-2762-2019-57-77-90.
28. Малинин В. Н., Гордеева С. М. О современных изменениях глобальной температуры воздуха // *Общество. Среда. Развитие*. 2011. № 2. С. 215—221.

References

1. Tretiy otsenochnyy доклад ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. = Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Moscow: Rosgidromet, 2022: 676 p. (In Russ.).
2. IPCC 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lössche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press, Cambridge, 2022: 3056 p. doi: 10.1017/9781009325844.
3. Perevedentsev Yu.P. *Teoriya Klimata = Climate Theory*. Kazan': Kazanskiy gosudarstvennyy universitet, 2009: 504 p. (In Russ.).
4. Gruza G. V., Ran'kova E. YA. *Nablyudayemyye i ozhidayemyye izmeneniya klimata Rossii: temperatura vozdukhа = Observed and expected climate changes in Russia: air temperature*. Obninsk: FGBU «VNIIGMI-MTSD», 2012: 194 p. (In Russ.).
5. Sherstyukov B. G. *Regional'nyye i sezonnyye zakonomernosti izmeneniy sovremennogo klimata = Regional and seasonal patterns of modern climate change*. Obninsk, Izd-vo VNIIGMI-MTSD, 2008: 246 p. (In Russ.).
6. Morozova S. V. *Voprosy izmeneniya klimata = Climate change issues*. Saratov: izd-vo Saratovskogo universiteta, 2011: 98 p. (In Russ.).
7. Morozova S. V. *Rol' planetarnykh ob'yektov tsirkulyatsii v global'nykh klimaticheskikh protsessakh = The role of planetary circulation objects in global climatic processes*. Saratov: izd-vo Saratovskogo universiteta, 2019: 132 p. (In Russ.).

8. Morozova S. V., Polyanskaya E. A., Alimpieva M. A. Features of the manifestation of global climatic trends in the southeast of the Russian Plain. *Gidrometeorologiya i obrazovaniye = Hydrometeorology and Education*. 2021;(4):(20—30). (In Russ.).
9. Morozova S. V., Polyanskaya E. A., Kononova N. K. et al. Peculiarities of the global climate tendencies in the south-east Russian plains / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Volume 381. <https://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/381/1>.
10. Malinin V. N. *Problema prognoza urovnya Kaspiyskogo moraya = The problem of forecasting the level of the Caspian Sea*. St. Petersburg: RGGMI, 1994: 160 p. (In Russ.).
11. Ryady anomalii pri poverkhnostnoy temperatury vozdukh. Available at: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/> (accessed on: 20.02.2023).
12. Sherstyukov B. G. Otsenka tochnosti fiziko-matematicheskikh modeley ECHAM4, HadCM3 i CGCM2 po dannym na territorii Rossii // *Trudy GU VNIIGMI-MTSD = Proceedings of VNIIGMI-WDC*. 2010;(175):(3—19). (In Russ.).
13. Hansen J., Ruedy R., Sato M., and Lo K. *Global surface temperature change*. *Rev. Geophys.*, 2010. 48(RG4004). doi:10.1029/2010RG000345
14. Jones P. D., Lister D. H. Osborn T. J., Harpham C. et al. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012. 117(D5). doi: 10.1029/97RG02282.
15. Rahmstorf S., Foster G., Cahill N. Global temperature evolution: recent trends and some pitfalls. *Environmental Research Letters*, 2017. 12(5): 054001. doi 10.1088/1748-9326.
16. Brohan P., Kennedy J. J., Harris I. et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850. *Journal of Geophysical research*, 2006. 111(D12106). doi:10.1029/2005JD006548
17. Morice P., Colin P., John J. Kennedy, et al. An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 data set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021. 126, 3. doi: 10.1029/2019JD032361.
18. Sikan A. V. *Metody statisticheskoy obrabotki gidrometeorologicheskoy informatsii = Methods of statistical processing of hydrometeorological information*. St. Petersburg: RGGMU, 2007: 279 p. (In Russ.).
19. Gmurman V. Ye. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika = Probability Theory and Mathematical Statistics*. Moscow: Vysshaya shkola, 1972: 368 p. (In Russ.).
20. Malinin V. N. *Statisticheskiye metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii = Statistical Methods for Analyzing Hydrometeorological Information*. 2nd edition, revised and expanded. St. Petersburg: RGGMU, 2020: 424 p. (In Russ.).
21. Loginov V. F., Mikutsky V. S., Brovka Yu. A. Changes in the rate of modern climate warming in different months of the year and their possible causes. *Gidrometeorologiya i obrazovaniye = Hydrometeorology and education*. 2023; (1):(6—42). (In Russ.).
22. Malinin V. N., Gordeeva S. M., Naumov L. M. Moisture content of the atmosphere as a climate-forming factor. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmos = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2018; 15(3):(243—351). (In Russ.).
23. Sherstyukov B. G. *Kolebatel'naya sistema klimata, rezonansy, dal'niye svyazi, prognozy = Vibrational climate system, resonances, long-distance communications, forecasts*. Obninsk: Izd-vo VNIIGMI-MTSD, 2021: 222 p. (In Russ.).
24. Sherstyukov B. G. Global warming and its possible causes. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2023; (70):(7—37). doi: 10.33933/2713-3001-2023-70-7-37. (In Russ.).
25. Ivanov V. V. Sovremennyye izmeneniya gidrometeorologicheskikh usloviy v Severnom Ledovitom okeane, svyazannykh s boleznyami morskogo ledyanogo pokrova. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2021; (64):(407—434). doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-407-434. (In Russ.).
26. Alekseev G. V. Climate warming in the Arctic: discrepancies between global climate emissions and observations and possible causes. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2023; (71):(207—230). doi: 10.33933/2713-3001-2023-71-207-230. (In Russ.).
27. Malinin V. N., Vainovsky P. A. On the comparison of the characteristics of the interannual variability of the area of sea ice in the Northern and Southern Hemispheres. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo*

gos. gidrometeorolog. un-ta = Proceedings of the Russian state hydrometeorological university. 2019; (57):(77—90). doi: 10.33933/2074-2762-2019-57-77-90. (In Russ.).

28. Malinin V. N., Gordeeva S. M. About modern changes in global air temperature. *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye = Society. Wednesday. Development. 2011; (2):(215—221). (In Russ.).*

Информация об авторах

Светлана Владимировна Морозова, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии и климатологии, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского», swetwl@yandex.ru.

Елена Александровна Полянская, кандидат географических наук, профессор кафедры метеорологии и климатологии, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского», kafmeteo@mail.ru.

Мария Александровна Алимпиева, ассистент кафедры метеорологии и климатологии, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского», alimpiewa@rambler.ru.

Information about authors

Swetlana V. Morozova, Cand. Sc. (Geogr.), associate professor of the meteorology and climatology, Saratov State University, Saratov, swetwl@yandex.ru.

Elena A. Polyanskaya, Cand. Sc. (Geogr.), professor of the meteorology and climatology, Saratov State University, Saratov, kafmeteo@mail.ru.

Maria A. Alimpieva, assistant of the meteorology and climatology, Saratov State University, Saratov, alimpiewa@rambler.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 23.04.2023

Принята к печати после доработки 11.08.2023

The article was received on 23.04.2023

The article was accepted after revision on 11.08.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 432—448
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(72):432—448

Научная статья
УДК [551.508.85:551.576:551.594]:551.509.313
doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-432-448

Прогноз развития грозовых облаков с использованием ансамблевого подхода на базе моделей малой размерности

*Марина Леонидовна Торопова, Николай Евгеньевич Веремей,
Юрий Павлович Михайловский, Александр Борисович Куров,
Андрей Александрович Синькевич*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия,
marina-toropova@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты апробации двух методик ансамблевого прогноза характеристик грозовых облаков на территории Северо-Западного региона РФ. Для прогноза применялись две версии модели конвективной облачности малой размерности, разработанные в ФГБУ «ГГО». Выполнена верификация результатов моделирования по данным радиолокационных наблюдений для двух контролируемых параметров: высоты верхней границы облаков и значений максимальной радиолокационной отражаемости. Показано, что использование возмущений начальных данных позволяет получать распределения моделируемых значений, улучшая результаты детерминированного прогноза. Это расширяет возможности краткосрочного прогноза конвекции и связанных с ней опасных явлений.

Ключевые слова: гроза, облака, численное моделирование, верификация, радиолокация.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант № 22-27-20031) и Санкт-Петербургского научного фонда (Соглашение № 58/2022 от 15 апреля 2022 г.).

Для цитирования: Торопова М. Л., Веремей Н. Е., Михайловский Ю. П., Куров А. Б., Синькевич А. А. Прогноз развития грозовых облаков с использованием ансамблевого подхода на базе моделей малой размерности // Гидрометеорология и экология. 2023. № 72. С. 432—448. doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-432-448.

Original article

Forecast of the development of thunderstorms using the ensemble approach on the basis of low-dimensional models

*Marina L. Toropova, Nikolai E. Veremei, Yurii P. Mikhailovskii,
Alexander B. Kurov, Andrei A. Sin'kevich*

Voeikov Main geophysical observatory, St. Petersburg, Russia, marina-toropova@mail.ru

Summary. The results of approbation of two methods of ensemble forecast of the characteristics of thunderclouds on the territory of the North-West region of the Russian Federation are presented. For the

© Торопова М. Л., Веремей Н. Е., Михайловский Ю. П., Куров А. Б., Синькевич А. А., 2023

forecast, two versions of the low-dimensional convective cloudiness model developed at the Federal State Budgetary Institution “GGO” were used. Each version used its own method for introducing perturbations into the initial data. In the first technique, disturbances are introduced at all levels of the vertical distribution of temperature and humidity. In the second method, only surface values were perturbed. The maximum characteristics of clouds are obtained when disturbances are introduced, as well as the time to reach maximum values. It is shown that the highest sensitivity to disturbances in the initial data is shown by the velocities of updrafts, the microphysical characteristics of precipitation, and, as a consequence, the maximum radar reflectivity in the cloud. Due to the fact that the accounting for microphysical processes is parameterized differently in the models used, different distributions of microphysical characteristics are obtained. The obtained values of the deviations of the ensemble calculations from the control showed that the introduction of perturbations into the initial data (according to the methods used) are comparable in magnitude with the deviations obtained as a result of the perturbation of the model parameters. Verification of the simulation results based on radar observations for two controlled parameters: the height of the cloud top and the values of the maximum radar reflectivity was carried out. It is shown that the values from the simulation results generally correspond to the results of radar observations. It is shown that the use of initial data perturbations makes it possible to obtain distributions of simulated values, improving the results of a deterministic forecast. This expands the possibilities of short-term forecasting of convection and related hazards.

Keywords: thunderstorm, numerical modeling, verification, weather radar.

Acknowledgments: The work was prepared with the financial support of the Russian Science Foundation (Proj. No. 22-27-20031) and the Government of St. Petersburg (Agreement No. 58/2022 dated April 15, 2022).

For citation: Toropova M. L., Veremei N. E., Mikhailovskii Y. P., Kurov A. B., Sin'kevich A. A. Forecast of the development of thunderstorms using the ensemble approach on the basis of low-dimensional models. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(72): 432—448 (In Russ). doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-432-448.

Введение

Прогноз опасных конвективных явлений и прогноз облачности в целом является одной из самых сложных задач численного прогноза погоды. Одним из традиционных способов прогноза опасных явлений (ОЯ) конвективного характера по-прежнему является анализ температурно-влажностной стратификации атмосферы. Существует большое количество методов оценки статической неустойчивости атмосферы при помощи теории всплывающей частицы или метода слоя [1—3]. Зачастую для таких оценок используются региональные модели, так как данные радиозондовых наблюдений нерегулярны по пространству и измерения проводятся всего два раза в сутки [4, 5].

Следует также отметить развитие подходов к использованию численных моделей для решения задач прогноза ОЯ и характеристик облачности. Одно из направлений развития — отказ от детерминированного подхода в пользу других вариантов, среди которых — использование нейронных сетей [6—8], стохастических методов [9, 10] и ансамблевого подхода [11—14]. Ансамблевый подход заключается в получении не единственного результата прогноза, а их множества. Это множество (ансамбль) генерируется на основании внесения возмущений в начальные данные или параметры численной модели [15—18].

При выполнении подобных работ особую актуальность представляет использование моделей малых размерностей совместно с региональными моделями или отдельно от них [19]. В отличие от трехмерных моделей конвективных облаков

[20—26] эти модели требуют довольно малых вычислительных ресурсов и могут применяться в оперативном режиме.

Задачей настоящего исследования является изучение возможности применения двух версий модели малой размерности конвективной облачности, разработанной в ГГО в рамках ансамблевого прогноза с целью прогноза характеристик грозовых облаков. В данной работе исследование выполнено для случая грозы в Санкт-Петербурге 01 августа 2021 года. Для верификации результатов моделирования используются данные радиолокационных наблюдений.

Численная модель конвективных облаков

В настоящем исследовании использовались две версии модели конвективной облачности малой размерности, разработанные в ФГБУ «ГГО» при участии авторов настоящей статьи [27]. Результаты моделирования представляют собой характеристики облака (атмосферы), изменяющиеся по высоте и осредненные по радиусу облака, поэтому модель считается полуторамерной.

Выбор модели малой размерности обусловлен несколькими причинами. Модель является уникальным инструментом исследования грозовых облаков наряду с другими моделями конвективной облачности. По обеим разработанным в ГГО моделям продолжают работы в рамках различных проектов, в том числе работы по улучшению (доработке) самих моделей и методик их применения. Так, данная работа, помимо исследования возможности прогноза характеристик облаков, также имела целью апробацию новой методики верификации результатов моделирования. Важной особенностью модели малой размерности является то, что она позволяет получать детальные характеристики развития конвективных облаков и, в отличие от трехмерной модели, не требует больших вычислительных мощностей. Фактор оперативности явился решающим условием выбора класса модели для использования в рамках ансамблевого подхода.

Облако в модели представлено в виде гидродинамического течения с несущей паровоздушной фазой и взвешенными в ней частицами. Радиус облака входит в систему уравнений модели в качестве изменяемого параметра, который зафиксирован в данных расчетах.

Для описания микрофизических процессов используется параметрический подход. Представлены четыре фракции гидрометеоров: облачные и дождевые капли, а также ледяные кристаллы и градины. Начальные условия подразумевают равенство нулю содержания гидрометеоров на всех уровнях, а также вертикальных скоростей. Начальными данными для расчетов являются результаты радиозондирования атмосферы. На эти данные накладываются возмущения, которые инициируют развитие конвекции [27]. Исследования чувствительности модели к начальным условиям и параметрам показало, что на характеристики развивающегося облака значительное влияние оказывают задаваемый радиус облака, величина начального перегрева и влагосодержание атмосферы [27]. Система уравнений модели имеет вид:

Уравнение движения:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{R} \tilde{u} (\tilde{w} - w) + \frac{2}{R} \alpha^2 |w| (\bar{w} - w) + \frac{g(T_v - \bar{T}_v)}{\bar{T}_v} - g(Q_c + Q_R + Q_I). \quad (1)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{2}{R} \tilde{u} + \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a w) = 0. \quad (2)$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -w \left(\frac{\partial T}{\partial z} - \gamma_a \right) - \frac{2}{R} \tilde{u} (\tilde{T} - T) + \frac{2}{R} \alpha^2 |w| (\bar{T} - T) + F_T. \quad (3)$$

Уравнение баланса отношения смеси водяного пара:

$$\frac{\partial Q_v}{\partial t} = -w \frac{\partial Q_v}{\partial z} - \frac{2}{R} \tilde{u} (\tilde{Q}_v - Q_v) + \frac{2}{R} \alpha^2 |w| (\bar{Q}_v - Q_v) + F_v. \quad (4)$$

Уравнение баланса отношения смеси облачных капель:

$$\frac{\partial Q_c}{\partial t} = -w \frac{\partial Q_c}{\partial z} - \frac{2}{R} \tilde{u} (\tilde{Q}_c - Q_c) + \frac{2}{R} \alpha^2 |w| (\bar{Q}_c - Q_c) + F_c. \quad (5)$$

Уравнение баланса отношения смеси дождевых капель:

$$\frac{\partial Q_R}{\partial t} = -(w - v_R) \frac{\partial Q_R}{\partial z} - \frac{2}{R} \tilde{u} (\tilde{Q}_R - Q_R) + \frac{2}{R} \alpha^2 |w| (\bar{Q}_R - Q_R) + \frac{Q_R}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a v_R) + F_R. \quad (6)$$

Уравнение баланса отношения смеси ледяных частиц:

$$\frac{\partial Q_I}{\partial t} = -(w - v_I) \frac{\partial Q_I}{\partial z} - \frac{2}{R} \tilde{u} (\tilde{Q}_I - Q_I) + \frac{2}{R} \alpha^2 |w| (\bar{Q}_I - Q_I) + \frac{Q_I}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a v_I) + F_I. \quad (7)$$

Использованы следующие обозначения: g — ускорение свободного падения; p — давление воздуха; Q_c — отношение смеси облачных капель; Q_R — отношение смеси дождевых капель; Q_I — отношение смеси градин; Q_v — отношение смеси водяного пара; T — температура среды; T_v — виртуальная температура среды; t — время; u — горизонтальная составляющая скорости движения среды; v_R — скорость седиментации дождевых капель; v_I — скорость седиментации ледяных частиц; w — вертикальная составляющая скорости движения среды; z — вертикальная координата; α — коэффициент турбулентного вовлечения; γ_a — сухоадиабатический градиент температуры; ρ_a — плотность среды. Обозначения величин, относящихся к внешней по отношению к цилиндру радиуса R области и к его границе, снабжены горизонтальной чертой и тильдой соответственно.

Система дополнена уравнением состояния идеального газа, уравнением гидростатики, формулами для насыщающего значения отношения смеси водяного пара относительно плоской поверхности воды и льда. Значения источников-стоков субстанций в уравнениях (3)—(7) зависят от интенсивности

микрофизических процессов (фазовых переходов и обмена влагой между различными фракциями).

Граничные условия предполагают постоянство значений температуры, отношения смеси облачных, дождевых капель и ледяных частиц на верхней и нижней границах цилиндра и равенство соответствующим значениям параметров в окружающей среде [27].

Первая версия модели (V1) включает в себя учет процессов электризации, в то время как вторая (V2, физико-статистическая) использует эмпирические критерии грозоопасности. В моделях полностью различна параметризация микрофизических процессов (в частности, во второй отсутствует учет наличия мелких облачных кристаллов). Кроме того, первая модель также содержит аэрозольный блок и ряд других инструментов для изучения физических процессов развития конвекции. Вторая версия модели, дополненная эмпирическими параметрами, послужила базой для ранее разработанного метода специального краткосрочного прогноза развития конвективной облачности и связанных с ней опасных явлений. Метод прогноза прошел независимое тестирование и показал высокую оправдываемость [27]. Модель также может использоваться для диагностических исследований, например, совместно с данными реанализа для получения изменений климатических характеристик развития опасных явлений конвективного характера на территории России [19, 27].

Методика ансамблевого прогноза

Ансамблевый подход в настоящем исследовании был реализован за счет внесения случайных возмущений в начальные данные.

В качестве обоснования величины вносимых возмущений приняты два фактора: ошибки радиозондовых наблюдений и учет неоднородности подстилающей поверхности. С одной стороны, в зависимости от используемых технических средств радиозондирования, ошибки изменения температуры и влажности могут варьироваться в достаточно широких пределах (в частности, превышать 1 °С для температуры) [28—30]. С другой стороны, в случае использования не данных непосредственных измерений, а результатов расчетов глобальных моделей атмосферы и региональных моделей прогноза погоды, также наблюдаются ошибки [31]. Исходя из приведенных в литературе оценок точности измерения температуры и влажности, были выбраны оценки возмущений, вносимых на всех уровнях радиозондирования.

Приземные значения температуры и влажности в значительной степени определяются микроклиматическими особенностями конкретной территории и в радиусе репрезентативности радиозонда (150 км) варьируются в достаточно широких пределах, точные оценки которых получить не представляется возможным, поэтому были установлены предельные величины вносимых возмущений в значения температуры и влажности у земли, которые могут быть уточнены в ходе дальнейших исследований.

Для внесения возмущений в начальные данные была разработана отдельная программа их подготовки. Для каждого уровня радиозондирования задавались

предельные значения возмущений (см. табл. 1). В заданных пределах варьировалась нормально распределенная случайная величина, которая и вносилась в качестве возмущения (отдельно на каждом уровне). Авторами были разработаны и апробированы две методики, отличающиеся уровнями внесения возмущений. Методика 1 применялась совместно с первой версией модели (V1), методика 2 — со второй (V2). Для выполнения ансамблевых расчетов по каждой из методик были сформированы 30 новых вертикальных распределений температуры и влажности.

Методика 1 включала в себя внесение возмущений начальных данных на всех уровнях высоты. Приземные значения варьировались только в сторону увеличения, в то время как значения на высотах изменялись как в большую, так и в меньшую сторону. Физическим обоснованием положительных возмущений приземных данных является огромное значение для развития конвекции неравномерного прогрева разнородной подстилающей поверхности. Возмущения на высотах обусловлены, главным образом, ошибками радиозондовых наблюдений [28—30]. Величина возмущений значений температуры и относительной влажности приведена в табл. 1.

Таблица 1

Величина возмущений, вносимых в начальные данные
The magnitude of perturbations introduced into the initial data

	Температура	Относительная влажность
Приземные значения (Методика 1, Методика 2)	$\leq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\leq 15\text{ \%}$
Значения на высотах (Методика 1)	$\leq 1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\leq 15 \text{ \%}$

Методика 2 включала внесение возмущений только в приземные значения. Величина приземных возмущений та же, что и в методике 1. Для каждой из методик (версий модели) была выполнена серия из 30 расчетов с внесенными возмущениями и контрольный расчет (без возмущений). Анализировались максимальные значения характеристик облаков, достигаемые в каждом расчете, а также время их достижения. Некоторые результаты отдельно для каждой из методик и версий были ранее опубликованы в [32].

Для исследования было выбрано 1 августа 2021 года, когда в Санкт-Петербурге и окрестностях наблюдались грозы. В качестве начальных данных моделирования использовались данные аэрологических наблюдений на станции Воейково (26075) 01.08.2021 15:00 Мск.

Верификация результатов моделирования проводилась по данным радиолокационных наблюдений ДМРЛ-С (пос. Воейково). Выбранные контролируемые параметры: высота верхней границы облаков и максимальная радиолокационная отражаемость в облаке. Отражаемость приведена в дБZ. Это внесистемная безразмерная величина, используемая при оценке коэффициента отражаемости и определяемая по формуле (8):

$$\text{дБЗ} = 10 \times \lg \left(\frac{Z}{Z_0} \right), \quad (8)$$

где $Z_0 = 1 \text{ мм}^6/\text{м}^3$.

Так как результаты моделирования представляют собой максимальные значения за весь период развития облака, в то время как данные радиолокационных наблюдений содержат характеристики облаков для каждого обзора, то радиолокационные данные были подвергнуты обработке. Для каждого радиолокационного обзора были выбраны максимальные значения контролируемых параметров. Именно эти значения (за период 12:00 – 00:00 Мск) были использованы для верификации. Таким образом, ансамбль максимальных значений характеристик облаков по данным моделирования сопоставлялся с ансамблем максимальных за каждый обзор значений характеристик облаков по данным наблюдений.

Максимальные характеристики облаков

Были рассмотрены максимальные характеристики основных параметров грозовых облаков: высота верхней границы облака ($H_{\text{ТОР}}$), максимальные скорости восходящего потока в облаке (W), максимальная радиолокационная отражаемость ($Z_{\text{МАХ}}$), а также микрофизические характеристики облаков — водность облачных (Q_C) и дождевых (Q_R) капель, ледность кристаллических осадков (Q_I). Также рассматривалась динамика развития облака, т.е. время достижения максимальных значений указанных характеристик.

Результаты моделирования показывают, что в случае использования различных версий модели и методик внесения возмущений получаются отличные по своим статистическим характеристикам ансамбли параметров облаков. Зависимость величины максимального значения параметров от модельного времени их достижения приведена на рис. 1. Статистические характеристики полученных ансамблей результатов приведены в табл. 2.

Размах (разность между максимальным и минимальным значением) значений высоты верхней границы облаков в V2 составил 1,0 км, в то время как в V1 аналогичное значение равно 1,6 км. Медианные значения высоты верхней границы V1 / V2 были достаточно близки и составили 10,2 / 10,6 км. При этом важно отметить, что по V1 получено большее различие медианы ансамблевых расчетов и значения $H_{\text{ТОР}}$ в контрольном расчете, хотя полученные различия являются статистически значимыми, будь они получены при анализе данных радиолокационных наблюдений. В зависимости от удаления облака от радиолокатора их можно было бы охарактеризовать как достаточно малые.

В значительно более широких пределах варьировались значения W — размах достигал 22 м/с. При этом медианы составили 33,7 / 39,4 м/с. Такие значения соответствуют общим представлениям о вертикальной скорости в грозовых облаках. В V1 скорость восходящих потоков увеличивалась в два и более раз относительно контрольного расчета. В V2 увеличение чуть менее значительное по величине. Следует отметить, что в физико-статистической версии модели в целом наблюдался больший разброс значений, чем в полной версии.

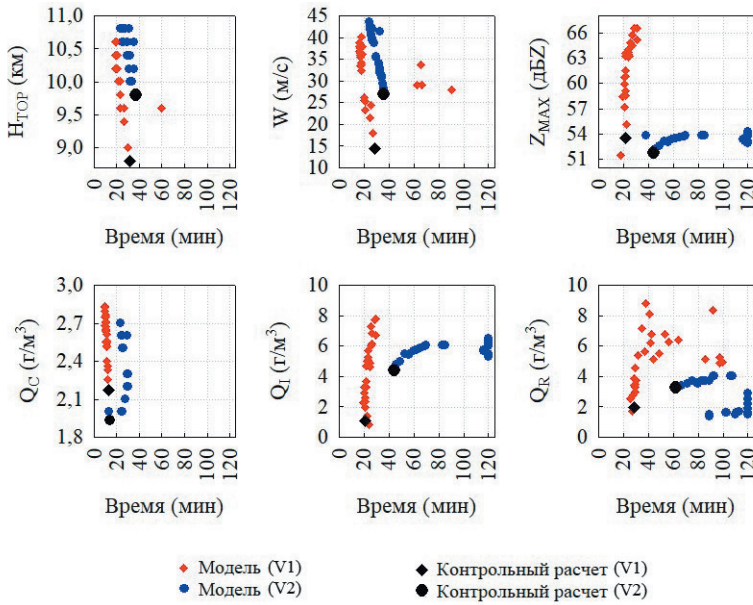


Рис. 1. Результаты ансамблевых расчетов.

Основные характеристики грозовых облаков: максимальные значения характеристик облака при внесении возмущений и время их достижения.

Fig. 1 The results of ensemble calculations.

The main characteristics of thunderclouds: the maximum values when disturbances are introduced and the time to reach them.

Таблица 2

Статистические характеристики результатов численного моделирования
Statistical characteristics of the results of numerical simulations

	Модель	Среднее	Медиана	Мини-мум	Макси-мум	Ст. откл.	Размах	Контрольный расчет
H_{TOP} (км)	V1	10,1	10,2	9,2	10,6	0,41	1,6	8,8
	V2	10,4	10,6	9,8	10,8	0,32	1,0	9,8
W (м/с)	V1	31,9	33,7	18,0	40,1	6,04	22,1	14,5
	V2	37,3	39,4	28,3	43,7	4,77	15,4	26,9
Z_{MAX} (дБZ)	V1	62,1	63,2	51,4	66,5	3,68	15,1	53,5
	V2	53,5	53,5	52,2	54,3	0,45	2,0	51,8
Q_C (г/м ³)	V1	2,6	2,6	2,2	2,8	0,18	0,7	2,2
	V2	2,4	2,5	2,0	2,7	0,24	0,7	2,0
Q_R (г/м ³)	V1	5,1	5,1	1,7	8,8	1,84	7,1	2,0
	V2	2,6	2,4	1,4	4,0	1,04	2,6	3,3
Q_I (г/м ³)	V1	4,7	5,0	0,8	7,7	2,02	6,9	1,1
	V2	5,8	5,7	4,8	6,5	0,39	1,7	4,4

Большие различия наблюдаются в полученных оценках максимальной радиолокационной отражаемости в облаке, что хорошо видно на рис. 1. В контрольных расчетах две версии модели показали достаточно близкий результат: 53,5 / 51,8 дБZ для V1 / V2 соответственно. Однако при внесении возмущений медианные значения распределений составили 63,2 / 53,5 дБZ. Важной особенностью является то, что размах значений максимальной радиолокационной отражаемости в полной версии модели составил 15,1 дБZ и оказался в разы больше соответствующей величины в физико-статистической версии модели — 2,0 дБZ. Такие отличия, очевидно, связаны как с разными алгоритмами расчетов радиолокационной отражаемости (в модели V2 используется усовершенствованный алгоритм), так и собственно с параметризацией микрофизических процессов.

Микрофизические характеристики облаков, полученные в ансамблевых и контрольных расчетах, явно демонстрируют различия в описании соответствующих процессов. Водность облачных капель оказывается наиболее стабильной по величине характеристикой. Медианы распределений были равны 2,6 / 2,5 г/м³, размах значений для обеих версий модели составил 0,7. При этом отдельные значения при внесении возмущений не превышали 2,8 и 2,7 г/м³ в V1 и V2 соответственно, т.е. в целом были близки к медианным значениям. Таким образом, значения водности облачных капель оказались достаточно близки в обеих версиях модели и внесение возмущений привело к увеличению не более чем на 35 % по сравнению с контрольным расчетом.

Медианы ансамблевых расчетов водности дождевых капель Q_R равны 5,1 / 2,4 г/м³, т.е. различаются в 2 раза. В случае использования полной версии модели при внесении возмущений водность дождевых капель в большей части случаев увеличивается относительно контрольного расчета. В отдельных случаях значения возрастают более чем в 4 раза. В тоже время при использовании модели V2 величина Q_R в большинстве случаев при внесении возмущений, наоборот, уменьшается. В отдельных случаях уменьшение происходит более чем в 2 раза.

Ледность кристаллических осадков в целом ведет себя аналогично максимальной радиолокационной отражаемости. Значения Q_I увеличиваются относительно результатов контрольных расчетов в обеих версиях модели. В V1 увеличение наиболее значительно, медиана составляет 5,0 г/м³ при значении контрольного расчета 1,1 г/м³. В отдельных случаях происходило увеличение Q_I в 7 раз или, наоборот, незначительное уменьшение. При использовании V2 медиана ансамблевых расчетов не столь сильно отличается от значений контрольного расчета — они равны 5,7 и 4,4 г/м³ соответственно. Максимальные значения Q_I соответствуют увеличению значений контрольного расчета на 48%. Значения в целом обладают меньшей изменчивостью, что показано на рис. 1 и в табл. 1.

Ранее выполненные оценки влияния начальных условий на результаты расчетов [27] показали, что при фиксированном радиусе облака (5 км) и варьировании перегрева у подстилающей поверхности до +5 °C максимальные характеристики облака изменяются следующим образом: скорость восходящих потоков возрастает в 3 раза (на 16 м/с), высота верхней границы увеличивается на 3,2 км,

суммарная водность в облаке увеличивается на 3 г/м^3 (в полной версии модели). Эти значения вполне сопоставимы с полученными величинами отклонений при внесении возмущений в данные радиозондирования.

Динамика развития облаков

Результаты ансамблевых расчетов показали значительные различия не только в максимальных значениях параметров облаков, но и во времени их достижения, т.е. внесение возмущений в начальные данные в определенной степени влияет на динамику развития облака. Время здесь и далее приводится в модельных минутах. За 0 мин принято начало расчета. Стоит учитывать, что не проводилось работ по сопоставлению модельного и реального времени развития облака, хотя полученные ранее результаты показывают, что получаемые значения близки к характерным при протекании данных процессов в атмосфере. Результаты расчетов проиллюстрированы на рис. 2.

Показано, что при внесении возмущений в начальные данные (и в V1, и в V2) достижение максимального значения высоты верхней границы происходит быстрее, чем в контрольном расчете. Медиана времени достижения максимума составила 21 / 30 мин для V1 / V2 соответственно. При этом в V1 размах значений (разность максимальной и минимальной величины с учетом выбросов и экстремальных значений) составляет 41 мин, в то время как в V2 — всего 13 мин.

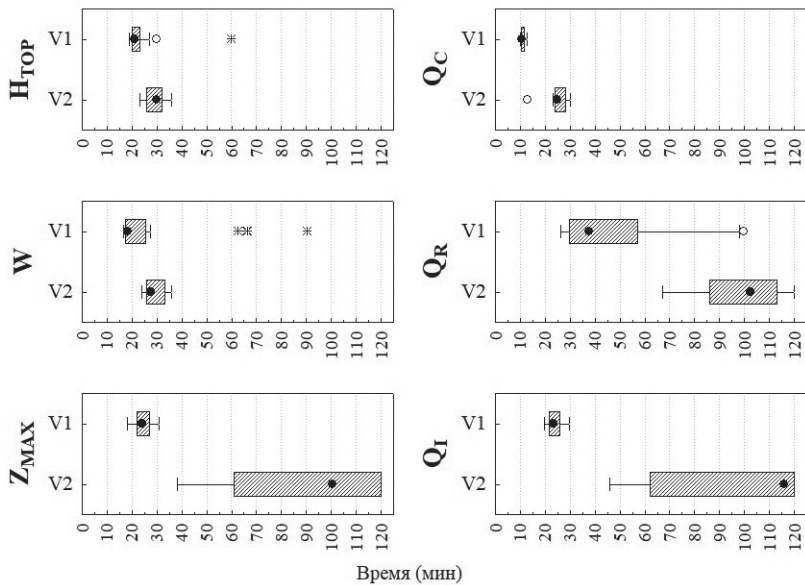


Рис. 2. Результаты ансамблевых расчетов. Время достижения максимальных значений параметров облаков.

Fig. 2 The results of ensemble calculations. The time to reach maximum values.

Похожая картина наблюдается для динамики восходящих потоков в облаке. Максимальное значение W в полной версии модели (V1) достигается в интервале от 17 до 91 мин (размах 74 мин). В то время как при использовании V2 размах составляет 12 мин, максимум достигается в течение 24—36 мин со времени начала расчета. Надо отметить несколько выбросов значений в V1, что говорит о формировании отдельных облаков с сильно отличной динамикой развития.

Обратная картина наблюдается для времени достижения Z_{MAX} в облаке. Медианы составили 24 / 101 мин. В полной версии модели максимум приходился на период 18—31 мин (размах 13 мин), в то время как в физико-статистической версии аналогичный период составляет 38—120 мин (размах — 82 мин). Здесь важно отметить, что 120 мин — время окончания расчета в V2, т.е. в V2 образуется более долгоживущее облако, развитие которого продолжается на момент завершения вычислений. Как уже было отмечено ранее, разброс значений Z_{MAX} в этой версии очень мал. Динамика Z_{MAX} , как и ее значения, определяются динамикой микрофизических характеристик облаков (главным образом — дождевых капель).

Водность облачных капель хотя и различается для V1 и V2, но в обеих моделях максимум достигается к 30 мин расчета. Медианы при этом составляют 11 / 25 мин. В полной версии модели размах значений меньше (3 мин), чем в упрощенной версии (17 мин).

Существенные отличия наблюдаются в динамике развития микрофизических характеристик осадков в облаке. Водность дождевых капель в облаке достигает максимума в период 26—100 мин (V1) и 67—120 мин (V2). Отметим, что 100 мин в V1 — это время окончания расчета. Таким образом, по результатам использования обеих версий модели при внесении возмущений образуются долгоживущие облака, которые продолжают существовать на момент окончания вычислений. Медианы времени достижения максимума составляют 38 / 103 мин (при учете всех значений). При исключении из анализа значений, соответствующих времени окончания расчета, медианы принимают значения 38 / 92 мин. Таким образом, V2 в ансамблевых расчетах демонстрирует более длительное развитие облака по динамике Q_R .

Различия в динамике ледности кристаллических осадков еще более значительны. Медианные значения времени достижения максимума составили 24 / 116 мин. При исключении 12 случаев, когда ледность продолжала увеличиваться к моменту окончания вычислений, медиана V2 равна 75 мин. При использовании полной версии модели максимум ледности приходится на период 20—30 мин, тогда как в версии с упрощенной микрофизикой этот период значительно увеличивается (46—120 мин), выходя за пределы расчетного времени.

В работе [27] приведены оценки влияния начальных условий расчета на динамику развития облака в полной версии модели. В частности, показано, что при фиксированном радиусе облака и варьировании перегрева у подстилающей поверхности стадия зрелости (осадкообразования) может наступить на 20 мин быстрее. Эта оценка соответствует результатам преобладающего большинства расчетов с возмущениями V1 (рис. 2) для водности дождевых капель. В то же время

показано, что внесение возмущений в начальные данные расчетов могут приводить к гораздо более значительным изменениям в динамике развития облака.

Результаты верификации

Верификация результатов моделирования проводилась для двух контролируемых параметров — высоты верхней границы облаков и максимальной радиолокационной отражаемости. Результаты верификации с использованием квантильного анализа приведены на рис. 3.

По результатам моделирования H_{TOP} изменяется от 9,8 до 10,8 км (V2) и от 9,2 до 10,6 км (V1). Медианы составили 10,6 и 10,2 км соответственно. Значения H_{TOP} по данным радиолокационных наблюдений варьировались в пределах 9,4–15,0 км с медианой 11,7 км. Таким образом, значения высоты верхней границы облака по данным моделирования в целом оказались внутри интервала без выбросов по данным радиолокационных наблюдений. При этом медиана данных ДМРЛ-С превышает данные моделирования на 1,5 км. В данном случае максимальные значения H_{TOP} по данным наблюдений на несколько км превышают соответствующие значения по результатам моделирования. Важным параметром следует считать дисперсию полученных рядов. Разброс значений высоты верхней границы в V2 значительно ближе к разбросу значений данных радиолокационных наблюдений. Надо отметить, что данные наблюдений в этом случае также нуждаются в дополнительном контроле в связи с погрешностями измерения радиолокатором.

По результатам моделирования Z_{MAX} изменяется от 52,2 до 54,3 дБZ (V2) и от 51,4 до 66,5 дБZ (V1). Медианы составили 53,5 и 63,2 дБZ соответственно.

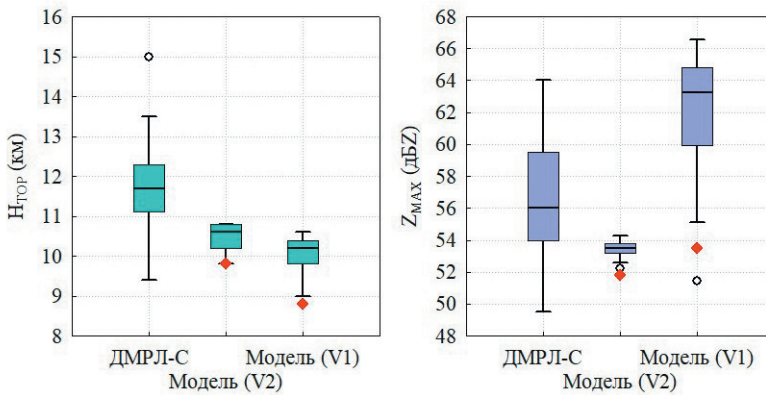


Рис. 3. Результаты верификации ансамблевых расчетов по данным радиолокационных наблюдений (ДМРЛ-С). Результаты контрольных расчетов (без возмущений) обозначены красным маркером.

Fig. 3. Verification results of ensemble calculations based on radar observations (C-band Doppler radar). The results of control calculations (without disturbances) are shown with a red marker.

Значения Z_{MAX} по данным радиолокационных наблюдений варьировались в пределах 49,5–64,0 дБZ с медианой 56,0 дБZ. Таким образом, медиана результатов второй версии модели оказывается на 2,5 дБZ меньше медианы данных наблюдений. В то время как медиана результатов расчетов с помощью первой версии наоборот на 7,2 дБZ превышает данные наблюдений. Разброс значений VI существенно ближе к результатам наблюдений. Подводя итог, данные моделирования Z_{MAX} в целом входят в интервал без выбросов по данным наблюдений.

Заключение

В данной работе оценивалась возможность использования моделей малой размерности для прогноза характеристик грозовых облаков на примере грозы в Санкт-Петербурге 01 августа 2021 года.

Выявлено, что при внесении возмущений в начальные данные характеристики грозовых облаков меняются существенным образом. Наибольшую чувствительность демонстрируют скорость восходящих потоков, максимальная радиолокационная отражаемость и микрофизические характеристики осадков (водность дождевых капель и ледность градин). Различия микрофизических характеристик облаков объясняются их разными параметризациями в версиях модели. В свою очередь водность дождевых капель и ледность кристаллических частиц осадков определяют значения радиолокационной отражаемости. При этом высота верхней границы облаков для обеих используемых версий модели менялась слабо.

Показано, что полученные отклонения от результатов контрольных расчетов при внесении возмущений в начальные данные по своему масштабу соответствуют ранее полученным результатам исследования чувствительности полной версии модели к варьированию начальных условий расчета (параметров модели).

Выполнена верификация результатов моделирования по данным радиолокационных наблюдений. Показано, что значения высоты верхней границы облаков при используемых методиках внесения возмущений в начальные данные в целом занижаются, в то время как радиолокационная отражаемость — завышается (в одной из версий модели). При этом в целом данные моделирования соответствуют данным наблюдений. Продемонстрировано, что использование ансамблевого подхода позволяет улучшить результаты прогноза.

Список литературы

1. Горбатенко В. П., Кречетова С. Ю., Беликова М. Ю., Нечепуренко О. Е. Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектро радиометра MODIS в дни с грозами, над территорией Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2015. №5. С. 10—19.
2. Губенко И. М., Рубинштейн К. Г. Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 27—38.
3. Pepler R. A. Review of Static Stability Indices and Related Thermodynamic Parameters. Illinois State Water Survey. Technical Report. 1988. 94 p.
4. Губенко И. М., Рубинштейн К. Г. Прогноз грозовой активности с помощью модели электризации кучево-дождевых облаков // Метеорология и гидрология. 2017. № 2. С. 5—19.

5. Калинин Н. А., Ветров А. Л., Связов Е. М., Попова Е. В. Изучение интенсивной конвекции в Пермском крае с помощью модели WRF // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 9. С. 21—30.
6. Brenowitz N. D., Bretherton C. S. Prognostic validation of a neural network unified physics parameterization. // *Geophysical Research Letters*. 2018. Vol. 45. P. 6289—6298. doi: 10.1029/2018GL078510.
7. Gentine P., Pritchard M., Rasp S., et al. Could machine learning break the convection parameterization deadlock? // *Geophysical Research Letters*. 2018. Vol. 45. P. 5742—5751. doi: 10.1029/2018GL078202.
8. Ukkonen P., Mäkelä A. Evaluation of machine learning classifiers for predicting deep convection. // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2019. Vol. 11. P. 1784—1802. doi: 10.1029/2018MS001561.
9. Bengtsson L. and Körnich H. Impact of a stochastic parametrization of cumulus convection, using cellular automata, in a mesoscale ensemble prediction system. // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2016. Vol. 142. P. 1150—1159. doi: 10.1002/qj.2720.
10. Shutts G. A stochastic convective backscatter scheme for use in ensemble prediction systems. // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2015. Vol. 141. P. 2602—2616. doi: 10.1002/qj.2547.
11. Barthlott C., Burton R., Kirshbaum D. et al. Initiation of deep convection at marginal instability in an ensemble of mesoscale models: a case-study from COPS. // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2011. Vol. 137. P. 118—136. doi: 10.1002/qj.707.
12. Gensini V. A., Tippett M. K. Global Ensemble Forecast System (GEFS) predictions of days 1–15 U.S. tornado and hail frequencies. // *Geophysical Research Letters*. 2019. Vol. 46. P. 2922—2930. doi: 10.1029/2018GL081724.
13. Subramanian A. C. and Palmer T. Ensemble super parameterization versus stochastic parameterization: A comparison of model uncertainty representation in tropical weather prediction. // *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2017. Vol. 9. P. 1231—1250. doi: 10.1002/2016MS000857.
14. Weyn J. A., Durran D. R., Caruana R., Cresswell-Clay N. Sub-seasonal forecasting with a large ensemble of deep-learning weather prediction models. // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2021. Vol. 13. e2021MS002502. doi: 10.1029/2021MS002502.
15. Алферов Д. Ю., Ривин Г. С. Система мезомасштабного прогноза погоды COSMO-RU: ансамблевый прогноз // *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2011. № 346. С. 5—15.
16. Астахова Е. Д. Ансамблевый среднесрочный прогноз погоды: реализация технологии на современной компьютерной базе // *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2011. № 346. С. 33—46.
17. Di Narzo A. F. and Cocchi D. A Bayesian hierarchical approach to ensemble weather forecasting. // *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*. 2010. Vol. 59. P. 405—422. doi: 10.1111/j.1467-9876.2009.00700.x.
18. Kalnay E. Historical perspective: earlier ensembles and forecasting forecast skill. // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2019. Vol. 145 (Suppl. 1). P. 25—34. doi: 10.1002/qj.3595.
19. Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Ефимов С. В. и др. Исследование ливневой и грозовой активности на территории России с использованием численной модели конвективного облака и данных реанализа. // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 1. С. 32—43.
20. Ашабоков Б. А., Шаповалов А. В., Кулиев Д. Д. и др. Численное моделирование термодинамических, микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков на стадии роста и максимального развития // *Известия Вузов. Радиофизика*. 2013. Т. 56, № 11—12. С. 900—907.
21. Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Затевахин М. А. и др. Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака. // *Труды ГГО*. 2016. № 582. С. 45—91.
22. Синькевич А. А., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е. и др. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 3. Численное моделирование эволюции облака // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 8. С. 18—28.
23. Barthe C., Molinie G., Pinty J. P. Description and first results of an explicit electrical scheme in a 3D cloud resolving model // *Atmospheric Research*. 2005. V. 76 (1–4). P. 95—113. doi: 10.1016/j.atmosres.2004.11.021
24. Bo Zhang, Bin Chen, Lihua Shi, Qiang Chen. Modeling of the Stepped Leader Initiation Process in an Altitude Triggered Lightning // *Mathematical problems in engineering*. 2016. Vol. 2016. 10 pp. doi: 10.1155/2016/9201253.

25. Scavuzzo C. M., Masuelli S., Garanti G. M., Williams E. R. A numerical study of thundercloud electrification by graupel-crystal collisions// *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103, No D12. P. 13963—13973. doi: 10.1029/97JD03734.
26. Ziegler C. L., McGorman D. R., Dye J. E., Ray R. S. A model evaluation of noninductive graupel-ice charging in the early electrification of a mountain thunderstorm// *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96, No D7. P. 12833—12855. doi: 10.1029/91JD01246.
27. Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А. Применение полуторамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков. Санкт-Петербург: Типография «Моби Дик». 2013. 220 с.
28. Алдухов О. А., Черных И. В. Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Том 1. Контроль качества и обработка данных. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД. 2013. 306 с.
29. Зайцева Н. А., Балагуров А. М., Крестьяникова Н. Н., Николаев А. В. Современное состояние и перспективы развития аэрологической сети России // *Метеорология и гидрология.* 2021. № 9. С. 5—20.
30. Хохлова А. В., Тимофеев А. А., Руденкова Т. В. Каталог аэрологических станций по архивам единого государственного фонда данных // *Труды ВНИИГМИ-МЦД.* 2020. № 187. С. 78—90.
31. Торопова, М. Л., Русин И.Н. Воспроизведение стратификации атмосферы с целью прогноза конвективных явлений при помощи мезомасштабной модели WRF-ARW // *Труды ГГО.* 2019. № 593. С. 160—176.
32. Торопова М. Л., Михайловский Ю. П., Веремей Н. Е. и др. Ансамблевый прогноз развития грозовой облачности на северо-западе ЕТР и верификация результатов моделирования // *Труды ГГО.* 2022. № 606. С. 7—31.

References

1. Gorbatenko V. P., Krechetova S. Yu., Belikova M. Yu., Nechepurenko O. E. Comparison of atmospheric instability indices recovered from radiosounding and MODIS spectroradiometer data on days with thunderstorms over the territory of Western Siberia. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology.* 2015;(5):(10—19). (In Russ.)
2. Gubenko I. M., Rubinstein K. G. Analysis of the results of calculating thunderstorm activity using atmospheric instability indices according to the WRF-ARW numerical model. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology.* 2015;(1):(27—38). (In Russ.)
3. Pepler R. A. Review of Static Stability Indices and Related Thermodynamic Parameters. *Illinois State Water Survey.* Technical Report, 1988:94 p.
4. Gubenko I. M., Rubinstein K. G. Forecast of thunderstorm activity using the model of electrification of cumulonimbus clouds. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology.* 2017; (2):(5—19). (In Russ.)
5. Kalinin N. A., Vetrov A. L., Sviyazov E. M., Popova E. V. Study of intense convection in the Perm Region using the WRF model. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology.* 2013; (9):(21—30). (In Russ.)
6. Brenowitz N. D., Bretherton C. S. Prognostic validation of a neural network unified physics parameterization. *Geophysical Research Letters.* 2018; (45):6289—6298. doi: 10.1029/2018GL078510.
7. Gentine P., Pritchard M., Rasp S., et al. Could machine learning break the convection parameterization deadlock? *Geophysical Research Letters.* 2018; (45):5742—5751. doi: 10.1029/2018GL078202.
8. Ukkonen P., Mäkelä A. Evaluation of machine learning classifiers for predicting deep convection. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems.* 2019; (11):1784—1802. doi: 10.1029/2018MS001561.
9. Bengtsson L. and Körnich H. Impact of a stochastic parametrization of cumulus convection, using cellular automata, in a mesoscale ensemble prediction system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2016; (142):1150—1159. doi: 10.1002/qj.2720.
10. Shutts G. A stochastic convective backscatter scheme for use in ensemble prediction systems. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2015; (141):2602—2616. doi: 10.1002/qj.2547.
11. Barthlott C., Burton R., Kirshbaum D., et al. Initiation of deep convection at marginal instability in an ensemble of mesoscale models: a case-study from COPS. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2011; (137):118—136. doi: 10.1002/qj.707.

12. Gensini V. A., Tippett M. K. Global Ensemble Forecast System (GEFS) predictions of days 1–15 U.S. tornado and hail frequencies. *Geophysical Research Letters*. 2019; (46):2922–2930. doi: 10.1029/2018GL081724.
13. Subramanian A. C., and Palmer T. Ensemble superparameterization versus stochastic parameterization: A comparison of model uncertainty representation in tropical weather prediction. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2017; (9):1231–1250. doi: 10.1002/2016MS000857.
14. Weyn J. A., Durran D. R., Caruana R., Cresswell-Clay N. Sub-seasonal forecasting with a large ensemble of deep-learning weather prediction models. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2021; 13:e2021MS002502. doi: 10.1029/2021MS002502.
15. Alferov D. Yu., Rivin G. S. System of mesoscale weather forecast COSMO-RU: ensemble forecast. *Trudy gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossijskoj Federacii = Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2011; (346):(5–15). (In Russ.)
16. Astakhova. E. D. Ensemble medium-term weather forecast: implementation of technology on a modern computer base. *Trudy gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossijskoj Federacii = Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2011; (346):(33–46). (In Russ.)
17. Di Narzo A. F. and Cocchi D. A Bayesian hierarchical approach to ensemble weather forecasting. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*. 2010; (59):405–422. doi: 10.1111/j.1467-9876.2009.00700.x.
18. Kalnay E. Historical perspective: earlier ensembles and forecasting forecast skill. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2019; 145(Suppl. 1):25–34. doi: 10.1002/qj.3595.
19. Veremei N. E., Dovgalyuk Yu. A., Efimov S. V. et al. Investigation of rain and thunderstorm activity on the territory of Russia using a numerical model of a convective cloud and relativistic analysis data. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2013; (1):(32–43). (In Russ.)
20. Ashabokov B. A., Shapovalov A. V., Kuliyeu D. D and others. Numerical modeling of thermodynamic, microstructural and electrical characteristics of convective clouds at the stage of growth and maximum development. *Izvestiya vuzov. Radiophysica = News of Universities. Radiophysics*. 2013; (56):11–12:(900–907). (In Russ.)
21. Veremei N. E., Dovgalyuk Yu. A., Zatevakhin M. A., Ignatiev A. A., Morozov V. N., Pastushkov R. S. Description of the basic numerical nonstationary three-dimensional model of a convective cloud. *Trudy GGO = Proceedings of the MGO*. 2016; (582):(45–91). (In Russ.)
22. Sin'kevich A. A., Dovgalyuk Yu. A., Veremei N. E., et al. Studies of thunderstorm-hail cloud development. Part 3. Numerical simulation of cloud evolution. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2017; (8):(18–28).
23. Barthe C., Molinie G., Pinty J. P. Description and first results of an explicit electrical scheme in a 3D cloud resolving model. *Atmospheric Research*. 2005; 76(1–4):95–113. doi: 10.1016/j.atmosres.2004.11.021
24. Bo Zhang, Bin Chen, Lihua Shi, Qiang Chen. Modeling of the Stepped Leader Initiation Process in an Altitude Triggered Lightning. *Mathematical problems in engineering*. 2016; 2016:10 pp. doi: 10.1155/2016/9201253.
25. Scavuzzo C. M., Masuelli S., Garanti G. M., Williams E. R. A numerical study of thundercloud electrification by graupel-crystal collisions. *J. Geophys. Res.* 1998; (103):D12:13963–13973. doi: 10.1029/97JD03734.
26. Ziegler C. L., McGorman D. R., Dye J. E., Ray R. S. A model evaluation of noninductive graupel-ice charging in the early electrification of a mountain thunderstorm. *J. Geophys. Res.* 1991; (96):D7:12833–12855. doi: 10.1029/91JD01246.
27. Dovgalyuk Yu. A., Veremei N. E., Sin'kevich A. A. *Application of a one-and-a-half-dimensional model for solving fundamental and applied problems of cloud physics*. St. Petersburg: Moby Dick Printing House. 2013: 220 pp. (In Russ.)
28. Aldukhov O. A., Chernykh I. V. Methods of analysis and interpretation of atmospheric radiosounding data. Vol. 1. *Quality control and data processing*. Obninsk: FSBI “VNIIGMI-MCD”. 2013: 306 pp. (In Russ.)

29. Zaitseva N. A., Balagurov A.M., Krestyanikova N. N., Nikolaev A.V. The current state and prospects of development of the aerological network of Russia. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2021; (9):(5—20). doi: 10.52002/0130-2906-2021-9-5-20. (In Russ.)
30. Khokhlova A. V., Timofeev A. A., Rudenkova T. V. Catalog of aerological stations in the archives of the Unified State Data Fund. *Trudy Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrometeorologicheskoy informacii - Mirovogo centra dannyh = Proceedings of the All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Center*. 2020; (187):(78—90). (In Russ.)
31. Toropova M. L., Rusin I. N. Reproducing of atmospheric stratification in order to predict convective phenomena using the WRF-ARW model. *Trudy GGO = Proceedings of MGO*. 2019; (593):(160—176).
32. Toropova M. L., Mikhailovskii Yu. P., Veremei N. E. and others. Ensemble forecast of thunderstorm cloud development in the north-west of the ETR and verification of simulation results. *Trudy GGO = Proceedings of MGO*. 2022; (606):(7—31). (In Russ.)

Информация об авторах

Марина Леонидовна Торопова, научный сотрудник Отдела геофизического мониторинга и исследований Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, marina-toropova@mail.ru.

Юрий Павлович Михайловский, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Отдела геофизического мониторинга и исследований Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, yupalych@yandex.ru.

Александр Борисович Куров, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Отдела геофизического мониторинга и исследований Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, remotesensing@mail.ru.

Андрей Александрович Синькевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник Отдела геофизического мониторинга и исследований Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, sinkevich51@mail.ru.

Николай Евгеньевич Веремей, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Отдела геофизического мониторинга и исследований Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, veremey@gmail.com.

Information about authors

Marina Leonidovna Toropova, research scientist, Department of geophysical monitoring and research of the Voeikov Main geophysical observatory, marina-toropova@mail.ru.

Nikolai Evgenievich Veremei, PhD, leading research scientist, Department of geophysical monitoring and research of the Voeikov Main geophysical observatory, yupalych@yandex.ru.

Yurii Pavlovich Mikhailovskii, PhD, leading research scientist, Department of geophysical monitoring and research of the Voeikov Main geophysical observatory, remotesensing@mail.ru.

Alexander Borisovich Kurov, PhD, senior research scientist, Department of geophysical monitoring and research of the Voeikov Main geophysical observatory, sinkevich51@mail.ru.

Andrei Alexandrovich Sin'kevich, PhD, main research scientist, Department of geophysical monitoring and research of the Voeikov Main geophysical observatory, veremey@gmail.com.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 23.04.2023

Принята к печати после доработки 07.07.2023

The article was received on 23.04.2023

The article was accepted after revision on 07.07.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 449—469.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(72): 449—469.

METEOROLOGIA. ОБЗОР

Научная статья
УДК 656.7:551.590.2
doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-449-469

Влияние космической погоды на безопасность полетов

***Анастасия Павловна Соколина¹, Ольга Васильевна Волобуева²,
Яна Викторовна Дробжева², Ирина Александровна Иванова²,
Ирина Викторовна Лаврова², Ольга Николаевна Топтунова²***

¹ Северо-Западный филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Санкт-Петербург, Россия, nst.palna@yandex.ru

² Российский государственный гидрометеорологический университет

Аннотация. В статье приведен обзор космической погоды как гелиогеофизического явления и способы донесения информации о возможной опасности до авиационных пользователей. Рассматривается влияние космической погоды на полеты воздушных судов на примере нескольких мощных солнечных вспышек, изучается влияние опасных гелиогеофизических явлений на высокочастотную связь, спутниковое позиционирование и на радиацию. Проанализирован архив консультативных сообщений о космической погоде за период сентябрь 2020—январь 2023 гг. и текущий двадцать пятый солнечный цикл.

Ключевые слова: космическая погода, авиационная метеорология, опасные гелиогеофизические явления, консультативные сообщения, геомагнитные бури, солнечные вспышки.

Для цитирования: Соколина А. П., Волобуева О. В., Дробжева Я. В., Иванова И. А., Лаврова И. В., Топтунова О. Н. Влияние космической погоды на безопасность полетов // Гидрометеорология и экология. 2023. № 72. С. 449—469. doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-449-469.

METEOROLOGY. REVIEW

Original article

Impact of space weather on flight safety

***Anastasia P. Sokolina¹, Olga V. Volobueva², Yana V. Drobzheva²,
Irina A. Ivanova², Irina V. Lavrova², Olga N. Toptunova²***

¹ North-Western branch of the FSBI «Aviamettelecom of Roshydromet», St. Petersburg, Russia, nst.palna@yandex.ru

² Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg

Summary: Space weather is a combination of various physical processes and phenomena that occur on the surface of the Sun, in interplanetary and near-Earth space, as well as in the magnetosphere, ionosphere

© Соколина А. П., Волобуева О. В., Дробжева Я. В., Иванова И. А., Лаврова И. В., Топтунова О. Н., 2023

and upper atmosphere of the Earth. Space weather disturbances interfere with the correct determination of the aircraft's position in space, can lead to a partial or complete absence of high-frequency communications, and are also harmful to the health of the crew and passengers of aircraft due to an increase in the permissible level of radiation at altitudes. On November 19, 2019, three international global centers were established: the ACFJ consortium (Australia, Canada, France, Japan), the European consortium «PECASUS» and the United States and two regional South Africa and the China-Russian Federation consortium. For the period September 2020 - January 2023, 96 advisory messages were received. Most often, messages were issued for a moderate deterioration in high-frequency communication (34%). The frequency of issuing SWX messages in the northern hemisphere (62%) is associated with high flight intensity and transpolar flights. Advisory messages were often issued for high latitudes (40%), as the most vulnerable to solar activity due to the characteristics of the Earth's magnetic field and radiation belt. The influence of the solar flare on November 3, 2021 on high-frequency communications is considered using the GIRO ionospheric model as an example. The influence of the coronal mass ejection on October 9, 2021 is also analyzed, the influence of the substorm on the neutron monitor installed in Apatity is considered, and a conclusion is made according to the data on phase and amplitude scintillations. Also, studies were carried out on the level of limiting radiation along three routes, produced at high, middle and equatorial latitudes according to the model of the Fedorov Institute of Applied Geophysics.

Keywords: space weather, aviation meteorology, dangerous heliogeophysical phenomena, advisory phenomena, geomagnetic storms, solar flares.

For citation: Sokolina A. P., Volobueva O. V., Drobzheva Y. V., Ivanova I. A., Lavrova I. V., Toptunova O. N. Impact of space weather on flight safety. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(72): 449—469 (In Russ). doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-449-469.

Введение

Космическая погода — это совокупность различных физических процессов и явлений, которые возникают на поверхности Солнца, в межпланетном и околоземном космическом пространстве, а также в магнитосфере, ионосфере и верхних слоях атмосферы Земли. Возмущения космической погоды нарушают спутниковую навигацию и мешают корректному определению местоположения самолета в пространстве, способны привести к частичному или даже полному отсутствию высокочастотной связи, а также оказывают вредоносное воздействие для на здоровье экипажа и пассажиров воздушных судов из-за повышения допустимого уровня радиации на высотах. В связи с ростом технологического прогресса и слабой освещённости данной темы актуальность работы не вызывает сомнений.

Целью работы является исследование космической погоды как опасного для авиации явления, способов ее прогнозирования и донесение информации об активности солнца до авиационных пользователей. Для решения поставленной цели были выполнены следующие задачи: создан архив консультативных сообщений о космической погоде за период сентябрь 2020 — январь 2023 гг.; проведена оценка солнечной активности за двадцать пятый солнечный цикл; исследовано влияние солнечной активности на ионосферу и высокочастотную связь, на спутниковое позиционирование систем GPS и ГЛОНАСС, на радиационную обстановку. Статья носит обзорный характер, демонстрируя влияние космической погоды на безопасность воздушных судов.

Космическая погода как опасное для авиации явление и способы ее прогнозирования

После нескольких масштабных геомагнитных бурь, повлекших за собой изменение трасс полетов воздушных судов и рост радиационной опасности

для летного экипажа, ИКАО вынесло решение о создании специализированной службы, необходимой для аэронавигации, которая бы следила за космической погодой. 19 ноября 2019 года была создана служба непрерывного мониторинга космической погоды, которая обязана предоставлять авиации консультативные сообщения о космической погоде. Всего было создано три международных глобальных центра: консорциум ACFJ (Австралия, Канада, Франция, Япония), европейский консорциум PECASUS и США. Также были созданы два региональных центра: ЮАР и консорциум Китай-Российская Федерация. Россию представляет Институт прикладной геофизики им. Е. К. Фёдорова (ИПГ) [1].

Глобальные центры космической погоды проводят дежурства, наблюдая за активностью Солнца, космическими лучами, состоянием магнитосферы и ионосферы, а также за составом высокоэнергичных частиц в атмосфере Земли. Дежурства делятся по две недели, причем один из центров выполняет функции дежурного центра — On Duty Center (ODC), а другие считаются основными и вспомогательными резервными центрами. Каждый из центров космической погоды обладает обширной сетью наземной и спутниковой аппаратуры [1, 2].

Наблюдения за солнечной активностью осуществляются с использованием разных диапазонов длин волн. Например, в видимом, ультрафиолетовом и ближнем инфракрасном диапазонах, производятся наблюдения с помощью солнечных телескопов. У них есть свои особенности: солнечные телескопы, как известно, работают в дневное время суток. За счет нагрева земной поверхности и усиления турбулентности их разрешающая способность ухудшается, поэтому оборудование окрашивают в белый цвет, как и метеорологические будки, а сами телескопы устанавливают на башнях. Также из-за высокой тепловой нагрузки в современных телескопах предусмотрены системы охлаждения [3].

Коронографы предназначены для наблюдений за солнечной короной. Наземные коронографы используют явление поляризации, чтобы получить снимок короны, спутниковые — несколько затенителей. Спектрогелиографы — приборы, используемые для монохроматического изображения Солнца, то есть на одной длине волны. Обычно данные приборы установлены на борту космических спутников [4].

Несмотря на то, что явления космической погоды могут возникнуть за короткое время, их влияние проявляется практически сразу и длится до нескольких дней. С точки зрения авиации, опасными явления считаются тогда, когда солнечная активность и/или космические лучи становятся причиной неполадок в работе систем связи, навигации, наблюдения за воздушным судном и повышением критического уровня радиации. Для международной авиационной службы центры космической погоды рассматривают только конкретные возмущения: геомагнитные и ионосферные бури, солнечные вспышки и солнечную радиацию [1, 2].

В настоящее время основными геоэффективными проявлениями космической погоды являются: солнечные радиовсплески, влияющие на работу приемных радиосредств; наведенные геоэлектрические поля, влияющие на проводные системы энергоснабжения и связи; ионизирующая радиация, влияющая на работоспособность

электронной аппаратуры и жизнедеятельность организмов; расширение верхних слоев атмосферы, ведущее к повышению температуры и плотности этих слоев и влияющее на динамику и время жизни искусственных спутников Земли; а также ионосферные возмущения, влияющие на процессы распространения и рассеяния радиоволн. При этом очевидна необходимость качественного прогноза параметров космической погоды. Известно, что Солнце является источником корпускулярного и волнового излучения. Корпускулярное излучение, достигая границы магнитосферы Земли, взаимодействует с ней, что приводит к возникновению электрических полей и токов в магнитосфере. Высыпание заряженных частиц из магнитосферы в области магнитных полюсов увеличивает электронную концентрацию в ионосфере, что приводит к усилению поглощения радиоволн, вследствие чего происходит понижение амплитуды или пропадание радиосигналов на трассах, проходящих через эти области.

Наличие солнечного ветра способно изменить размеры и форму магнитосферы, что приводит к сдвигу географической области явлений, связанных с высыпаниями частиц (полярные сияния, сильные ионосферные токи, поглощение радиоволн), от высоких широт к средним. Более 8000 авиационных полетов в год происходит над Северным полюсом, что ведет к необходимости учета влияния доз солнечной радиации на здоровье летного состава, пассажиров, а также на состояние электронной аппаратуры. Основным эффектом влияния волнового излучения от Солнца является существование ионосферы — ионизированного солнечным излучением плазменного слоя в нейтральной атмосфере Земли. Изменение электронной концентрации на различных высотах над Землей может являться одним из следствий возмущений в солнечном ветре и, следовательно, оказывать негативное влияние на распространение радиоволн.

Поскольку данный слой атмосферы ионизирован, то он обладает способностью отражать коротковолновые частоты, обеспечивая надежную радиосвязь, что важно для полетов воздушных судов. Во время геомагнитных бурь в ионосферу поступает дополнительная энергия, появляется избыточная ионизация, вызывающая деформацию слоя. Из-за этого происходят сбои в высокочастотной связи, так как радиоволны поглощаются или отражаются. Воздействие солнечной вспышки на ионосферу длится от нескольких минут до нескольких часов и называется ионосферным штормом.

Функционирование радиосредств определяется совокупностью электромагнитных процессов внутри и снаружи устройства. Наведение электромагнитных полей в проводниках внутри радиоустановки, изменение потенциалов за счет дополнительной ионизации фоновым излучением, возникновение дополнительных токов за счет проникновения дополнительных зарядов извне, а также повышение фонового электромагнитного излучения и концентрации различных частиц во время возмущений может приводить к сбоям в работе радиоаппаратуры и изменению характеристик оборудования под действием частиц. Внезапные усиления радиоизлучения (солнечные радиовсплески), испытывающие вариации интенсивности, вызывают неожиданные помехи в работе радиолокационной, радиосвязной и радиоприемной аппаратуры.

Геомагнитные возмущения могут способствовать усилению токов в коре Земли, в основном за счет усиления авроральных токов в полярной ионосфере, и влияют на стабильность функционирования электрических систем. В настоящее время используются системы прогноза геоэлектрических полей. Кроме того, воздействие ионизирующей радиации на электронные устройства приводит к изменению их характеристик (постоянному и временному) за счет приходящей радиации или атмосферных процессов, вызванных ею. Например, ухудшение эффективности солнечных панелей спутников в среднем за счет действия солнечной радиации составляет порядка 5 % в год; деградация и потеря оптической и электронной аппаратуры спутников.

Основные радиосредства, находящиеся под влиянием космической погоды — это средства КВ-радиосвязи, средства связи «поверхность—космос», глобальные навигационные системы, загоризонтные радиолокаторы, спутниковые высотомеры и радары космического базирования. Устойчивость функционирования большинства этих средств определяется ионосферными условиями. Влияние космической погоды на КВ-диапазон весьма существенно и включает в себя практически весь спектр эффектов, наблюдаемых в остальных диапазонах: поглощение за счет ионизации во время солнечных вспышек, поглощение в полярной шапке, радиоаврору, многомодовое распространение, групповые и фазовые задержки за счет рефракции и т.д. [1, 5—8].

В настоящее время имеется много центров прогнозирования параметров космической погоды, одним из которых является the Center for Space Weather Forecasts (CSWF) в ИЗМИРАНе. Предсказания параметров ионосферы осуществляются на основе прогноза солнечной и геомагнитной активностей, при этом наиболее популярным является индекс солнечной активности F10.7 в виде среднесуточного значения, а в серии геомагнитных индексов — среднесуточный индекс Ap с заблаговременностью 8 и 55 дней, вероятность максимального Kp индекса на 8 дней вперед, его трехчасовые значения на 3 дня вперед. Существует автоматическая система краткосрочного прогноза (за 1—3 часа) Ap и Dst индексов, используются эмпирические модели ионосферы, как IRI [2], IRI-Plas и другие. В эмпирических моделях полного электронного содержания ТЕС наиболее используемыми являются комбинации индекса F10.7. ТЕС используется для определения foF2, так как обеспечивает более полный охват земного шара, чем ионосферные станции и наблюдается высокая корреляция между foF2 и ТЕС. Для прогнозирования возмущенных значений используются индексы Kp и Dst [8, 9].

Коротковолновый диапазон с низкими частотами обеспечивает дальнюю связь, отражаясь обратно к Земле, тогда как с высокими частотами обеспечивается связь с космическими спутниками: волны проходят через ионосферу и теряют амплитудную и частотную стабильность. Также имеются свои широтные особенности, поскольку влияние геомагнитных бурь на ионосферу в зонах экватора и полярных шапок неодинаковое из-за земной магнитосферы. Так, в полярных широтах уровень ионизации во время ОГЯ может достичь критических значений, образуя поглощения полярной шапки, в которых особенно часто пропадает КВ-сигнал. В зоне экватора у ионосферы есть свои аномалии, связанные

с линиями магнитного поля Земли — это экваториальный фонтан и экваториальный электроджет [6—9].

В статьях ученых Бостонского университета К. Гровес, С. Басу, П. Дж. Султан «Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: current status and future plans» подробно рассмотрен процесс образования облаков с высокой электронной концентрацией в ионосфере, из-за которых непредсказуемо ухудшается спутниковая связь и навигация, причем данный эффект наиболее интенсивен в экваториальной области, умеренно влияет в высоких широтах и минимально в средних. Отметим, что, согласно их мнению, это происходит из-за того, что ионосфера способна внутренне контролировать генерацию неоднородностей в экваториальной области из-за взаимодействия с солнечными переходными процессами. В высоких широтах механизмы генерации несколько иные и обусловлены скорее магнитосферными процессами, именно поэтому их легче проследить, так как это ответная реакция на солнечные вспышки и корональные выбросы масс. Кит Гровес и Сунанда Басу [8] также разработали систему отслеживания ионосферных мерцаний в экваториальной зоне: геостационарный спутник, проводящий мониторинг экваториального пояса, оснащен соответствующим набором датчиков, способных обнаружить ионосферные неоднородности. С помощью модели ионосферы и данных с этого спутника можно спрогнозировать формирование и перемещение ионосферных мерцаний в ионосфере [8].

Опасные гелиогеофизические явления влияют на спутниковую навигацию следующим образом:

- появляются шумы в сигнале из-за радиоизлучения Солнца;
- приемники теряют захват сигнала;
- местоположение может быть рассчитано некорректно.

Все спутники GNSS имеют две частоты для передачи сигналов со спутника на наземный приемник: 1575,42 МГц и 1227,60 МГц. Во время солнечных вспышек излучение от Солнца генерируется на таких же длинах волн [1, 9—12].

Ошибка в определении местоположения объекта из-за ионосферных бурь является наиболее распространенной. Из-за солнечной активности изменяется общая для ионосферного слоя концентрация заряженных частиц, причем степень изменения сложно определить обычными моделями, так как необходимо узнать влияние для определенных частот, на которых действуют системы GNSS. Стоит учитывать и то, что в ионосфере могут образоваться области, где концентрация электронов будет сильно повышена (понижена) по сравнению с общим слоем. Такие пятна приводят к тому, что скорость сигнала непредсказуемо изменяется. Соответственно, определяемое расстояние через точку отражения увеличивается (уменьшается) на десятки метров по сравнению с реальными значениями. При этом, когда спутниковый сигнал сталкивается с препятствиями в виде резко возросшей энергии частиц (нейтронов и протонов), его фаза и амплитуда очень быстро изменяются. Мерцания могут сделать вычисления местоположения самолета невозможным [9—12].

Во время солнечных бурь и высокоинтенсивных галактических космических лучей протоны на огромной скорости достигают околоземного пространства и

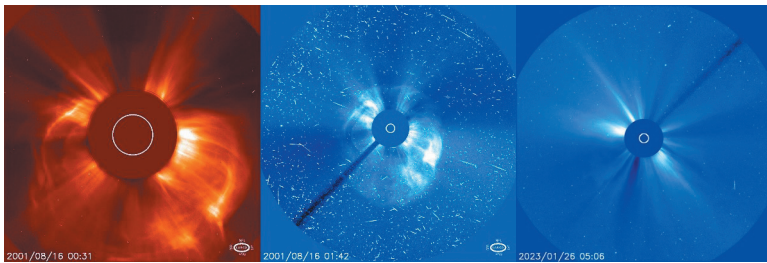


Рис. 1. Снимки заряженных частиц с коронографа LASCO-3 (Large Angle and Spectrometric Coronagraph-3) [1].

Fig. 1. Images of charged particles from the LASCO-3 coronagraph [1].

проникают в атмосферу на магнитных полюсах и в радиационный пояс нашей планеты. Сталкиваясь с частицами, находящимся в радиационном поясе, они порождают вторичные и третичные высокоэнергичные элементы, которые и создают основную опасность для летных экипажей. Очевидно, что в полярных широтах и на большой высоте эффект облучения сильнее. Поток высокоэнергичных частиц опасен не только для здоровья, но и для электроники [13—17].

Информация о потоке протонов с высокой энергией поступает с космических аппаратов SOHO при помощи коронографов LASCO-3. Например, на рис. 1 приведено изображение, полученное во время интенсивного коронального выброса массы 16 августа 2001 года. Это снимки, показывающие корональный выброс масс в видимом спектре, и снимок коронографа, на котором хорошо видны заряженные частицы. Также на рис. 1 приведено изображение с LASCO-3 во время отсутствия солнечных бурь [1].

На поверхности Земли потоки заряженных частиц фиксируются с помощью специальных приборов — нейтронных мониторов. Данные детекторы регистрируют вторичные заряженные частицы. Если более трех нейтронных мониторов улавливают увеличение радиации, значит, велик риск дополнительной дозы радиации на воздушном судне. Больше всего подвержены влиянию радиации самолеты, совершающие трансполярные перелеты [1, 18].

Японской группой ученых были проведены исследования воздействия радиации на экипаж во время нескольких дальнемагистральных полетов с использованием двух небольших коммерческих электронных персональных дозиметров: фотонный NRF20 и нейтронный NRY21 производства Fuji Electric Systems Co. Ltd. для радиационной защиты на ядерных предприятиях и объектах. Подробно отчеты их работы изложены в докладе «Measuring cosmic-ray exposure in aircraft using real-time personal dosimeters». Отметим, что измерения с фотонного дозиметра согласуются с расчетными дозами EPCARD (European Program Package for the Calculation of Aviation Route Doses) с разницей в 8 %, однако данные с нейтронного дозиметра в 5—15 раз превышали расчеты EPCARD. Скорее всего, это связано с техническими несовершенствами персональных приборов. Расскажем подробнее про EPCARD. Это специальное программное обеспечение, рассчитывающее

радиационное облучение экипажей самолетов, позволяющее оценить риски на любом авиационном маршруте и для любого профиля полета на высотах от 5 до 25 км. Программа виртуально имитирует полет с временным разрешением 1 минута в квазиреальном поле излучения вторичных частиц. В программе используются энергетические спектры нейтронов, протонов, фотонов, позитронов, мюонов и пионов, рассчитанных по методу Монте-Карло на различных высотах в атмосфере [19, 20].

Точность расчета данной модели была проверена при совершении трансполярного перелета Сеул-Нью-Йорк. Для исследования использовался переносной нейтронный монитор WENDI-II, который достаточно хорошо реагирует на нейтроны космического излучения. Измерения были проведены 5—6 ноября 2011 г. Время полета составило около 14 часов. Наблюдения, полученные в эквиваленте амбиентной дозы на 1 см, хорошо коррелировали с модельными расчетами EPCARD [21].

Донесение информации о солнечной активности до авиационных пользователей

Существует несколько пороговых значений, предназначенных для выпуска консультативных сообщений о космической погоде. Сообщения выпускаются в случае умеренных или сильных возмущений [1, 2].

Таблица 1

Пороговые значения от ИКАО для выпуска SWX
Thresholds from ICAO for issuing SWX

	Явление	Умеренное	Сильное
Нарушение ВЧ-связи	Уменьшение MUF	30%	50%
	Мощность рентгеновского излучения	10^{-4} нм	10^{-3} нм
	Авроральное поглощение	$K_p = 8$	$K_p = 9$
Радиационное облучение	Мощность дозы	30 мкЗв/ч	80 мкЗв/ч
Спутниковая навигация	Вертикальное ПЭС	125 ПЭС	175 ПЭС
	Фазовые сцинтилляции	0,4 рад	0,7 рад
	Амплитудные сцинтилляции	0,5	0,8

Консультативные сообщения, согласно приказу АМТК «О предоставлении консультативных сообщений о космической погоде» от 18.11.2019, необходимо включать в полетную документацию и при устной консультации обращать на них внимание эксплуатантов и членов лётных экипажей. Для диспетчерских составов необходимо включать консультативные сообщения в презентации, а также передавать их по электронной почте руководителям полетов. Синоптики получают данные из АСПД, откуда оперативный работник может их извлечь, применяя специальные индексы глобальных центров космической погоды: EFKL (Хельсинки), EGRR (Великобритания), LFPW (Тулуза), YMMC (Мельбурн), KWNP (США), UUAG (ИПП им. Е. К. Фёдорова), ZBVB (Китай) [1, 2].

В зависимости от опасности солнечного возмущения и степени его влияния на Землю, в частности, на полеты воздушных судов, Центры полетной информации (ЦПИ), Районные, Региональные или Зональные диспетчерские центры (РДЦ, РегДЦ, ЗДЦ соответственно), а также авиакомпании и непосредственно сами пилоты могут принимать следующие решения [1—3]:

- изменить маршрут или высоту полета;
- изменить план полета;
- совершить экстренную посадку;
- по возможности изменить диапазон используемых частот;
- дополнительно уточнить координаты местоположения при сбое систем спутниковой навигации.

Авиационным пользователям информация о космической погоде поступает из глобальных консультативных центров в виде сообщений о космической погоде. Консультативные сообщения информируют о типе воздействия (HF COM, GNSS, RADIATION), о его интенсивности (MOD — умеренная или SEV — сильная), о его начале и продолжительности, а также о пространственной протяженности на ближайшие сутки. Для пространственной протяженности используются описания в виде широтных полос [1, 2].

На рис. 2 приведен пример консультативного сообщения, которое было получено в 21:35 UTC 31 июля 2021 года. Сообщение свидетельствует о сильном ухудшении спутниковой навигации, которое наблюдалось в пределах 5° з.д. — 35° в.д. высоких широт Северного полушария. В последующие сутки ухудшение GNSS не ожидается. В ремарке дана краткая характеристика причин возникновения ОГЯ: возмущение космической погоды происходит *in situ* и выражено в виде

```
21:35:20 31-07-2021 Leng=594 Chan=AFTN
FNXX01 EFKL 312134
EFKL 312134
SWX ADVISORY
DTG:      20210731/2132Z
SWXC:     PECASUS
ADVISORY NR: 2021/37
SWX EFFECT: GNSS SEV
OBS SWX:  31/2025Z HNH W005 - E035
FCST SWX +6 HR: 01/0300Z NOT AVBL
FCST SWX +12 HR: 01/0900Z NOT AVBL
FCST SWX +18 HR: 01/1500Z NOT AVBL
FCST SWX +24 HR: 01/2100Z NOT AVBL
RMK:      SPACE WEATHER EVENT (IONOSPHERIC DISTURBANCE)
IN PROGRESS. IMPACT ON GNSS PERFORMANCE POSSIBLY LEADING
TO LOSS OF GNSS SIGNALS AND/OR DEGRADATION OF TIMING AND
POSITIONING PERFORMANCE.
NXT ADVISORY: WILL BE ISSUED BY 20210801/0252Z=
```

Рис. 2. Пример консультативного сообщения о космической погоде.

Fig. 2. Example of a space weather advisory message.

ионосферной бури, влияющей на характеристики спутниковой связи. Возможны потери сигнала и/или ухудшение характеристик позиционирования и времени. Выпуск следующего сообщения ожидается в 02:52 UTC 1 августа 2021 года [1].

Оценка солнечной активности в двадцать пятом солнечном цикле

Исследование космической погоды как опасного для авиации явления проводилось статистическими и аналитическими методами. База данных консультативных сообщений основана на архиве данных АМЦ «Пулково». В открытом доступе консультативных сообщений нет. Был рассмотрен период сентябрь 2020—январь 2023 гг., всего получено 96 консультативных сообщений. Стоит отметить, что космическая активность в летние периоды снижена, возможно, это связано с тем, что в зимний период Солнце ближе к Земле именно в Северном полушарии. Стоит отметить и то, что за период сентябрь 2020 — апрель 2021 гг. большинство сообщений выпускалось в тестовом режиме. В дальнейшем несколько изменилась частота и формат самих сообщений: они стали выпускаться чаще, к тому же в строке RMC информация дается четче, полнее и однообразнее по формату, вследствие чего она легче воспринимается авиационными пользователями. Можно предположить, что изменения в лучшую сторону происходят из-за того, что постепенно консультативные сообщения входят в привычный круг деятельности синоптиков, работающих в SWPC [1].

Чаще всего сообщения выпускались на умеренное ухудшение высокочастотной связи HF COM MOD (34 %). Сообщения о разной степени ухудшения спутниковой навигации GNSS MOD, SEV занимают практически равные проценты (умеренное — 27 %, сильное — 26 %). Реже всего выпускались сообщения о сильных ухудшениях высокочастотной связи HF COM SEV. Это может объясняться тем, что сильные солнечные вспышки и корональные выбросы масс возникают не так часто, а также с тем, что данное явление более локальное и чаще всего появляется вследствие суббурь. Кроме того, не было выпущено ни одного сообщения о повышенной радиационной опасности RADIATION MOD, SEV. Действительно, с ростом солнечной активности потоки ГКЛ и СКЛ уменьшаются, однако двадцать пятый солнечный цикл только начался и еще не достиг своего пика. Возможно, консультативные сообщения на данное явление предпочитают не выпускать, чтобы не терпеть убытки, связанные с авиаперевозками, которые могут быть из-за паники среди пассажиров авиакомпаний и летных экипажей [1].

Рассматривая выпущенные консультативные сообщения по зонам их возникновения можно отметить, что частота выпуска сообщений SWX по Северному полушарию (62 %) связана с высокой интенсивностью полетов и трансполярными перелетами. К тому же консультативные сообщения часто выпускались для высоких широт (40 %), как наиболее уязвимым для солнечной активности из-за особенностей магнитного поля Земли и радиационного пояса. Отметим, что при геомагнитных бурях явление происходит на двух полюсах. С незначительной разницей в процентах сообщения выпускались по экваториальным (30 %) и средним (28 %) широтам, поскольку при высокой активности Солнца в виде солнечных

вспышек и СМЕ обычно затрагиваются обширные широтные пространства нашей планеты [1].

На рис. 3 представлен временной ход солнечных пятен: среднемесячных значений и усредненных, представляющих собой усредненное количество солнечных пятен за статистический период, а также прогноз солнечных пятен до июля 2025 года согласно данным ISES. Очевидно, что цикл солнечной активности движется к своему максимуму, так как чем больше солнечных пятен, тем больше областей, в которых потенциально могут возникнуть солнечные вспышки и корональные выбросы масс, поэтому проблема космической погоды в ближайшее время будет актуальна. Окончание 25-го солнечного цикла ожидается в 2033 году. Вместе с тем столетний солнечный цикл находится в относительном минимуме [1, 22—25].

Стоит отметить, что по сравнению с 2020 г. количество солнечных пятен в 2022 г. увеличилось почти в 8 раз (8 солнечных пятен за 2020 г. и 78 солнечных пятен в 2022 г.). Вспышечная активность сильнее проявлялась в 2021 году (84 солнечных вспышки за 2020 г., 427 вспышки за 2021 г., 185 вспышек за 2022 г.). Более того, в 2021 году было зафиксировано 398 вспышек С-класса, 27 вспышек М-класса и 2 вспышки Х-класса. По прогностическим данным ISES, в 2023 году ожидается 224 вспышки С-класса, 39 вспышек М-класса и 3 вспышки Х-класса, несмотря на ожидаемое малое количество солнечных пятен (136). В январе 2023 г. солнечная активность проявилась в виде нескольких вспышек. В этот период были выпущены консультативные сообщения о влиянии вспышек на спутниковую связь от сильного до умеренного. Например, 10 января 2023 г., когда

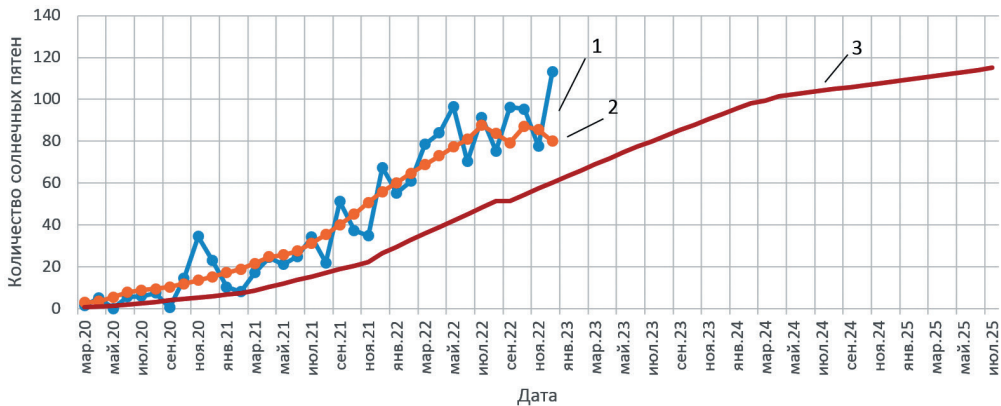


Рис. 3. Количество солнечных пятен в 25-ом солнечном цикле.

1 — среднемесячное количество солнечных пятен, 2 — ежемесячное усредненное количество солнечных пятен, 3 — прогностическое количество солнечных пятен на первую половину 25-го солнечного цикла.

Fig. 3. The number of sunspots in the 25th solar cycle.

1 — the monthly average number of sunspots, 2 — the monthly average number of sunspots, 3 — the predicted number of sunspots for the first half of the 25th solar cycle.

происходило больше всего вспышек, был отмечен максимум количества солнечных пятен [1, 26].

Согласно окончательному Кр-индексу, представленному на сайте GFZ Потсдам, количество дней в году, когда наблюдались геомагнитные бури, увеличивается аналогично с приближением 25-го солнечного цикла к своему максимуму (9 дней в 2020 г., 30 дней в 2021 г., 55 дней в 2022 г.). Геомагнитных бурь интенсивностью G4 было крайне мало, всего одна в 2021 г., что соответствует общей тенденции количества солнечных вспышек на Солнце. Бурь интенсивностью G5 не наблюдалось. Такие бури крайне редки и в последний раз фиксировались только один раз в 2000 г. и два раза в 2003 г. [1, 26].

Влияние космической погоды на ионосферу и высокочастотную связь

3 ноября 2021 года произошла солнечная вспышка класса M1.7, повлекшая за собой мощный выброс корональных масс. Высокоскоростной поток, связанный с солнечным ветром, согласно данным нейтронного монитора, установленного в Новосибирске, вызвал резкий спад плотности и интенсивности галактических космических лучей. Небольшое повышение потока перед резким спадом ГКЛ (галактических космических лучей) связано с фронтом ударной волны (рис. 4) [1, 26].

Индекс геомагнитной активности Кр достиг значений 7, что соответствует уровню сильной геомагнитной бури класса G4. По данным спутника ACE, скорость солнечного ветра с 3 по 4 ноября 2021 г. достигла пикового значения 832 м/с, а температура — более 1 млн К. Также существенно выросла концентрация протонов — до 36 частиц/см³. В результате над частью Западного и над Восточным полушариями произошло значительное нарушение коротковолновой связи. Консультативные сообщения о космической погоде на умеренное ухудшение высокочастотной связи были выпущены 4 и 5 ноября. Отметим, что радиосвязь ухудшается из-за влияния опасных гелиогеофизических явлений на ионосферу. Этот слой атмосферы ионизирован, и во время геомагнитных бурь возникает избыточная ионизация, радиоволны теряют амплитудную и частотную стабильность,

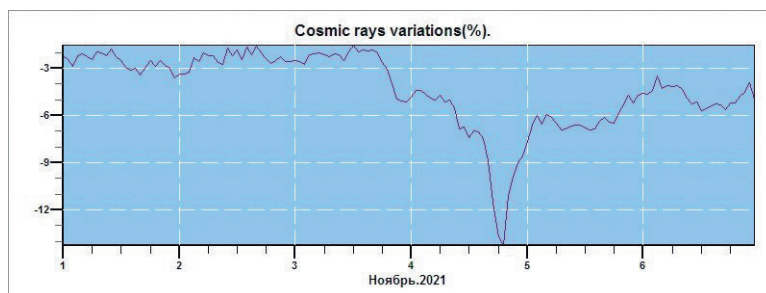


Рис. 4. Поток галактических космических лучей в ноябре 2021 г.

Fig. 4. Galactic cosmic ray flux in November 2021.

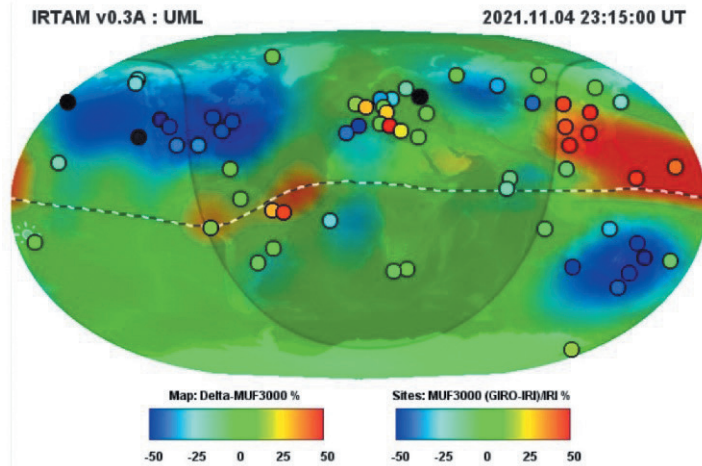


Рис. 5. Модель ионосферы от GIRO за 04.11.2021 г. Цветные точки обозначают локальные отклонения MUF от международной модели эталонной ионосферы в спокойное время (IRI). Также цветные точки являются пунктами, где выпускают зонды от GIRO. Красные области — зоны, где MUF (максимально применимая частота) существенно снизилась [27].

Fig. 5. Ionospheric model from GIRO for 04.11.2021. Colored dots represent local deviations of the MUF from the International Quiet Time Reference Ionosphere Model (IRI). Also, the colored dots are the points where GIRO probes are released. The red areas are areas where the MUF (maximum usable frequency) has dropped significantly [27].

могут появиться шумы, затухания или блэкаут. Коротковолновая связь активно используется при трансокеанских и трансполярных областях из-за особенности обслуживания полетов [1].

Как следует из консультативных сообщений, в первых трех из них неблагоприятное явление ожидалось только в полярных областях. Затем зона ухудшения высокочастотной связи сместилась только на Северный полюс, а в дальнейшем — и на все Северное полушарие до экваториальных широт. Согласно информации, полученной по модели GAMBIT, отчетливо видно, что MUF (максимально применимая частота) снизилась примерно на 50 % во время геомагнитной бури (рис. 5) [1, 27].

Влияние космической погоды на системы навигации

Воздействие ионосферной бури отрицательно сказывается на космической навигации и спутниковом позиционировании, так как сигнал, отправленный спутником, должен пройти через ионизирующий слой, прежде чем достичь приемника. Когда спутниковый сигнал сталкивается с нейтронами и протонами, его фаза и амплитуда могут очень быстро измениться, вследствие чего в спутниковую навигацию вносятся ошибки позиционирования. Эти изменения называются

сцинтилляциями. В качестве меры для оценки уровня колебаний используются амплитудные индексы (S_4) и фазовые индексы (σ_ϕ) [1, 5—7].

9 октября 2021 г. произошла солнечная вспышка класса M1.6. Космический аппарат ACE зафиксировал повышение скорости и температуры солнечного ветра, концентрация протонов 12 октября составила 39 частиц/см³. Индекс Kp достиг значения 6, что соответствует уровню сильной магнитной бури. 11—12 октября 2021 года было получено 6 консультативных сообщений. Согласно данным об индексе AE, являющимся суммой индексов AU и AL, интенсивность возмущения магнитного поля резко возросла на период 11—12 октября 2021 года. Индекс AE достиг своего максимума в 11 UTC 12 октября (2600 нТл) [1].

Для исследования влияния солнечной активности на спутниковую связь были использованы данные о фазовых и амплитудных сцинтилляциях, взятые с приемника Septentrio PolaRx5, установленного в Апатитах, для двух глобальных навигационных систем — российской ГЛОНАСС и американской GPS. Также на графиках (рис. 6) представлены горизонтальные и вертикальные компоненты геомагнитного поля, с помощью которых можно дать оценку мощности геомагнитного шторма и амплитуду ультранизких частот в горизонтальных и вертикальных компонентах [1, 10].

На графике видно, что максимум амплитуды мощности геомагнитной бури составил 800 нТл в горизонтальной компоненте. Вертикальная компонента значительно повысилась только в промежуток между 02 и 05 UTC 12 октября. Геомагнитная буря вызвала сильные сцинтилляции как для российских спутников, так и для американских. В результате σ_ϕ превысил критические значения в дневное и ночное время. Возможно, увеличение фазовой амплитуды в вечерние часы 12 октября обусловлено значительными колебаниями горизонтальной компоненты геомагнитной бури, причем реакция спутниковой связи на отрицательные показатели сильнее, о чем свидетельствует участок на графике с 19 UTC 11 октября по 04 UTC 12 октября, относительно промежутка 13—16 UTC (рис. 6).

Можно сделать вывод о том, что у фазовых сцинтилляций отсутствует прямая корреляция с амплитудой возмущения геомагнитной бури. С ростом амплитуды геомагнитных пульсаций увеличиваются значения σ_ϕ . Некоторые всплески в горизонтальной и вертикальной компонентах ультранизких частот не соответствуют изменению фазовых и амплитудных колебаний сигналов GNSS и не коррелируются с геомагнитными возмущениями. Следовательно, изменения горизонтальных и вертикальных компонент ультранизких частот вызвали случайные высыпания авроральных частиц. Отметим, что наиболее сильные сцинтилляции имеют прямую корреляцию по времени своего возникновения с ростом амплитуды ультранизких волн (рис. 6) [1, 10].

Влияние космической погоды на радиационную обстановку в атмосфере Земли

Во время солнечных бурь и высокоинтенсивных галактических космических лучей протоны проникают в атмосферу. Сталкиваясь с частицами, уже

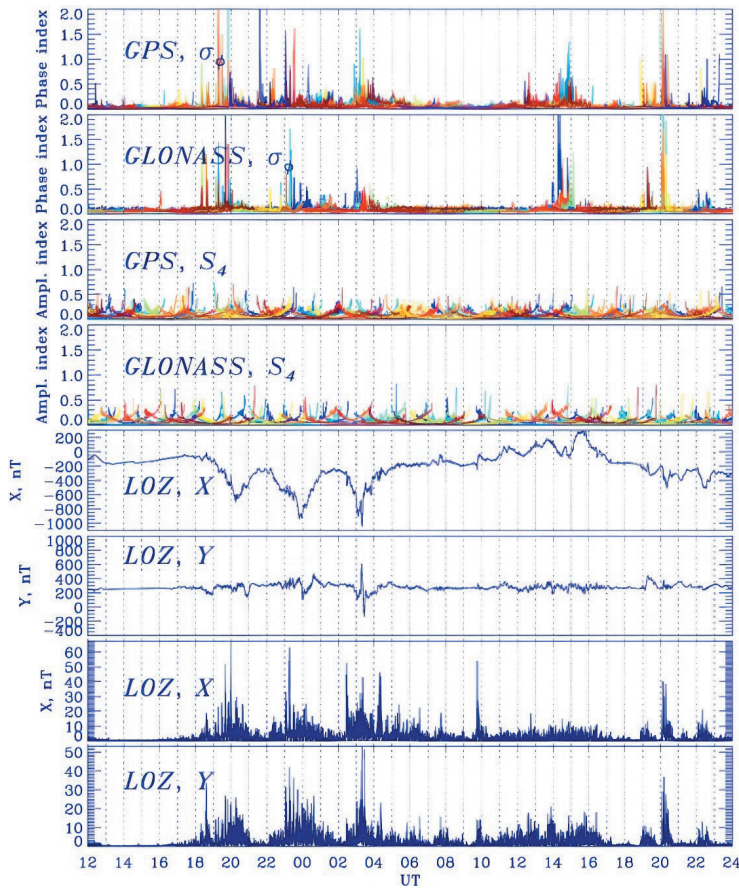


Рис. 6. Фазовые и амплитудные сцинтилляции за 11—12 октября 2021 г.

GPS, σ_ϕ — фазовые сцинтилляции с приемника Septentrio PolaRx5 для GPS-системы. GLONASS, σ_ϕ — фазовые сцинтилляции с приемника Septentrio PolaRx5 для GLONASS-системы. GPS, S_4 — амплитудные сцинтилляции с приемника Septentrio PolaRx5 для GPS-системы. GLONASS, S_4 — амплитудные сцинтилляции с приемника Septentrio PolaRx5 для GLONASS-системы.

LOZ, X (от 200 нТл до –1000 нТл) — горизонтальные компоненты геомагнитного поля.

LOZ, Y (от 1000 нТл до –400 нТл) — вертикальные компоненты геомагнитного поля.

LOZ, X (от 60 до 0 нТл) — амплитуда ультранизких частот волн в горизонтальной компоненте.

LOZ, Y (от 50 нТл до 0 нТл) — амплитуда ультранизких частот волн в вертикальной компоненте.

Fig. 6. Phase and amplitude scintillations from 11 to 12 October 2021.

GPS, σ_ϕ — phase scintillations from the Septentrio PolaRx5 receiver for the GPS system. GLONASS, σ_ϕ — phase scintillations from the Septentrio PolaRx5 receiver for the GLONASS system. GPS, S_4 — amplitude scintillations from the Septentrio PolaRx5 receiver for the GPS system. GLONASS, S_4 — amplitude scintillations from the Septentrio PolaRx5 receiver for the GLONASS system. LOZ, X (from 200 nT to –1000 nT) — the horizontal components of the geomagnetic field. LOZ, Y (from 1000 nT to –400 nT) — the vertical components of the geomagnetic field. LOZ, X (from 60 to 0 nT) — the amplitude of ultralow wave frequencies in the horizontal component. LOZ, Y (from 50 nT to 0 nT) — the amplitude of ultralow wave frequencies in the vertical component. [10]

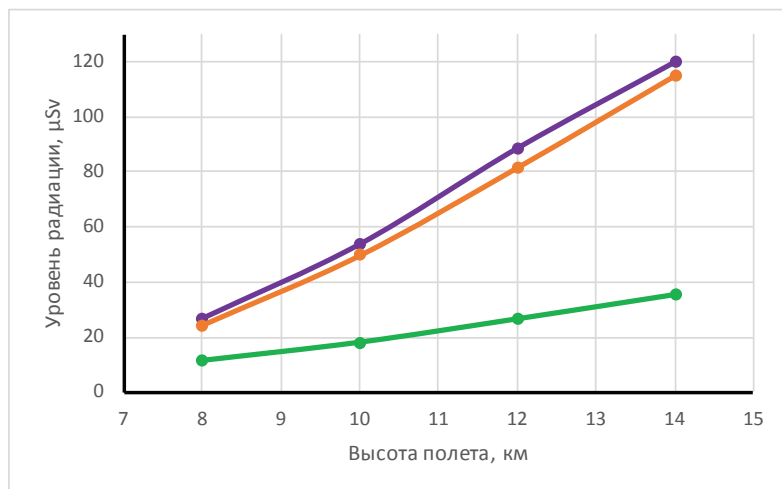


Рис. 7. Зависимость уровня радиации от высоты полета и широты.

1 — маршрут полета Анкоридж-Мурманск, 2 — маршрут полета Казань-Хабаровск, 3 — маршрут полета Дубай-Гуанчжоу.

Fig. 7. Dependence of radiation level on flight altitude and latitude.

1 — Anchorage-Murmansk flight route, 2 — Kazan-Khabarovsk flight route, 3 — Dubai-Guangzhou flight route.

находящимся в радиационном поясе, они порождают вторичные и третичные высокоэнергичные элементы, которые и создают основную опасность для летных экипажей и электроники [19—21, 29, 30].

Исследования проводились на основе модели от ИПГ им. Е. К. Фёдорова для трех маршрутов продолжительностью 6,5 часов и расстоянием около 5800 км. Для трансполярного маршрута Анкоридж-Мурманск максимальная доза радиации при максимальной солнечной активности достигла значений 120,22 μSv ; для маршрута Казань-Хабаровск — 115,27 μSv ; для рейса Дубай-Гуанчжоу — 35,67 μSv . Это не критическая для здоровья доза радиации, однако при совершении восьми перелетов по двум первым маршрутам экипаж получит годовую предельную дозу. Для полета в экваториальных широтах доза радиации крайне мала и не считается опасной. Также были проведены исследования дозы радиации по высотам над Землей (рис. 7). Очевидно, что чем ближе к полярным шапкам, тем выше радиационная опасность, и чем выше эшелон полета, тем больше вероятность облучения экипажа [21, 26—30].

Заключение

В работе показано, что космическая погода — опасное явление, затрагивающее не только спутниковые аппараты, но и воздушные суда и авионику. Также выявлено, что все консультативные сообщения были выпущены в корректное время и корректны по зонам распространения ОГЯ. Консультативные сообщения

о космической погоде чрезвычайно важны для обеспечения безопасности полетов самолетов. Отметим результаты работы.

Одной из целей было создание архива консультативных сообщений, так как на данный момент его нет в открытом доступе. Архив был создан на основе базы данных АМЦ «Пулково» за период с сентября 2020 года по январь 2023 года, всего было зафиксировано 97 консультативных сообщений. На основе архивных данных было установлено, что чаще всего сообщения выпускались на умеренное ухудшение высокочастотной связи (34 %); среди них не было ни одного сообщения о повышенной радиационной опасности. Также чаще всего консультативные сообщения выпускались по Северному полушарию (62 %) и по высоким широтам (40 %).

Другой целью исследования был анализ двадцать пятого цикла солнечной активности. Исходя из минимального количества солнечных пятен, было установлено, что текущий солнечный цикл начался в 2020 году, и его активность будет возрастать вплоть до конца 2025 года. Окончание цикла ожидается в 2033 году. На конец 2022 г. в двадцать пятом цикле наблюдалось 2074 солнечных пятна, 657 солнечных бурь класса С, 36 солнечных бурь класса М, 2 солнечных бури Х-класса. В текущем 2023 году прогнозируется 136 солнечных пятен, 224 бури класса С, 39 бурь класса М, 3 бури класса Х. Также в двадцать пятом солнечном цикле уже наблюдалось 77 геомагнитных бурь G1-класса, 13 бурь G2-класса, 3 бури G3-класса, 1 буря G4-класса (в 2021 году). Буря класса G5 не наблюдалось.

В качестве примеров влияния космической погоды на ухудшение высокочастотной связи были приведены выпущенные консультативные сообщения за период 3—4 ноября 2021 г. Сильная геомагнитная буря наблюдалась в полярных шапках, затем она распространилась по всему Северному полушарию, что было связано с мощными солнечными вспышками. Данное опасное гелиогеофизическое явление подтвердилось моделью ионосферы GAMBIT.

Опасность неполадок в спутниковой навигации было подтверждено консультативными сообщениями за период 11—12 октября 2021 года. Геомагнитная суббуря локально наблюдалась в некоторых регионах Северного полушария, что было подтверждено данными с приемника Septentrio PolaRx5, установленного в Апатитах.

Так как на период исследования не было выпущено ни одного консультативного сообщения о радиационной опасности, анализ проводился на основании метода расчета уровня радиации от Института прикладной геофизики им. Е. К. Фёдорова. Было доказано, что уровень радиации возрастает с высотой, а также по мере движения от экватора к полярным шапкам. Кроме того, чем сильнее солнечная активность, тем выше опасность уровня радиации.

В заключение несколько рекомендаций для удобства донесения информации авиационным пользователям: например, необходима визуализация границ зон, для которых действует предупреждение, так как в нынешнем виде сообщения не расширяются. Также для Российской Федерации рекомендуется расширить сеть наземной и спутниковой аппаратуры для мониторинга за космической погодой, увеличить количество датчиков для северных регионов, как наиболее

подверженных влиянию геомагнитных бурь, а также технологически осовременить уже имеющиеся. Поскольку ИПГ им. Е. К. Фёдорова, представляющий Россию в региональном центре, является вспомогательным центром и не выпускает консультативные сообщения, желательно усовершенствовать методы прогнозов ОГЯ.

Список литературы

1. Соколина А. П., Волобуева О. В. Методы и средства наблюдений за космической погодой и ее влияние на полеты воздушных судов / Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России». Иркутск, 2022. С. 409—417.
2. Буров В. А., Лапшин В. Б., Сыроешкин А. В. Космическая погода и авиаперевозки // Мир измерений. 2013. № 2. С. 11—16.
3. Тлатов А. Г., Тертышников А. В. Прогнозирование параметров космической погоды на основе данных наземных наблюдений солнечной активности / Гелиогеофизические исследования в Арктике. Труды второй всероссийской конференции, Мурманск. 2018. С. 94—97. doi: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.94-97.
4. Жеребцов Г. А. Комплекс гелиогеофизических инструментов нового поколения // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 6—18.
5. Бернгардт О. И. Влияние факторов космической погоды на работу радиосредств // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 3. С. 40—60. doi: 10.12737/szf-33201705.
6. Дёминов М. Г., Осипов Ю. С. Ионосфера / Большая российская энциклопедия. М.: 2004-2017. 350 с.
7. Мальцева О. А., Безвытный С. А., Морозов В. Е. и др. Элементы прогнозирования космической погоды и параметров ионосферы / Материалы 12-ой международной школы-конференции «Проблемы геокосмоса». 2018. С. 344—350.
8. Basu S., Groves K. M., Sultan P. J. Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: Current status and future plans // Journal of Atmosph. Solar-Terr. Phys., Vol. 64, 2002. P. 1745—1754.
9. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ ВВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 479 с.
10. Белаховский В. Б., Будников П. А., Пильгаев С. В. и др. Влияние ионосферных возмущений на сцинтилляции ГЛОНАСС/GPS сигналов в авроральных широтах. / «Physics of Auroral Phenomena». Апатиты. 2022. С. 106—109. doi: 10.51981/2588-0039.2022.45.025.
11. Демьянов В. В., Ясюкевич Ю. В. Космическая погода: факторы риска для глобальных навигационных спутниковых систем // Солнечно-земная физика. 2021. Т.7, № 2. С. 30—52. doi: 10.12737/szf-72202104.
12. Сидоров А. С. Исследование влияния состояния нижних слоев атмосферы и космической погоды на помехоустойчивость радионавигационных сигналов GPS/ГЛОНАСС / VIII Международная научно-практическая конференция «Научный поиск в современном мире». Махачкала: ООО «Апробация», 2015. С. 45—48.
13. Демидов М. Л. О возможностях и проблемах наблюдений магнитных полей Солнца для прогноза космической погоды // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 1. С. 22—33. doi: 10.12737/23279.
14. Куражковская Н. А. Глобальная возмущенность магнитосферы земли и ее связь с космической погодой // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 1. С. 51—62. doi: 10.12737/szf-61202005.
15. Маурчев Е. А., Германенко А. В., Михалко Е. А. и др. Оценка вклада протонов солнечных космических лучей в скорость ионизации вещества атмосферы Земли и сравнение расчётных высотных профилей с экспериментальными данными для случаев высокой солнечной активности / Фундаментальные и прикладные космические исследования. XVI конференция молодых ученых : сборник трудов. Серия «Механика, управление и информатика». Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2019. С. 103—113. doi: 10.21046/KMU-2019-103-113.

16. Рябева Е. В., Идалов В. А., Миноягареев В. Т. и др. Контроль дозы и спектра нейтронов на высотах авиаперелетов // Гелиогеофизические исследования. 2020. № 25. С. 37—44.
17. Стожков Ю. И. Космические лучи в земной атмосфере / Науки о Земле. 2015. С. 15—29.
18. Hammer G. P., Blettner M., Langner I. Cosmic radiation and mortality from cancer among male German airline pilots: extended cohort follow-up // Eur. J. Epidemiol. 2012. V. 27. P. 419—429.
19. Takada M., Nunomiya T., Ishikura T. Measuring cosmic-ray exposure in aircraft using real-time personal dosimeters // Radiat Prot Dosimetry. 2012. V. 149. P. 169—176.
20. Mares, V., Maczka, T., Leuthold, G. Rühm, W. Air crew dosimetry with a new version of EPCARD // Radiat. Prot. Dosim. 2009. V. 136, P. 262—266.
21. Yasuda H., Lee J., Yajima K. Measurement of cosmic-ray neutron dose onboard a polar route flight from New York to Seoul // Radiat Prot. Dosimetry. 2011. V. 146. P. 213—216.
22. Алексеев Н. В. Происхождение солнечных циклов / Евразийское научное объединение. 2018. № 8. С. 32—36.
23. Зверев А. С., Григорьев В. Г., Стародубцев С. А. и др. Мониторинг геомагнитных возмущений по данным наземных наблюдений космических лучей в начале 25-го цикла солнечной активности / Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2022. С. 49—51.
24. Калинин М. С., Базилевская Г. А., Крайнев М. Б. и др. Особенности временного хода интенсивности галактических космических лучей в минимуме между 24 и 25 солнечными циклами / Physics of Auroral Phenomena. 2019. С. 122—125. doi: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.122-125.
25. Ермолаев Ю. И., Ермолаев М. Ю. Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды // Геофизические процессы и биосфера. 2009. Т.8. № 1. С. 5—36.
26. Витинский Ю. И., Колецкий М., Куклин Г. В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука, 1986. 201 с.
27. F. Quiñonez, L. A. Núñez, E. A. Casallas. Radiation Dose Charts for Long Geodetic and Polar Flights with CARI-7A. 2019. P. 20.
28. Янчуковский В. Л., Белинская А. Ю. Геофизические явления в период всплеска солнечной активности в октябре-ноябре 2021 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 297—301. doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-297-301.
29. Козелов Б. В. Статистика измерения радиации в атмосфере на высотах рейсовых самолетов в 2017-2018 годах / Physics of Auroral Phenomena. Апатиты. 2019. С. 126—129. doi: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.126-129.
30. Морозова М. А., Лапшин В. Б., Доренский С. В. и др. Дозиметрия при авиаперелётах // Гелиогеофизические исследования. 2014. № 10. С. 45—92.

References

1. Sokolina A. P., Volobueva O. V. Methods and means of observing space weather and its impact on aircraft flights. Materials In the All-Russian scientific-practical conference “Modern trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia.”, 2022:(409—417). (In Russ.).
2. Burov V. A., Lapshin V. B., Syroeshkin A. V. Space weather and air travel. *Mir izmerenij = The world of measurements*. 2013; (2):(11—16). (In Russ.).
3. Tlatov A. G., Tertyshnikov A. V. Prediction of space weather parameters based on data from ground-based observations of solar activity. Proceedings of the second all-Russian conference, 2018:(94—97). (In Russ.). doi: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.94-97.
4. Zherebcov G. A. Complex of new generation heliogeophysical instruments. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-terrestrial physics*. 2020; (2):(6—18). (In Russ.).
5. Bergardt O. I. Influence of space weather factors on the operation of radio facilities. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-terrestrial physics*, 2017; (3):(40—60). (In Russ.). doi: 10.12737/szf-33201705.
6. Dyominov M. G., Osipov Y. S. *Ionosfera = Ionosphere*. Moscow: Great Russian Encyclopedia, 2004-2017: 350 p. (In Russ.).
7. Mal'ceva O. A., Bezvytnyj S. A., Morozov V. E. Elements of forecasting space weather and ionospheric parameters. Materials of the 12th International School-Conference “Problems of Geocosmos”, 2018: (344—350). (In Russ.).

8. Basu S., Groves K. M., Sultan P. J. Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: Current status and future plans. *Journal of Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2002; (64): 1745—1754.
9. Afrajmovich E. L., Perevalova N. P. *GPS-monitoring verhnej atmosfery Zemli = GPS monitoring of the Earth's upper atmosphere*. Irkutsk: Russian Academy of Medical Sciences, 2006: 479 p. (In Russ.).
10. Belahovskij V. B., Budnikov P. A., Pil'gaev S. V. Effect of ionospheric disturbances on GLONASS/GPS signal scintillations at auroral latitudes. *Physics of Auroral Phenomena*. 2022; (106—109). (In Russ.). doi: 10.51981/2588-0039.2022.45.025.
11. Dem'yanov V. V., Yasyukevich Y. V. Space weather: risk factors for global navigation satellite systems. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-terrestrial physics*. 2021; (2):(30—52). (In Russ.). doi: 10.12737/szf-72202104.
12. Sidorov A. S. Study of the Influence of the State of the Lower Atmosphere and Space Weather on the Noise Immunity of GPS/GLONASS Radio Navigation Signals. *VIII ISPC "Scientific search in the modern world"*. Makhachkala: LLC "Aprobatsiya", 2015:(45—48). (In Russ.).
13. Demidov M. L. On the Possibilities and Problems of Observing the Solar Magnetic Fields for Space Weather Forecasting. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-terrestrial physics*. 2017; (1):(22—33). (In Russ.). doi: 10.12737/23279.
14. Kurazhkovskaya N. A. Global perturbation of the earth's magnetosphere and its relationship with space weather. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-terrestrial physics*. 2020; (1):(51—62). (In Russ.). doi: 10.12737/szf-61202005.
15. Mauricev E. A., Germanenko A. V., Mihalko E. A. Estimation of the contribution of solar cosmic ray protons to the ionization rate of the matter of the Earth's atmosphere and comparison of the calculated altitude profiles with experimental data for cases of high solar activity. *Fundamental and applied space research. XVI Conference of young scientists : collection of works. The series "Mechanics, management and Computer Science"*. Moscow: Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 2019:(103—113). (In Russ.). doi: 10.21046/KMU-2019-103-113.
16. Ryabeva E. V., Idalov V. A., Minoyagareev V. T. Dose and neutron spectrum monitoring at air travel altitudes. *Geliogeofizicheskie issledovaniya = Heliogeophysical research*. 2020; (25):(37—44). (In Russ.).
17. Stozhkov Y. I. Cosmic rays in the earth's atmosphere. *Earth Sciences*, 2015:(15—29). (In Russ.).
18. Hammer G. P., Blettner M., Langner I. Cosmic radiation and mortality from cancer among male German airline pilots: extended cohort follow-up. *Eur. J. Epidemiol.* 2012; (27): 419—429.
19. Takada M., Nunomiya T., Ishikura T. Measuring cosmic-ray exposure in aircraft using real-time personal dosimeters. *Radiat Prot Dosimetry*. 2012; (149): 169—176.
20. Mares, V., Maczka, T., Leuthold, G. Rühm, W. Air crew dosimetry with a new version of EPCARD. *Radiat. Prot. Dosim.* 2009; (136): 262—266.
21. Yasuda H., Lee J., Yajima K. Measurement of cosmic-ray neutron dose onboard a polar route flight from New York to Seoul. *Radiat Prot. Dosimetry*. 2011; (146): 213—216.
22. Alekseev N. V. Origin of solar cycles. *Evrazijskoe nauchnoe ob'edinenie = Eurasian scientific association*. 2018; (8):(32—36). (In Russ.).
23. Zverev A. S., Grigor'ev V. G., Starodubcev S. A. Monitoring of geomagnetic disturbances based on ground-based observations of cosmic rays at the beginning of the 25th cycle of solar activity. *Astrophysics and physics of the Sun*. 2022:(49—51). (In Russ.).
24. Kalinin M. S., Bazilevskaya G. A., Krajenev M. B. Peculiarities of the Time Variation of the Intensity of Galactic Cosmic Rays at the Minimum between 24th and 25th Solar Cycles. *Physics of Auroral Phenomena*. 2019:(122—125). (In Russ.). doi: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.122-125.
25. Ermolaev Y. I., Ermolaev M. Y. Solar and interplanetary sources of geomagnetic storms: aspects of space weather. *Geofizicheskie processy i biosfera = Geophysical processes and biosphere*. 2009; (1):(5—36). (In Russ.).
26. Vitinskij YU. I., Kopeckij M., Kuklin G. V. *Statistika pyatnoobrazovatel'noj deyatel'nosti Solnca = Statistics of sunspot activity*. Moscow: Nauka, 1986: 201 p. (In Russ.).
27. F. Quiñonez, L. A. N'úñez, E. A. Casallas. Radiation Dose Charts for Long Geodetic and Polar Flights with CARI-7A. 2019: 20.
28. Yanchukovskij V. L., Belinskaya A. Y. Geophysical phenomena during a burst of solar activity in October-November 2021. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa =*

Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2022; (19):(297—301). (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-297-301.

29. Kozelov B. V. Statistics of radiation measurement in the atmosphere at the heights of regular aircraft in 2017-2018. *Physics of Auroral Phenomena.* 2019;(126—129). (In Russ.). doi: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.126-129.
30. Morozova M. A. Lapshin V. B., Dorenskiy S. V. Dosimetry during air travel. *Geliogeofizicheskie issledovaniya = Heliogeophysical research.* 2014; (10):(45—92). (In Russ.).

Информация об авторах

Анастасия Павловна Соколина, синоптик Северо-Западный филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», nst.palna@yandex.ru.

Ольга Васильевна Волобуева, канд. геогр. наук, доцент кафедры метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет, ovvolobueva@rshu.ru.

Яна Викторовна Дробжева, д-р физ.-мат. наук, доцент, декан метеорологического факультета, Российский государственный гидрометеорологический университет, ydrobzheva@mail.ru.

Ирина Александровна Иванова, ассистент кафедры метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет, ira.nova@mail.ru.

Ирина Викторовна Лаврова, канд. геогр. наук, доцент кафедры метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет, livspb@yandex.ru.

Ольга Николаевна Топтунова, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет, olgakolp@yandex.ru.

Information about authors

Anastasia Pavlovna Sokolina, weather forecaster, North-Western branch of the Federal State Budgetary Institution “Aviamelecom of Roshydromet”, St. Petersburg, nst.palna@yandex.ru.

Olga Vasiliievna Volobueva, PhD in Geography, Associate Professor of Department of Meteorological Forecasts, Russian State Hydrometeorological University, ovvolobueva@rshu.ru.

Yana Viktorovna Drobzheva, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Dean of Faculty of Meteorology, Russian State Hydrometeorological University, ydrobzheva@mail.ru.

Irina Alexandrovna Ivanova, Assistant of Department of Meteorological Forecasts, Russian State Hydrometeorological University, ira.nova@mail.ru.

Irina Victorovna Lavrova, PhD in Geography, Associate Professor of Department of Meteorological Forecasts, Russian State Hydrometeorological University, livspb@yandex.ru.

Olga Nikolaevna Topunova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of Department of Meteorological Forecasts, Russian State Hydrometeorological University, olgakolp@yandex.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 23.04.2023

Принята к печати после доработки 15.08.2023

The article was received on 23.04.2023

The article was accepted after revision on 15.08.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 470—492.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(72): 470—492.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 556.131.11:[621.396.969:629.78]

doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492

Концепция расчета элементов регионального гидрологического баланса с использованием спутникового радиотепловидения

***Дмитрий Михайлович Ермаков^{1,2}, Евгений Владимирович Пашинов¹,
Алексей Владимирович Кузьмин¹, Сергей Александрович Втюрин¹,
Андрей Петрович Чернушич²***

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, d.m.ermakov@cosmos.ru

² Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл.

Аннотация. Рассмотрен новый подход к анализу элементов регионального гидрологического баланса на основе данных спутникового радиотеплового мониторинга Земли. Благодаря использованию алгоритмов спутникового радиотепловидения становится возможным получить ряды полного влагосодержания атмосферы над заданной территорией и поток водяного пара через ограничивающий ее контур. В работе проанализированы базовые математические соотношения подхода в контексте дистанционных методов исследования Земли, рассмотрены наиболее перспективные для использования спутниковые средства наблюдения и алгоритмы обработки данных, приведены результаты сравнения влагосодержания и горизонтального потока водяного пара с архивом ECMWF Era5.

Ключевые слова: микроволновая радиометрия, спутниковое радиотепловидение, влагосодержание атмосферы, горизонтальный поток водяного пара.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственных заданий ИКИ РАН (тема «Мониторинг», гос. рег. № 122042500031-8) в части расчетов полей интегрального влагосодержания и адвекции водяного пара, а также ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (тема «Космос-2» гос. рег. № 0030-2019-0008) в части математической формализации подхода и расчета элементов гидрологического баланса.

Для цитирования: Ермаков Д. М., Пашинов Е. В., Кузьмин А. В., Втюрин С. А., Чернушич А. П. Концепция расчета элементов регионального гидрологического баланса с использованием спутникового радиотепловидения // Гидрометеорология и экология. 2023. № 72. С. 470—492. doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.

Original article

The concept of calculating the elements of the regional hydrological balance with the use of satellite radiothermvision

***Dmitry M. Ermakov^{1,2}, Evgeny V. Pashinov¹, Sergey A. Vturin¹,
Alexey V. Kuzmin¹, Andrey P. Chernushich²***

¹ Space Research Institute RAS, Moscow, d.m.ermakov@cosmos.ru

² Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino Branch, Fryazino, Moscow region

Summary. A new approach to the analysis of the elements of the regional hydrological balance based on the data of satellite radiothermal monitoring of the Earth is considered. Due to the use of satellite radiothermvision algorithms, it becomes possible to obtain series of the total moisture content of the atmosphere over a given territory and the flux of water vapor through the contour limiting it. This makes it possible to calculate two of the three components of the atmospheric moisture balance equation: the change in total moisture content with time and the convergence of water vapor. The closure of the balance equation is “effective evaporation” (the difference between evaporation and precipitation), which, therefore, knowing the remaining components, can be easily calculated integrally for a given territory and a selected observation time interval. Analyzed are the basic mathematical relations of the approach in the integral form in the context of remote sensing methods of Earth exploration. The most promising satellite observation tools to be applied in the presented approach are considered: they are multichannel passive microwave radiometers (AMSR, MTVZA, SSM/I, SSMIS series). The data processing algorithms, used in frames of the approach are presented and briefly discussed, including that for retrieving precipitable water vapor (PWV) over land from SSMIS data, and that for calculating water vapor advective fluxes based on optical flow algorithm applied to chronological sequence of PWV fields.

In order to illustrate the applicability and potential advantages of the approach an example of preliminary calculations is given for the catchment of the Ob River. The elements of a 10-year hydrological balance for the four selected regions within the Ob River catchment are evaluated and, based on them the resulting yearly “effective hydration” of the territory is estimated and compared with estimations from reanalysis (ECMWF Era5) and independent measurements of the annual runoff at the mouth of the Ob. All estimates are comparable by the order of magnitude, satellite ones being somewhat above while reanalysis being below the latter ones.

Keywords: Regional hydrological balance, microwave radiometry, satellite radiothermvision

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state assignments of the IKI RAS (“Monitoring”, state. reg. No. 122042500031-8) in part of calculating the fields of precipitable water vapor content and water vapor advection, as well as IRE RAS (“Kosmos-2” state. reg. No. 0030-2019-0008) in part of mathematical formalization of the approach and calculation of elements of the hydrological balance.

For citation: Ermakov D. M., Pashinov E. V., Vturin S. A., Kuzmin A. V., Chernushich A. P. The concept of calculating the elements of the regional hydrological balance with the use of satellite radiothermvision. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(72): 470—492 (In Russ). doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.

Введение

Изменения параметров гидрологического цикла являются одними из важных следствий и индикаторов региональной и глобальной климатической изменчивости

[1]. Развитие методов расчета и прогнозирования изменений этих параметров представляют интерес не только с фундаментальной, но и с научно-прикладной точки зрения. Увлажнение территории и его динамика обуславливают как текущее состояние, так и возможную трансформацию экосистемы; во многом определяют величину речного стока как компоненты гидрологического цикла [2, 3]; при формировании аномальных погодных условий создают риски развития наводнений или засух. Так, по данным Европейского агентства по окружающей среде [4], наводнения в Европе привели к экономическим потерям в 60 млрд. евро и гибели 1126 человек в период с 1998 года по 2009 год [5], что инициировало разработку Европейской системы оповещения о наводнениях [6, 7]. Аналогичные системы развиваются и в России [8]. Известно, например, что сильные наводнения на Амуре вызываются затяжными осадками [9—12]. Тем не менее, публикации, обсуждающие вопросы развития средств анализа и прогноза изменений элементов регионального гидрологического цикла, в том числе в связи с изменениями речного стока и уровня водоемов, для территорий России по-прежнему сравнительно редки [1, 13, 14].

В цитированных работах рассмотрены два основных методических подхода к оперативному и долгосрочному анализу компонент гидрологического цикла: на базе прямых измерений на аэрологических станциях и с помощью оценок по реанализу. Очевидным недостатком первого подхода является редкость и неравномерность измерений по пространству. Второй подход опирается на процедуру усвоения данных разнородных измерений в сложных циркуляционных моделях, и его результаты нуждаются в проверке с использованием репрезентативных объемов независимых фактических наблюдений. В настоящей работе рассмотрена концепция третьего подхода, основанного на вычислительной схеме, замкнутой относительно данных спутникового радиотеплового мониторинга. Его результаты, таким образом, можно считать в значительной степени независимыми от двух других подходов (при сделанных ниже оговорках) и опирающимися исключительно на данные фактических (дистанционных) наблюдений.

Логика этой концепции отражена в структуре работы. В первом разделе даны основные соотношения, описывающие взаимосвязь элементов гидрологического цикла. В отличие от исследований [1, 15], где эквивалентные им соотношения представлены в дифференциальной форме, в данной работе отдано предпочтение интегральной форме, которая делает связь с дистанционно измеряемыми параметрами атмосферы более очевидной. В следующих двух разделах представлены основные возможности получения критически важных для реализации подхода атмосферных параметров (интегрального влагосодержания атмосферы и интегрированного по высоте атмосферы горизонтального потока водяного пара) по данным спутниковых наблюдений. В заключении изложены основные результаты, проблемы и перспективы предложенного подхода.

Интегральное представление уравнения водного баланса атмосферы

Для консервативной величины (например, общего содержания воды во всех фазовых состояниях) в заданном объеме атмосферы справедливо соотношение:

$$\frac{d}{dt} \iiint_V a(x, y, z) \cdot dx dy dz = \oiint_S \bar{F}(x, y, z) d\bar{S}, \quad (1)$$

где $a(x, y, z) dx dy dz$ — масса (воды) в элементарном объеме $dx \times dy \times dz$ с координатами (x, y, z) ; V — рассматриваемый объем, окруженный замкнутой поверхностью S ; $\bar{F}(x, y, z) = a(x, y, z) \vec{v}(x, y, z)$, $\vec{v}(x, y, z)$ — вектор скорости движения (элементарного объема воздуха); $d\bar{S}$ — ориентированная элементарная площадка поверхности, причем направление нормали выбрано внутрь рассматриваемого объема. Таким образом, в левой части уравнения (1) стоит изменение со временем полной массы водяного пара в объеме V , в правой — полный поток атмосферной влаги через охватывающую этот объем поверхность (положительному потоку соответствует конвергенция потока влаги внутрь границ).

В частном случае наблюдений Земли из космоса возникает выделенное направление в надир, что можно отразить в уравнении (1) путем выбора порядка интегрирования:

$$\frac{d}{dt} \iint_A dx dy \int_0^{+\infty} a(x, y, z) dz = \oiint_{S/A} \bar{F}(x, y, z) d\bar{S} + \oiint_A \bar{F}(x, y, z) d\bar{S}, \quad (2)$$

где рассмотрен объем с бесконечно высокими вертикальными стенками и основанием A на поверхности Земли. В этом случае в левой части уравнения возникает величина $Q(x, y) = \int_0^{+\infty} a(x, y, z) dz$ — интегральная по высоте атмосферы масса

воды во всех фазовых состояниях на единицу площади поверхности, a — абсолютная влажность в $г/м^3$. Как известно, подобные интегральные величины во многих случаях восстанавливаются по дистанционным данным гораздо более надежно, чем их вертикальные распределения [16, 17]. В правой части уравнения (2) интеграл потока разделен на две компоненты. Вторая — вертикальный поток воды через горизонтальную площадку A на поверхности Земли, т.е. так называемое «эффективное испарение», $E - P$, где E — интенсивность испарения с площадки A , в $кг/с$; P — интенсивность осадков, приходящихся на ту же площадку, в $кг/с$. Первая компонента правой части уравнения (2) — поток через оставшуюся часть границы, который в данном случае соответствует горизонтальному потоку через вертикальные стенки, причем поток через бесконечно высокую часть граничной поверхности, параллельную A , можно считать равным нулю:

$$\oiint_{S/A} \bar{F}(x, y, z) d\bar{S} = \oint_l d\vec{n} \int_0^{+\infty} a(x, y, z) \vec{v}(x, y, z) dz, \quad (3)$$

где $d\vec{n}$ — внутренняя нормаль к границе l области A на поверхности Земли, равная по модулю длине соответствующего элемента контура интегрирования. Таким образом, можно ввести величину $\bar{F}_a(x, y) = \int_0^{+\infty} a(x, y, z) \vec{v}(x, y, z) dz$ — интегрированный по высоте горизонтальный поток атмосферной влаги во всех фазовых

состояниях (вертикальная компонента потока равна 0 при скалярном умножении на $d\vec{n}$).

Интегрирование уравнения (2) по времени дает с учетом (3) и введенного обозначения $\bar{F}_a(x, y)$:

$$\iint_A Q(x, y) dx dy \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} = \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} dt \oint_l \bar{F}_a(x, y) d\vec{n} + \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} (E - P) dt. \quad (4)$$

Величина в левой части уравнения (4) — изменение полной массы атмосферной влаги над областью A , произошедшее в интервале между начальным t_{\min} и конечным t_{\max} моментами времени (интеграл по площади и по времени наблюдений). Оно частично объясняется горизонтальным притоком (оттоком) влаги через ограничивающие область A вертикальные стенки (первое слагаемое в правой части уравнения) и частично — эффективным испарением с поверхности A за весь рассмотренный интервал времени (второе слагаемое). Центральный интерес в данном случае представляет последнее слагаемое. Остальные слагаемые, как показано ниже, могут быть восстановлены по данным дистанционного зондирования Земли в микроволновом диапазоне.

Сделав перестановку слагаемых в (4), получим:

$$\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} (P - E) dt = - \iint_A Q(x, y) dx dy \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} + \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} dt \oint_l \bar{F}_a(x, y) d\vec{n}. \quad (5)$$

Легко убедиться, что полученное уравнение эквивалентно стандартному уравнению баланса влаги в дифференциальной форме. Для этого уравнение (5) необходимо продифференцировать по пространственным и временным координатам, т.е. перейти к бесконечно малому интервалу времени $t_{\max} - t_{\min} = dt$ и бесконечно малой площадке $dA = dx dy$ и разделить обе части (5) на dt и dA . Получим:

$$\frac{(P - E) dt}{dt \cdot dA} = - \frac{Q(x, y) \Big|_{t_{\max}} - Q(x, y) \Big|_{t_{\min}}}{dt} + \frac{\oint_l \bar{F}_a(x, y) d\vec{n}}{dA}. \quad (6)$$

По теореме Остроградского-Гаусса $\oint_l \bar{F}_a(x, y) d\vec{n} = -\text{div} \bar{F}_a(x, y) d\vec{n}$. Знак «минус» обусловлен выбором положительного направления нормали (внутрь контура), интеграл заменен произведением в силу бесконечной малости области интегрирования dA . Окончательно с перестановкой слагаемых получим:

$$\frac{\partial Q(x, y)}{\partial t} + \text{div} \bar{F}_a(x, y) = e(x, y) - p(x, y), \quad (7)$$

где $e - p$ имеет смысл эффективного испарения, отнесенного к единице площади; все члены уравнения (7) имеют размерность $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$. В представленном виде (7) полностью эквивалентно стандартному уравнению водного баланса атмосферы (см., например, уравнение (1) в работе [1]).

Таким образом, «увлажнение территории», понимаемое величиной, обратной эффективному испарению $E - P$, может быть получено как остаток в балансовом уравнении (5). Для этого необходимо регулярно, с удовлетворительной

периодичностью, восстанавливать величины $Q(x,y)$ и $\overline{F}_a(x,y)$. Важно, что «увлажнение территории» будет вычислено интегрально по всей площади A , что выгодно отличает эту величину от данных наземных станций наблюдений, и интегрально по интервалу времени наблюдения $[t_{\min}, t_{\max}]$, что выгодно отличает ее от «мгновенных» спутниковых оценок интенсивности осадков. Дополнительно отметим, что величину $Q(x,y)$ (общее содержание атмосферной влаги в вертикальном столбе единичной площади) достаточно знать только на концах временного интервала, а величину $\overline{F}_a(x,y)$ (интегрированный по высоте поток атмосферной влаги) — только на границе l области A . Однако, как будет видно из дальнейшего описания подхода, алгоритмически проще и универсальнее реализовать расчет обеих величин на регулярной координатной сетке с постоянным шагом по времени.

Кроме того, при рассмотрении годовых интервалов времени (для устранения сезонного хода и в целях сопоставления с независимо измеряемыми характеристиками, например, годовым речным стоком) слагаемое в левой части уравнения (4) можно считать в первом приближении равным нулю. Тогда «увлажнение территории» $P-E$ определяется левым слагаемым в правой части уравнения (4) — «накопленной конвергенцией». Определяющий вклад в «накопленную конвергенцию» дает горизонтальный перенос водяного пара, масса которого в вертикальном столбе атмосферы превышает на один-два порядка массу воды в других фазовых состояниях. В связи с этим под $a(x,y,z)$ будем понимать абсолютную влажность воздуха (массу водяного пара в единичном объеме), а под $Q(x,y)$ — интегральное влагосодержание атмосферы, соответственно.

Восстановление интегрального влагосодержания над сушей по данным спутникового радиотеплового зондирования

Для мониторинга полей атмосферных параметров из космоса традиционно применяются многоканальные СВЧ спектрометры-поляриметры [16, 17]. При этом задачу восстановления полей интегрального влагосодержания атмосферы над океаном можно считать на фундаментальном уровне успешно решенной [18]. Точность получаемых значений удовлетворяет критериям, предъявляемым большинством практических приложений, а основные потребности текущего этапа развития заключаются в улучшении пространственно-временной детальности наблюдений. Это обусловлено, прежде всего, тем обстоятельством, что свойства подстилающей поверхности в системе «океан-атмосфера» могут быть описаны малопараметрической моделью, включающей температуру и соленость поверхностного слоя океана, а также шероховатость поверхности, параметризованную скоростью приводного ветра [18]. Важно также, что в терминах этих параметров поверхность океана является достаточно однородной на масштабах пятна разрешения.

Ситуация радикально меняется при переходе к системе «суша-атмосфера». В этом случае подстилающая поверхность характеризуется большим разнообразием свойств, способных резко меняться на пространственных масштабах,

существенно меньших пятна разрешения спутниковых приборов (растительный покров, почвенный покров, грунты, области открытой воды, снежный покров, антропогенные объекты и т.д.) и испытывающих специфические изменения в диапазоне от внутрисуточных до межгодовых интервалов времени.

Задача восстановления интегрального влагосодержания над сушей требует дальнейшего развития и совершенствования методик обработки данных спутниковых СВЧ спектрометров-поляриметров, которые остаются одним из наиболее перспективных средств дистанционного мониторинга полей атмосферных параметров в силу известных свойств всепогодности, круглосуточности и возможности обеспечить полное покрытие поверхности Земли наблюдениями за одни сутки при одновременном использовании двух-трех идентичных приборов. Рассмотрим методы восстановления влагосодержания с помощью различных спутниковых приборов.

AMSR

Методика восстановления интегрального влагосодержания по данным приборов серии AMSR метеорологического агентства JAXA – AMSR-E на спутнике Aqua [19] и AMSR2 на спутнике GCOM-W1 [20] развита в работах [21, 22]. Одной из важных особенностей приборов этой серии была возможность приема излучения на двух перпендикулярных поляризациях на близких частотах 18,7 и 23,8 ГГц по разные стороны от линии резонансного поглощения водяного пара 22,235 ГГц. Поляризационные контрасты, формируемые подстилающей поверхностью на этих двух частотах, по-разному ослабляются в атмосфере за счет поглощения части излучения водяным паром. В итоге измеряемое со спутника соотношение этих контрастов характеризует общее содержание водяного пара в атмосфере. Качество восстановления интегрального влагосодержания по разработанной методике оценивалось путем сопоставления с данными независимых измерений ИК зондировщиком AIRS. Установлено, что корреляция двух рядов данных составляет $r = 0,91$ при среднеквадратичной невязке 4,94 кг/м².

Специального анализа того, какой из рядов данных содержал погрешности, обусловившие больший вклад в итоговую невязку, не проводился. Сложность такого анализа связана, в частности, с тем, что методика обработки данных AIRS обеспечивает восстановление вертикальных профилей удельной влажности, которые требуют пересчета в интегральное влагосодержание, а при оценке качества результатов обработки данных AIRS выполнялось сопоставление самих вертикальных профилей с данными радиозондов и реанализа [23]. Следует также отметить, что расчеты по данным AIRS затруднены или невозможны в условиях облачности.

Поля интегрального влагосодержания атмосферы по данным AMSR-E/2 строились дважды в сутки на сетке с пространственным шагом 25 км [21, 22]. С точки зрения рассматриваемой ниже методики восстановления полей адвекции водяного пара, основным недостатком этих данных было неполное покрытие Земли суточными измерениями, обусловленное тем, что оба прибора функционировали на орбите в единственных экземплярах на неперекрывающихся интервалах времени.

МТВЗА

Российские приборы серии МТВЗА-ГЯ [24], устанавливаемые на спутниках серии Метеор-М, обладают с точки зрения набора спектральных каналов расширенными возможностями по сравнению с представленными выше приборами серии *AMSR*. Данные МТВЗА-ГЯ в целом характеризуются высоким качеством измерений и имеют большие перспективы использования в различных приложениях, например, [25—28]. Однако их широкому использованию препятствует отсутствие свободно распространяемых продуктов стандартных уровней обработки, в частности полей калиброванных яркостных температур с точной географической привязкой. Авторы данной работы входят в состав научного коллектива, последовательно реализующего этапы создания таких продуктов [29, 30] и их распространения на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» [31].

SSM/I

Приборы серии *SSM/I* [32], устанавливавшиеся на спутниках серии *DMSP* (NASA, США), долгое время оставались эталоном долгосрочных стабильных однородных по качеству СВЧ-радиометрических измерений. В разные годы на орбите присутствовало до трех экземпляров *SSM/I*, функционирующих одновременно. Это гарантировало полное покрытие Земли измерениями дважды в сутки (на восходящих и нисходящих частях орбит). Основной проблемой приборов *SSM/I* с точки зрения задачи восстановления интегрального влагосодержания атмосферы над сушей являлось отсутствие возможности приема горизонтально поляризованного излучения на частоте 22,235 ГГц (по аналогии с каналом 23,8 ГГц приборов *AMSR*). Анализ длинных рядов данных *SSM/I* в сопоставлении с синхронными и пространственно-совмещенными данными *AMSR* показал [33], что получение общей картины распределения интегрального влагосодержания атмосферы над сушей хотя и возможно, однако среднеквадратичная невязка между указанными рядами данных составляет около 10 кг/м², что неприемлемо для большинства приложений.

SSMIS

Для восстановления интегрального влагосодержания атмосферы (*precipitable water vapor, PWV*) традиционно используются измерения вблизи линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц. Такие измерения хорошо пригодны для восстановления *PWV* над поверхностью воды, но мало пригодны для восстановления над сушей. Причиной этого является большая величина излучательной способности покровов суши и достаточно слабая поглощающая способность атмосферы в области 22 ГГц. Изменение излучения атмосферы водяным паром на 22 ГГц практически невозможно различить на фоне ярких покровов суши, обладающих сильной изменчивостью излучательной способности.

Решением данной проблемы может быть использование дополнительных измерений на частотах с более сильным поглощением в атмосферном водяном паре в диапазоне 150–200 ГГц. Такой возможностью обладают радиометры серии

SSMIS, функционирующие одновременно на нескольких спутниках (DMSP F16, F17, F18), и выполняющие наблюдения в близкое местное время. SSMIS имеет 24 радиометрических канала на частотах от 19 до 200 ГГц и конический тип сканирования под углом 53° [34].

Для восстановления PWV по данным SSMIS могут быть использованы два подхода: физический и статистический. Физический подход заключается в решении некорректной обратной задачи на основе модели переноса излучения и дополнительной априорной информации о состоянии подстилающей поверхности. Статистический — в установлении функциональной зависимости различными математическими методами между одновременными спутниковыми измерениями излучения и подспутниковыми независимыми измерениями водяного пара. В настоящий момент статистический подход становится одним из основных в решении подобных задач благодаря большому объёму накопленных метеорологических данных наземных станций и продуктов их обработки. В данной работе была использована технология искусственных нейронных сетей (ИНС) как одна из наиболее перспективных современных реализаций статистического метода восстановления.

Для восстановления PWV авторами использовалась схема ИНС прямого распространения с 10 нейронами в скрытом слое с передаточной функцией *tanh* (Рис. 1).

В качестве входов ИНС или предикторов использовались данные TDR Base (L1A) SSMIS F16-F18 каналов 1—18 и высота рельефа с флагом типа поверхности. Всего 20 входов. Выход у ИНС единственный — значение PWV. Для обучения ИНС использовались данные реанализа ECMWF Era 5 за 2020 год. Реанализ Era5 был использован как наиболее современный реанализ ECMWF, имеющий временное разрешение 1 час и пространственное разрешение 0,25°×0,25°, которое соответствует спутниковому разрешению [35]. Выполнялось точное пространственное совмещение между спутниковыми данными и данными реанализа и совмещение по времени в пределах ±15 мин. Размер обучающей выборки составил

Ch. No.	Center Frequency (GHz)	Pass Band (MHz)	Polarization	NE?† (K)
1	50.3	400	H	0.4
2	52.8	400	H	0.4
3	53.596	400	H	0.4
4	54.4	400	H	0.4
5	55.5	400	H	0.4
6	57.29	350	*	0.5
7	59.4	250	*	0.6
8	150.0	1500	H	0.88
9	183.31±6.6	2500	H	1.2
10	183.31±3	100	H	1.0
11	183.31±1	500	H	1.25
12	19.35	400	H	0.7
13	19.35	400	V	0.7
14	22.235	400	V	0.7
15	37.0	1500	H	0.5
16	37.0	1500	V	0.5
17	91.655	3000	V	0.9
18	91.655	3000	H	0.9

+

- Высота поверхности
- Флаг типа поверхности

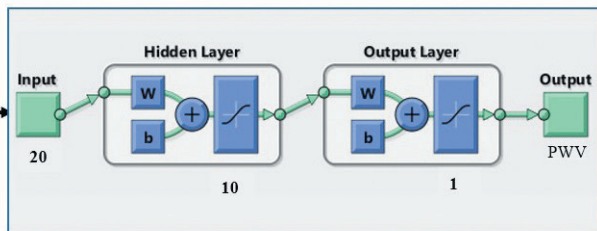


Рис. 1. Схема нейросетевого алгоритма восстановления PWV по данным SSMIS.

Fig. 1 Scheme of a neural network algorithm for PWV recovery from SSMIS data.

5 млн. точек. Для тестирования сети использовались 3 млн. точек измерений SSMIS, совмещённых с данными Era 5. Данные, входящие в выборки, были отобраны в течение 2020 года случайно, но с равномерным распределением географически и по времени. Реанализ Era5 усваивает данные об интегральном паросодержании атмосферы, полученные с микроволновых спутниковых радиометров: AMSR-2, AMSRE, GMI, SSM/I, SSMIS, TMI (<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation#ERA5:datadocumentation-Observations>).

По результатам тестирования точность (среднеквадратичная невязка с данными реанализа) восстановления PWV предложенным нейросетевым алгоритмом над всеми типами поверхности составила 2,4 мм (рис. 2 *а*), а над сушей — около 3 мм (рис. 2 *б*).

Вопрос возникновения высоких значений PWV над сушей заслуживает особого рассмотрения. В рамках настоящей статьи, главная цель которой — описание общей концепции предлагаемого подхода, остановимся на нем лишь кратко.

Рис. 3 иллюстрирует пространственное распределение высоких значений PWV по данным реанализа Era5 (из выборки, использованной для обучения

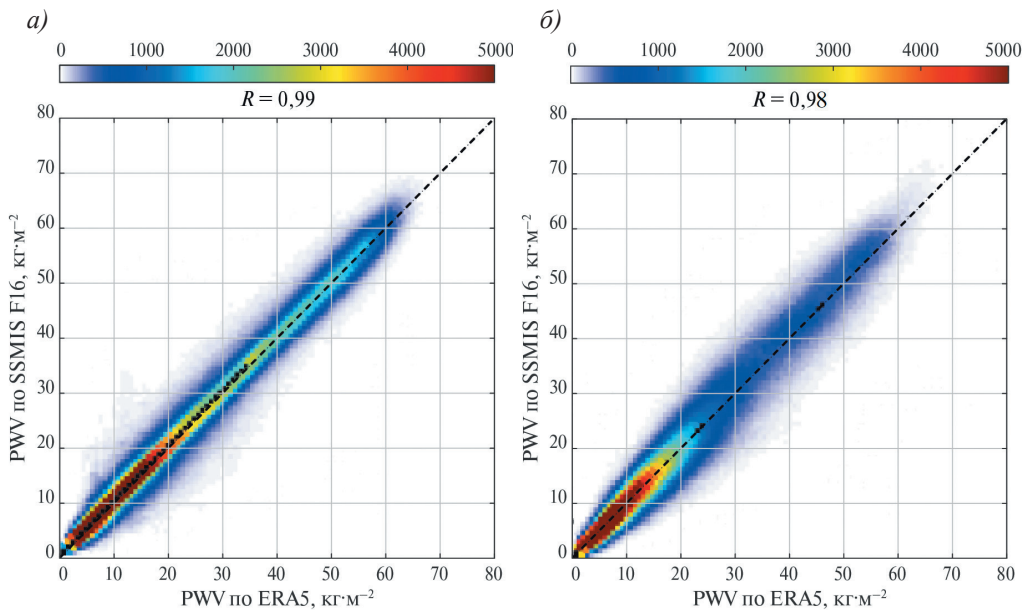


Рис. 2. Скаттерограмма значений интегрального влагосодержания атмосферы, восстановленных по данным SSMIS F16 (вертикальная шкала), и по данным реанализа Era5 (горизонтальная шкала): *а*) над всем Земным шаром, *б*) над сушей; цветом обозначено число пар соответствующих значений (цветовая шкала — сверху).

Fig. 2. Scatter diagram of precipitable water vapor values retrieved from SSMIS F16 data (vertical axis) and according to Era5 reanalysis (horizontal axis): *a*) over the entire globe, *b*) over land; dot color indicates the number of pairs of corresponding values (color scale — above).

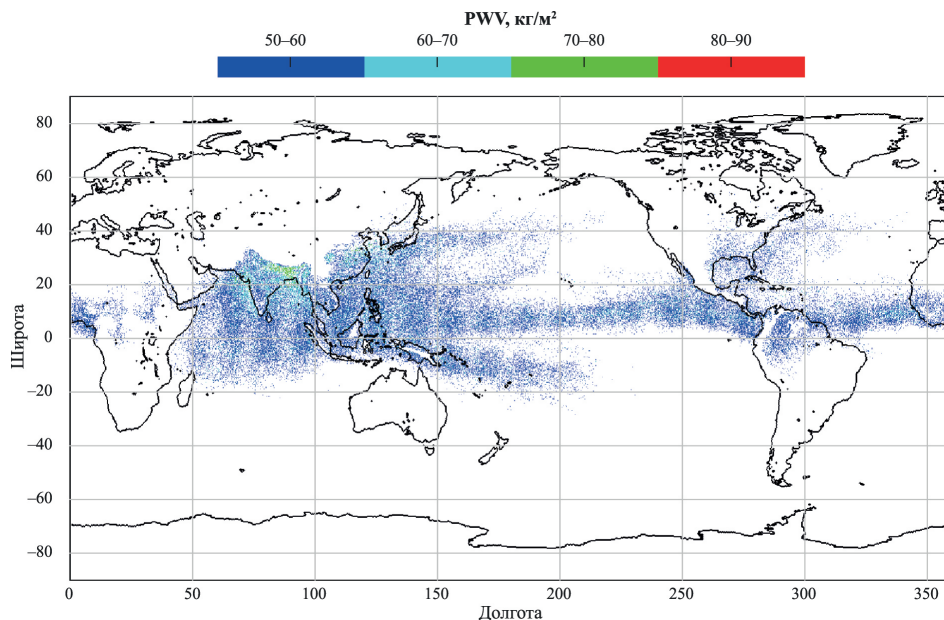


Рис. 3. Географическое распределение высоких значений интегрального влагосодержания по данным реанализа Era5, использованным при обучении нейросети.

Fig. 3. Geographical distribution of high PWV values by Era5 reanalysis data used to perform neural network learning.

нейросети). Нетрудно увидеть, что экстремальные оценки PWV в основном сосредоточены в зоне внутритропической конвергенции (ВЗК) над Мировым океаном, особенно в западной части Тихого океана.

Из рис. 3 также видно, что области высоких значений PWV над сушей географически соответствуют областям ВЗК (Центральная Америка, Африка), зоне влияния сильных муссонов (Индия и предгорья Гималаев), зонам формирования мощных атмосферных рек и тропических циклонов (Юго-восточная Азия, территории вокруг Мексиканского залива).

Восстановление вертикально-интегрированного горизонтального потока водяного пара по данным спутникового радиотепловидения

Общие замечания

Принципиальная возможность восстановления вертикально-интегрированных горизонтальных потоков водяного пара по данным спутникового радиотепловидения показана в работе [36]. Суть методики состоит в вычислении такого поля скорости горизонтального переноса, которое оптимальным образом описывает последовательную трансформацию полей интегрального влагосодержания, выстроенных в хронологическом порядке, при дополнительных ограничительных

требованиях (непрерывности, гладкости). Эта скорость и принимается за эффективную скорость $\vec{u}_{\text{эф}}$, связывающую интегрированный по высоте горизонтальный поток влаги \vec{F}_a с интегральным влагосодержанием Q простым соотношением $\vec{F}_a = Q\vec{u}_{\text{эф}}$. В такой постановке задача расчета \vec{F}_a при известных в последовательные моменты времени полях Q сводится к расчету смещений элементов этих полей, имевших место на интервалах времени между наблюдениями, т.е. к расчету такого поля смещений, которое описывает переход поля Q_1 в более ранний момент времени наблюдений к новому полю Q_2 в следующий момент времени, отстоящий от предыдущего на известный интервал Δt . Делением этого расстояния на время получаем оценку u .

Реализующие такой подход алгоритмы в системах технического зрения получили название «анализа оптического потока». Одновременное восстановление полей интегрального влагосодержания атмосферы и эффективной (взвешенной по высоте) скорости горизонтального переноса водяного пара обеспечивает расчет интегрированных по высоте горизонтальных потоков водяного пара [37]. Эффективность подхода была продемонстрирована путем его применения к анализу различных процессов в системе «океан-атмосфера»: тропических циклонов [38, 39], атмосферных рек [40], глобальной атмосферной циркуляции водяного пара [41]. Сложность перехода к атмосферным процессам над сушей состоит в том, что в этом случае существенно (в разы) ниже оценки интегрального влагосодержания и скорости адвекции, в связи с чем требования к точности оценок (соотношению сигнал/шум) значительно возрастают. Это, в частности, приводит к необходимости более тщательного выбора и реализации метода анализа оптического потока.

Сравнение методов анализа оптического потока

В современных компьютерных системах и системах обработки изображений часто возникает задача отслеживания перемещения объектов и оценки соответствующей скорости перемещения в трех- или двухмерном пространстве. Для решения такой задачи существует множество подходов, и один из них — использование алгоритмов анализа оптического потока. Оптический поток — это «воспринимаемое» движение объектов, поверхностей или краев сцены, возникающее как в результате перемещения проекции объекта на плоскость изображения, так и смещения наблюдателя относительно сцены. Суть анализа оптического потока состоит в установлении соответствия между каждой точкой исходного изображения и некоторой точкой последующего изображения, в которую переместилась первая точка за интервал времени между изображениями. В работе [42] оптический поток определяется как векторное поле, где каждый вектор показывает перемещение отдельной точки между двумя последующими изображениями, «кадрами».

Библиотека алгоритмов компьютерного зрения и обработки изображений OpenCV (англ. Open Source Computer Vision Library, библиотека компьютерного зрения с открытым исходным кодом) [43] предлагает реализацию нескольких популярных и наиболее производительных алгоритмов, к которым относятся алгоритм Лукаса-Канаде и алгоритм Фарнебака.

Метод Лукаса-Канаде основан на приближении функции яркости через разложение Тейлора до первого члена [44] и относительно хорошо работает для небольших перемещений, используя многоуровневую обработку для регистрации больших объектов. В библиотеке OpenCV метод реализован как «разреженный» (sparse), что подразумевает вычисление значений векторов перемещения не на каждой точке растра, а на выбранных (рекомендуется использование специальной функции для выбора «хороших») точках. К преимуществам данного метода можно отнести: формализованные средства выбора точек для отслеживания; автоматическую селекцию корректных результатов; отслеживание малых и больших перемещений (многомасштабность). Недостатки метода Лукаса-Канаде связаны с невозможностью расчетов на гладких участках изображений, не содержащих особенностей, подходящих под критерии выбора точек, и, как следствие, большое количество пустых участков или нулевых значений оптического потока в таких областях.

Алгоритм Фарнебака, предложенный в [45], в отличие от алгоритма Лукаса-Канаде, использует квадратичную форму разложения с целью повышения точности и также реализован в многомасштабной модели. В библиотеке OpenCV метод реализован как плотный (dense), что означает вычисление значений векторов перемещения на каждой точке растра. Преимущества данного алгоритма заключаются в вычислении плотного оптического потока (в каждой точке исходного изображения), лучших (чем в методе Лукаса-Канаде) результатов для небольшого и среднего перемещений. К недостаткам этого алгоритма относятся появление артефактов при больших смещениях, когда наблюдаемое изменение интерпретируется как «растворение» объекта и возможна некорректная интерпретация малоконтрастных участков как неподвижных, даже если движение их краёв корректно определено.

Необходимо особо выделить алгоритм DIS (Dense Inverse Search), предложенный в работе [46]. В нем также применяется многомасштабный подход, но вместо независимого расчёта на каждой итерации алгоритма вычисления оптического потока рассчитывается промежуточное плотное поле перемещений, что повышает сглаженность и уменьшает количество фрагментов на более крупных масштабах, повышая производительность. На каждом масштабном уровне используется дополнительная быстрая вариационная корректировка вычисленного потока. Критерием коррекции выступает мера энергии, состоящая из взвешенной суммы компонент, первая из которых отвечает за точность соответствия, а вторая — за гладкость поля перемещений. Применяется также ряд дополнительных полуэмпирических критериев оценивания качества итогового оптического потока.

Преимуществами комбинированного метода DIS для нашей задачи являются вычисление плотного оптического потока (в каждой точке исходного изображения), вариационная корректировка с критерием гладкости, уменьшающая число и величину «выбросов», что обеспечивает более высокую итоговую точность, возможность анализа большого диапазона масштабов смещений за счет субпиксельной интерполяции для малых масштабов и анализа пирамиды изображений (пространственного сглаживания), сравнительно высокая скорость обработки,

что позволяет эффективно проводить анализ длинных рядов. Следует отметить, что в результатах обработки по данному алгоритму также присутствуют, хотя и в меньших количествах, чем в других рассмотренных алгоритмах, ошибочные нулевые значения смещений.

Авторами было проведено сравнение горизонтальных потоков водяного пара, восстановленных по спутниковому радиотепловидению (СРТВ), включавшему алгоритм DIS, и реанализу ECMWF Era5, которое представлено на рис. 4. Era5 является последним поколением реанализа ECMWF. В нём собраны глобальные поля двумерных и трёхмерных распределений различных геофизических характеристик на регулярной сетке координат с пространственным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ и временным разрешением 1 час. В частности, зональная компонента потока атмосферного водяного пара представлена в данных Era5 непосредственно в переменной с названием «Vertical integral of eastward water vapour flux»; меридиональная — в переменной «Vertical integral of northward water vapour flux». Доступ к данным реанализа осуществлялся через сервис Copernicus Climate Data Store.

Из рис. 4 *а* видно, что соответствие между потоками СРТВ и реанализа для зональных компонент достаточно высокое, корреляция между ними около 0,7.

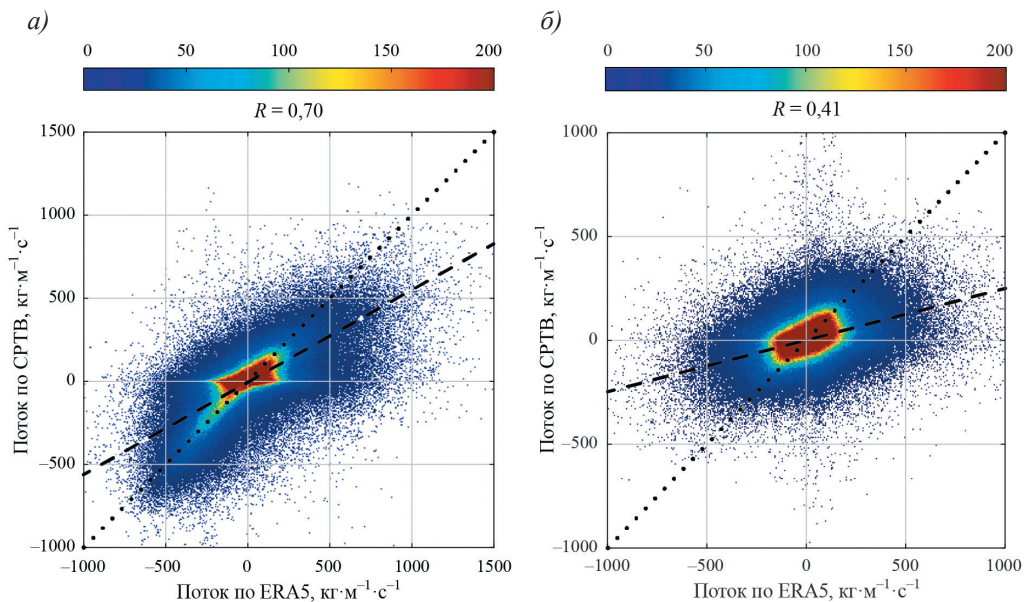


Рис. 4. Сравнение потоков водяного пара, восстановленных по СРТВ и реанализу ECMWF Era5 для: *а*) зональной компоненты, *б*) меридиональной компоненты; цветом обозначено число пар соответствующих значений (цветовая шкала сверху).

Fig. 4. Comparison of water vapor fluxes retrieved from SRTV and ECMWF Era5 reanalysis for: *a*) zonal component, *b*) meridional component; dot color indicates the number of pairs of corresponding values (color scale above).

Для меридиональных компонент потока водяного пара корреляция с реанализом Era5 слабая. Главным образом это вызвано тем обстоятельством, что наиболее активное перемещение водяного пара в атмосфере происходит в зональном направлении в соответствии с общей структурой глобальной атмосферной циркуляции, поэтому зональная компонента движения лучше определяется алгоритмами оптического потока, и для нее соотношение сигнал/шум оказывается гораздо выше. Меридиональный перенос намного слабее и может теряться на фоне шумов и артефактов как спутниковых данных, так и алгоритмов оценки движения. Расхождение оценок по СРТВ и реанализу частично вызвано тем обстоятельством, что применяемые в СРТВ алгоритмы анализа потока в некоторых случаях (например, высокой однородности полей PWV) дают ошибочные нулевые значения, что особенно четко видно на рис. 4 а. Это обстоятельство обсуждено выше. Минимизация этой ошибки — предмет дальнейших исследований авторов в части выбора и совершенствования применяемого алгоритма анализа оптического потока.

На рис. 5 представлено пространственное распределение экстремально высоких потоков водяного пара (выше $500 \text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$) по данным реанализа Era5, использованным для построения рис. 4. Нетрудно заметить, что географически эти потоки приурочены либо к зоне внутритропической конвергенции, либо к областям частого формирования атмосферных рек [47—53], где такие значения вполне типичны. Эти области в основном относятся к системе «океан-атмосфера» за исключением отдельных случаев, требующих дополнительного анализа. В тоже время мы видим, что довольно большое число оценок горизонтального потока влаги отмечается в умеренных и даже северных широтах над сушей (например,

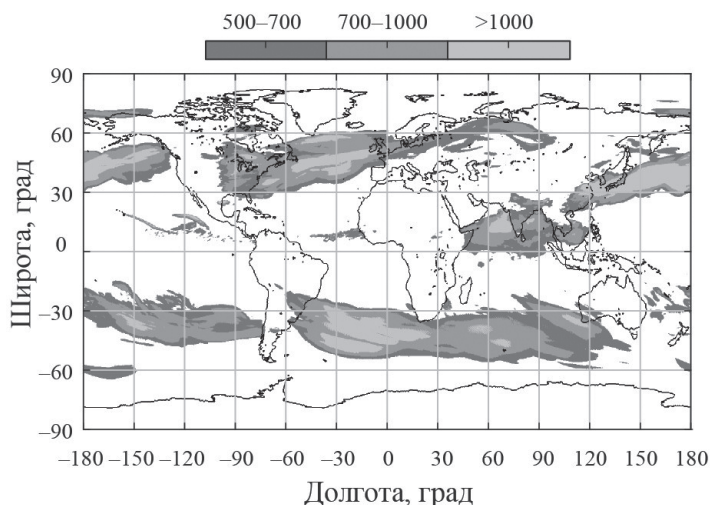


Рис. 5. Географическое распределение высоких значений зональных горизонтальных потоков водяного пара по реанализу ECMWF Era5 в $\text{кг/м}^2\cdot\text{с}$.

Fig. 5. Geographical distribution of high values of horizontal fluxes of water vapor according to Era5 reanalysis в $\text{кг/м}^2\cdot\text{с}$.

в приполярной области ЕТР и Западной Сибири), где эти потоки почти на порядок меньше, поэтому данный вопрос требует дальнейшего изучения.

Таким образом, в целом предложенная концепция предлагает новую схему анализа водного баланса территорий, замкнутую на данных спутникового микроволнового зондирования Земли. Составляющие эту схему блоки реализованы авторами, их развитие и совершенствование напрямую связаны с актуальными и активно развивающимися в настоящее время задачами ДЗЗ, в частности, задачами улучшения точности восстановления полей атмосферной влажности над сушей и полей атмосферной циркуляции над всеми типами подстилающей поверхности по дистанционным данным.

Заключение

В работе сформулирована общая концепция анализа элементов регионального гидрологического баланса на основе подхода спутникового радиотепловидения. Ее важным достоинством по сравнению к подходам, использующим данные аэрологических измерений, является опора на регулярные, однородные, плотные по пространству и достаточно частые по времени фактические спутниковые наблюдения. В этом смысле такой подход создает важную альтернативу/дополнение подходам на базе численного моделирования климатической системы.

Можно выделить следующие основные шаги алгоритмизации анализа элементов гидрологического баланса по формулам (1—4):

1) расчет общего количества водяного пара ($\sum_s PWV$), содержащегося над заданной областью, в течение рассматриваемого интервала времени;

2) расчет эффективной конвергенции/дивергенции вертикально-интегрированного горизонтального потока водяного пара, прошедшего через внешние контуры области за рассматриваемый интервал времени;

3) решение уравнения водного баланса атмосферы, в котором недостаток/избыток водяного пара в конечный момент времени по сравнению с зарегистрированным ранее обусловлен разностью между выпавшей в виде осадков и испарившейся с данной территории влагой («эффективное увлажнение»).

Эффективность подхода в значительной степени определяется точностью восстановления полей интегрального влагосодержания над сушей и на их основе — полей горизонтального переноса водяного пара. Указанные направления исследований являются актуальными задачами спутникового дистанционного зондирования Земли. В этих направлениях отмечается неуклонный прогресс, связанный как с развитием и выводом на орбиту новых средств наблюдений, так и с совершенствованием методов анализа получаемых данных. Таким образом, следует ожидать, что развиваемый на их базе подход к анализу элементов гидрологического баланса будет приобретать все большую значимость и охватывать все более широкий спектр прикладных и фундаментальных задач.

По мере накопления и обработки данных спутникового радиотеплового мониторинга этот подход будет распространяться как на различные области (бассейны крупных рек; земледельческие районы; другие территории), так и на более

длинные интервалы времени. В настоящее время анализ может быть осуществлен на интервалы времени порядка полутора десятилетий. Это позволит более эффективно и надежно выделять погодно-климатические аномалии и в перспективе давать краткосрочные прогнозы развития региональных и локальных рисков наводнений, засух, пожароопасных ситуаций. В ближайшие планы авторов входит анализ на базе предложенного подхода элементов гидрологического баланса ряда территорий в России (бассейны Оби, Амура, других крупных рек; республика Адыгея, Алтайский край) и за рубежом.

Список литературы

1. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Влияние влагообмена в Северной Атлантике на увлажнение Европейской части России и годовой сток Волги // Водные ресурсы. 2019. Т. 46(3). С. 318—332. DOI: 10.31857/S0321-0596463318-332.
2. Добровольский С. Г. Климатические изменения в системе «гидросфера–атмосфера». М.: ГЕОС, 2002. 232 с.
3. Добровольский С. Г. Глобальные изменения речного стока. М.: ГЕОС, 2011. 660 с.
4. Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe: an Overview of the last decade. EEA Technical Report. Copenhagen: European Environment Agency, 2010. 144 p.
5. Kauffeldt A., Wetterhall F., Pappenberger F., Salamon P., Thielen J. Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level // Environmental Modelling & Software, 2016. V. 75. P. 68—76. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.09.009>.
6. Thielen J., Bartholmes J., Ramos M.H., de Roo A. The European flood alert system — part 1: concept and development // Hydrology and Earth System Sciences, 2009. V. 13(2). P. 125—140. DOI: 10.5194/hess-13-125-2009.
7. Bartholmes J. C., Thielen J., Ramos M. H., Gentilini S. The European flood alert system EFAS — Part 2: Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts // Hydrology and Earth System Sciences, 2009. V. 13(2). P. 141—153. <https://doi.org/10.5194/hess-13-141-2009>.
8. Асмус В. В., Бедрицкий А. И., Стасенко В. Н., Тасенко С. В., Успенский А. Б. Развитие в Росгидромете космической подсистемы наблюдений и системы геофизического мониторинга // Метеорология и гидрология. 2017. № 7. С. 35—49.
9. Семенов Е. К., Соколина Н. Н., Татаринич Е. В., Тудрий К. О. Синоптические условия формирования катастрофического наводнения на Амуре в 2013 г. // Метеорология и гидрология. 2014. № 8. С. 25—34.
10. Болгов М. В., Трубецкова М. Д., Филиппова И. А., Харламов М. А. Особенности выпадения экстремальных осадков в бассейне реки Амур летом 2013 г. // География и природные ресурсы. 2017. № 2. С. 37—45. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(37-45).
11. Крыжов В. Н., Вильфанд Р. М. Макрометеорологические условия формирования сильных осадков в бассейне р. Амур в июне — сентябре 2013 г. и успешность их прогнозирования / Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации: сб. докл. М.: Росгидромет. 2014. С. 40—53.
12. Махинов А. Н., Ким В. И., Воронов Б. А. Наводнение в бассейне Амура 2013 года: причины и последствия // Вестник ДВО РАН. 2014. № 2(174). С. 5—14.
13. Малинин В. Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб.: РГГМИ, 1994. 154 с.
14. Смирнов Н. П., Малинин В. Н. Водный баланс атмосферы как гидрологическая задача. Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. 189 с.
15. Малинин В. Н. Влагообмен в системе океан–атмосфера. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. 197 с.
16. Кутуза Б. Г., Данильчев М. В., Яковлев О. И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНАД, 2016. 336 с.
17. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.

18. Wentz F. A well-calibrated ocean algorithm for Special Sensor Microwave/Imager // *Journal of Geophysical Research*. 1997. V. 102(C4). P. 8703—8718. <https://doi.org/10.1029/96JC01751>.
19. Koike T., Nakamura Y., Kaihotsu I. et al. Development of an Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) algorithm of soil moisture and vegetation water content // *Proceedings of Hydraulic Engineering*, 48, 217—222, 2004 DOI: <https://doi.org/10.2208/prohe.48.217/>.
20. Imaoka K., Maeda T., Kachi M. et al. Status of AMSR2 instrument on GCOM-W1. Proc. SPIE 8528, Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization II, 852815 (9 November 2012); <https://doi.org/10.1117/12.977774>.
21. Du J., Kimball J. S., Jones L. A. Satellite microwave retrieval of total precipitable water vapor and surface air temperature over land from AMSR2 // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2015. V. 53(5). P. 2520—2531. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6953129>.
22. Du J., Kimball J. S., Jones L. A. et al. A global satellite environmental data record derived from AMSR-E and AMSR2 microwave Earth observations // *Earth System Science Data*. 2017. V. 9. N. 2. P. 791—808. <https://doi.org/10.5194/essd-9-791-2017>.
23. Divakarla M. G., Barnet C. D., Goldberg M. D. et al. Validation of Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapor retrievals with matched radiosonde measurements and forecasts // *Journal of Geophysical Research*, 2006. V. 111(D9). D09S15. <https://doi.org/10.1029/2005JD006116>.
24. Болдырев В. В., Горобец Н. Н., Ильгасов П. А. и др. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВ3А-ГЯ // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2008. В.5. Т.1. С. 243—248.
25. Чернявский Г. М., Митник Л. М., Кулешов В. П. и др. В. Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника «Метеор-М» № 2 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 4. С. 78—100. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100.
26. Пашинов Е. В. Восстановление интегрального паросодержания атмосферы по данным прибора МТВ3А-ГЯ («Метеор-М» № 2) над поверхностью океана // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 4. С. 225—235. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235.
27. Митник Л. М., Митник М. Л., Гурвич И. А., Выкочко А. В., Кузлякина Ю. А., Черный И. В., Чернявский Г. М. Исследование эволюции тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана по данным СВЧ-радиометров МТВ3А-ГЯ со спутника Метеор-М №1 и AMSR-E со спутника Aqua // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. №4. С. 121—128.
28. Крамчанинова Е. К., Успенский А. Б. Определение приповерхностной температуры воздуха над сушей по данным микроволнового зондирования с ИСЗ «Метеор-М» № 1 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. №3. С. 127—136.
29. Сазонов Д. С. Алгоритм восстановления температуры поверхности океана, скорости приводного ветра и интегрального паросодержания по данным МТВ3А ГЯ // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. №1. С. 50—64. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-50-64, http://d33.infospace.ru/jr_d33/2022v19n1/50-64.pdf/.
30. Садовский И. Н., Сазонов Д. С. Географическая привязка данных дистанционных радиометрических измерений МТВ3А-ГЯ // *Исследование земли из космоса*. 2022. № 6. С. 101—112. DOI: 10.31857/S0205961422060100/.
31. Ермаков Д. М., Кузьмин А. В., Мазуров А. А. и др. Концепция потоковой обработки данных российских спутниковых СВЧ-радиометров серии МТВ3А на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18. № 4. С. 298—303, DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303.
32. Hollinger J. P. DMSP Special Sensor Microwave/Imager Calibration/Validation. Final Report Volume 1. Space Sensing Branch, Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375-5000. 1988. 190 p.
33. Ермаков Д. М., Поляков В. Д., Полякова Е. В. Разработка нового алгоритма восстановления интегрального влагосодержания атмосферы над сушей по данным спутникового радиотеплового мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 1. С. 31—41. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-31-41.

34. Kunkel D. B., Poe G. A., Boucher, D. J. et al. Design and Evaluation of the First Special Sensor Microwave Imager/Sounder // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008. V. 46, P. 863—883. DOI: 10.1109/tgrs.2008.917980.
35. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. 10.1002/qj.3803.
36. Ermakov D. Satellite radiothermvision of atmospheric processes: method and applications. Springer, Cham, 2021. 199 + XXVII p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57085-9>.
37. Ermakov D., Kuzmin A., Pashinov E. et al. Comparison of vertically integrated fluxes of atmospheric water vapor according to satellite radiothermvision, radiosondes, and reanalysis // Remote Sensing, 2021. V. 13, 1639. <https://doi.org/10.3390/rs13091639>.
38. Ermakov D. M., Sharkov E. A., Chernushich A. P. Role of tropospheric latent heat advective fluxes in the intensification of tropical cyclones // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2019, Vol. 55, No. 9, pp. 1254—1265. DOI: 10.1134/S0001433819090172.
39. Ermakov D. M., Sharkov E. A., Chernushich A. P. Satellite radiothermvision analysis of the evolution of a system of interacting typhoons // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. V. 53. N. 9. P. 945—954. DOI: 10.1134/S0001433817090110.
40. Ермаков Д.М., Чернушич А.П. Развитие автоматических алгоритмов детектирования атмосферных рек / Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли — RORSE 2018. ИКИ РАН, 2019. С. 68—75.
41. Ermakov D.M. Global circulation of latent heat in the Earth's atmosphere according to data from satellite radiothermvision // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2018, V. 54, N. 9, P. 1223—1243. DOI: 10.1134/S000143381809013X.
42. Форсайт Д., Понж Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М: Издательский дом «Вильямс». 2004. 465 с.
43. Кэлер А., Брэдки Г. Изучаем OpenCV 3 = Learning OpenCV 3. М.: ДМК-Пресс, 2017. 826 с. ISBN 978-5-97060-471-7.
44. Baker S., Matthews I. Lucas-kanade 20 years on: A unifying framework // International journal of computer vision. Springer, 2004. Vol. 56. P. 221—255.
45. Farneback G. Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion // Image Analysis, 13th Scandinavian Conference, SCIA 2003, Halmstad, Sweden, June 29 — July 2, 2003, Proceedings / ed. Bigün J., Gustavsson T. Springer, 2003. Vol. 2749. P. 363—370.
46. Kroeger T., Timofte R., Dai D., Van Gool L. Fast optical flow using dense inverse search / European conference on computer vision. Springer, 2016. P. 471—488.
47. Dettinger M. D., Ralph F. M., Das T. et al. Atmospheric rivers, floods and water resources of California // Water. 2011. V. 3. N. 2. P. 445—478.
48. Gimeno L., Nieto R., Vazquez M., Lavers D.A. Atmospheric rivers: a mini-review // Frontiers in Earth Science. 2014. V. 2. doi: 10.3389/feart.2014.00002.
49. Leung L. R., Qian Y. Atmospheric rivers induced heavy precipitation and flooding in the western U.S. simulated by the WRF regional climate model // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36, N. 3. L03820. doi: 10.1029/2008GL036445.
50. Matrosov S. Y. Characteristics of landfalling atmospheric rivers inferred from satellite observations over the Eastern North Pacific ocean // Monthly Weather Review. 2013. V. 141. N. 11. P. 3757—3768.
51. Ralph F. M., Dettinger M. D. Storms, floods, and the science of atmospheric rivers // Eos. 2011. V. 92. N. 32. P. 265—272.
52. Ralph F. M., Neiman P. J., Wick G. A. Satellite and CALJET aircraft observations of atmospheric rivers over the eastern North Pacific ocean during the winter of 1997/98 // Monthly Weather Review. 2004. V. 132. N. 7. P. 1721—1745.
53. Ralph F. M., Neiman P. J., Wick G. A. et al. Flooding on California's Russian river: Role of atmospheric rivers // Geophysical Research Letters. 2006. V. 33. N. 13. L13801. doi: 10.1029/2006GL026689.

References

1. Malinin V. N., Gordeeva S. M. Influence of moisture exchange in the North Atlantic on the humidification of the European part of Russia and the annual flow of the Volga. *Vodnyye resursy = Water resources*. 2019;(46):(3):(318—332). (In Russ.). doi: 10.31857/S0321-059646318-332.

2. Dobrovolsky S. G. *Klimaticheskiye izmeneniya v sisteme "gidrosfera–atmosfera" = Climatic changes in the "hydrosphere–atmosphere" system*. Moscow: GEOS. 2002: 232 p. (In Russ.).
3. Dobrovolsky S. G. *Global'nyye izmeneniya rechnogo stoka = Global changes in river runoff*. M.: GEOS. 2011: 660 p. (In Russ.).
4. Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe: an Overview of the last decade. EEA Technical Report. Copenhagen: European Environment Agency, 2010: 144 p.
5. Kauffeldt A., Wetterhall F., Pappenberger F., Salamon P., Thielen J. Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level. *Environmental Modelling & Software*. 2016;(75):68—76. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.09.009>.
6. Thielen J., Bartholmes J., Ramos M.H., de Roo A. The European flood alert system – part 1: concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2009;(13):(2):125—140. doi: 10.5194/hess-13-125-2009.
7. Bartholmes J. C., Thielen J., Ramos M. H., Gentilini S. The European flood alert system EFAS – Part 2: Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts *Hydrology and Earth System Sciences*. 2009;(13):(2):141—153. <https://doi.org/10.5194/hess-13-141-2009>.
8. Asmus V. V., Bedritsky A. I., Stasenko V. N. et al. Development of space observation subsystem and geophysical monitoring system in Roshydromet. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2017;(7):(35—49). (In Russ.).
9. Semenov E. K., Sokolikhina N. N., Tatarinovich E. V., Tudry K. O. Synoptic conditions for the formation of a catastrophic flood on the Amur in 2013. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2014;(8):(25—34). (In Russ.).
10. Bolgov M. V., Trubetskova M. D., Filippova I. A., Kharlamov M. A. Peculiarities of extreme precipitation in the Amur River basin in summer 2013. *Geografiya i prirodnnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2017;(2):(37—45). (In Russ.). doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(37-45).
11. Kryzhov V. N., Vilfand R. M. Macrometeorological conditions for the formation of heavy precipitation in the basin of the river. Amur in June–September 2013 and the success of their forecasting. *Eks-tremal'nyye pavadki v bassejny r. Amur: prichiny, prognozy, rekomendatsii: sb. dokl. M.: Rosgidromet = Extreme floods in the basin of the river. Amur: causes, forecasts, recommendations: Sat. report Moscow: Roshydromet*. 2014:(40—53). (In Russ.).
12. Makhinov A. N., Kim V. I., Voronov B. A. Flooding in the Amur basin in 2013: causes and consequences. *Vestnik DVO RAN = Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2014;(2):(174):(5—14). (In Russ.).
13. Malinin V. N. *Problema prognoza urovnya Kaspiyskogo morya = The problem of forecasting the level of the Caspian Sea*. St. Petersburg: RGGMI. 1994: 154 p. (In Russ.)
14. Smirnov N. P., Malinin V. N. *Vodnyy balans atmosfery kak gidrologicheskaya zadacha. The water balance of the atmosphere as a hydrological problem*. L.: Izd-vo LSU, 1986: 189 p. (In Russ.)
15. Malinin V. N. *Vlagoobmen v sisteme okean–atmosfera = Moisture exchange in the ocean–atmosphere system*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1994: 197 p. (In Russ.)
16. Kutuza B. G., Danilychev M. V., Yakovlev O. I. *Sputnikovyy monitoring Zemli: Mikrovolnovaya radiometriya atmosfery i poverkhnosti = Satellite monitoring of the Earth: Microwave radiometry of the atmosphere and surface*. M.: LENANAD, 2016: 336 p. (In Russ.)
17. Sharkov E. A. *Radioteplovoye distantsionnoye zondirovaniye Zemli: fizicheskiye osnovy = Radiothermal remote sensing of the Earth: physical foundations: in 2 volumes*. V. 1. M.: IKI RAN, 2014: 544 p. (In Russ.)
18. Wentz F. A well-calibrated ocean algorithm for Special Sensor Microwave/Imager. *Journal of Geophysical Research*. 1997;(102):(C4):8703—8718. <https://doi.org/10.1029/96JC01751>.
19. Koike T., Nakamura Y., Kaihotsu I., et al. Development of an Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) algorithm of soil moisture and vegetation water content. *Proceedings of Hydraulic Engineering*, 2004;(48):217—222. doi: <https://doi.org/10.2208/prohe.48.217/>.
20. Imaoka K., Maeda T., Kachi M. et al. Status of AMSR2 instrument on GCOM-W1. *Proc. SPIE 8528, Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization II*, 2012; (852815):(9 November). <https://doi.org/10.1117/12.977774>.
21. Du J., Kimball J. S., Jones L. A. Satellite microwave retrieval of total precipitable water vapor and surface air temperature over land from AMSR2. *IEEE Transactions on Geoscience and*

- Remote Sensing*. 2015;(53):(5):2520—2531. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=6953129>.
22. Du J., Kimball J. S., Jones L. A., et al. A global satellite environmental data record derived from AMSR-E and AMSR2 microwave Earth observations. *Earth System Science Data*. 2017;(9):(2):791—808. <https://doi.org/10.5194/essd-9-791-2017>.
 23. Divakarla M. G., Barnet C. D., Goldberg M. D., et al. Validation of Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapor retrievals with matched radiosonde measurements and forecasts. *Journal of Geophysical Research*, 2006;(111):(D9):(D09S15). <https://doi.org/10.1029/2005JD006116>.
 24. Boldyrev V. V., Gorobets N. N., Ilgasov P. A. et al. Satellite microwave scanner/probe MTVZA-GYa. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2008;(5):(1):(243—248). (In Russ.).
 25. Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P., et al. Microwave sounding of the ocean, atmosphere and land cover according to the data of the Meteor-M satellite No. 2. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2018;(15):(4):(78—100). (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100.
 26. Pashinov E. V. Reconstruction of the integral steam content of the atmosphere according to the data of the MTVZA-GYa instrument (Meteor-M No. 2) over the ocean surface. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2018;(15):(4):(225—235). (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235.
 27. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Gurvich I. A. et al. Part of the Pacific Ocean according to the MTVZA-GYa microwave radiometers from the Meteor-M No. 1 satellite and AMSR-E from the Aqua satellite. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2012; (9):(4):(121—128). (In Russ.).
 28. Kramchaninova E. K., Uspensky A. B. Determination of near-surface air temperature over land based on data of microwave sounding from satellite “Meteor-M” No. 1. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2012; (9):(3):(127—136). (In Russ.).
 29. Sazonov D. S. Algorithm for retrieval of ocean surface temperature, near-water wind speed and integral steam content from MTVZA GN data. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2022;(19):(1):(50—64). (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-50-64, http://d33.infospace.ru/jr_d33/2022v19n1/50-64.pdf/.
 30. Sadovsky I. N., Sazonov D. S. Georeferencing of data from remote radiometric measurements MTVZA-GYa. *Issledovanie zemli iz kosmosa = Earth exploration from space*. 2022; (6):(101—112). (In Russ.). doi: 10.31857/S0205961422060100/.
 31. Ermakov D. M., Kuzmin A. V., Mazurov A. A., et al. The concept of streaming data processing of Russian satellite microwave radiometers of the MTVZA series based on the IKI-Monitoring Center. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2021;(18):(4):(298—303). (In Russ.). doi:10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303.
 32. Hollinger J. P. DMSP Special Sensor Microwave/Imager Calibration/Validation. Final Report Volume 1. Space Sensing Branch, Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375-5000. 1988: 190 p.
 33. Ermakov D. M., Polyakov V. D., Polyakova E. V. Development of a new algorithm for reconstructing the integral moisture content of the atmosphere over land based on satellite radiothermal monitoring data. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2020; (17):(1):(31—41). (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-31-41.
 34. Kunkel D. B., Poe G. A., Boucher, D. J. et al. Design and Evaluation of the First Special Sensor Microwave Imager/Sounder. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008; (46):863—883. doi: 10.1109/tgrs.2008.917980.
 35. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. 10.1002/qj.3803.
 36. Ermakov D. Satellite radiothermography of atmospheric processes: method and applications. Springer, Cham, 2021. 199 + XXVII p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57085-9>.

37. Ermakov D., Kuzmin A., Pashinov E. et al. Comparison of vertically integrated fluxes of atmospheric water vapor according to satellite radiothermvision, radiosondes, and reanalysis. *Remote Sensing*, 2021; (13):1639. <https://doi.org/10.3390/rs13091639>.
38. Ermakov D. M., Sharkov E. A., Chernushich A. P. Role of tropospheric latent heat advective fluxes in the intensification of tropical cyclones // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019; (55):(9):(1254—1265). DOI: 10.1134/S0001433819090172.
39. Ermakov D. M., Sharkov E. A., Chernushich A. P. Satellite radiothermvision analysis of the evolution of a system of interacting typhoons. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017; (53):(9):(945—954). doi: 10.1134/S0001433817090110.
40. Ermakov D. M., Chernushich A. P. Development of automatic algorithms for detecting atmospheric rivers. *Informatsionnyye tekhnologii v distantsionnom zondirovanii Zemli = Information technologies in remote sensing of the Earth - RORSE 2018*. IKI RAS, 2019:68—75. (In Russ.).
41. Ermakov D. M. Global circulation of latent heat in the Earth's atmosphere according to data from satellite radiothermvision. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018; (54):(9):(1223—1243). doi: 10.1134/S000143381809013X.
42. Forsyth D., Ponge J. *Komp'yuternoye zreniye. Sovremennyy podkhod = Computer vision. Modern approach* - M: Williams Publishing House. 2004: 465 p. (In Russ.).
43. Kaler A., Bradsky G. *Learning OpenCV 3 = Learning OpenCV 3*. - M.: DMK-Press, 2017: 826 p. — ISBN 978-5-97060-471-7. (In Russ.).
44. Baker S., Matthews I. Lucas-kanade 20 years on: A unifying framework // *International journal of computer vision*. Springer, 2004; (56):221—255.
45. Farneback G. Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion. *Image Analysis, 13th Scandinavian Conference, SCIA 2003, Halmstad, Sweden, June 29 - July 2, 2003, Proceedings* / ed. Bigün J., Gustavsson T. Springer, 2003; (2749):363—370.
46. Kroeger T., Timofte R., Dai D., Van Gool L. Fast optical flow using dense inverse search. *European conference on computer vision*. Springer, 2016:471—488.
47. Dettinger M.D., Ralph F.M., Das T. et al. Atmospheric rivers, floods and water resources of California. *Water*. 2011; (3): 445—478.
48. Gimeno L., Nieto R., Vazquez M., Lavers D.A. Atmospheric rivers: a mini-review. *Frontiers in Earth Science*. 2014; (2). doi: 10.3389/feart.2014.00002.
49. Leung L.R., Qian Y. Atmospheric rivers induced heavy precipitation and flooding in the western U.S. simulated by the WRF regional climate model. *Geophysical Research Letters*. 2009; (36):(3). L03820. doi: 10.1029/2008GL036445.
50. Matrosov S.Y. Characteristics of landfalling atmospheric rivers inferred from satellite observations over the Eastern North Pacific ocean. *Monthly Weather Review*. 2013; (141):(11): 3757—3768.
51. Ralph F. M., Dettinger M. D. Storms, floods, and the science of atmospheric rivers. *Eos*. 2011; (92):(32):265—272.
52. Ralph F. M., Neiman P. J., Wick G. A. Satellite and CALJET aircraft observations of atmospheric rivers over the eastern North Pacific ocean during the winter of 1997/98. *Monthly Weather Review*. 2004;(132):(7):1721—1745.
53. Ralph F. M., Neiman P. J., Wick G. A. et al. Flooding on California's Russian river: Role of atmospheric rivers. *Geophysical Research Letters*. 2006;(33):(13.) L13801. doi: 10.1029/2006GL026689.

Сведения об авторах

Дмитрий Михайлович Ермаков, доктор физико-математических наук, заведующий отделом, Институт космических исследований РАН; ведущий научный сотрудник, Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, dima@ire.rssi.ru.

Евгений Владимирович Пашинов, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт космических исследований РАН, pashinove@mail.ru.

Алексей Владимирович Кузьмин, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт космических исследований РАН, Alexey.kuzmin@asp.iki.rssi.ru.

Сергей Александрович Втюрин, ведущий программист, Институт космических исследований РАН, vturinsa@gmail.com.

Андрей Петрович Чернушич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, andrey@fireras.su.

Information about authors

Dmitry Mikhailovich Ermakov, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), head of department, Space Research Institute of RAS; leading scientist, Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, dima@ire.rssi.ru.

Evgeny Vladimirovich Pashinov, Ph.D. (Physics and Mathematics), scientist, Head of Laboratory, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, pashinove@mail.ru.

Alexey Vladimirovich Kuzmin, Ph.D. (Physics and Mathematics), leading scientist, Head of Laboratory, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Alexey.kuzmin@asp.iki.rssi.ru.

Sergey Alexandrovich Vtyurin, lead programmer, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, vturinsa@gmail.com.

Andrey Petrovich Chernushich, PhD (Physics and Mathematics), leading scientist, head of laboratory, Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, andrey@fireras.su.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 29.05.2023

Принята к печати после доработки 15.08.2023

The article was received on 29.05.2023

The article was accepted after revision on 15.08.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 493—511.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(72): 493—511.

ОКЕАНОЛОГИЯ

Научная статья

УДК [551.468:574.5]:[504.61+551.583](261.243)

doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-493-511

Влияние климатических изменений и антропогенной деятельности на гидрометеорологический режим и состояние экосистемы Финского залива Балтийского моря

***Екатерина Васильевна Волощук¹, Татьяна Рэмовна Ерёмина¹,
Евгения Кирилловна Ланге², Александр Сергеевич Аверкиев¹***

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

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

Аннотация. В работе исследуется изменчивость гидрометеорологических характеристик и компонентов экосистемы восточной части Финского залива в условиях климатических изменений и антропогенной нагрузки. Выявлены положительные тренды изменчивости температуры воздуха в регионе за период 1991—2020 гг. Наряду с этим по данным наблюдений 1978—2016 гг. отмечается тенденция роста концентрации фосфатов и ухудшение кислородных условий в придонном слое, а термогалинный режим по-прежнему является одним из главных факторов, определяющих структурно-функциональные характеристики фитопланктона в восточной части Финского залива.

Ключевые слова: Финский залив, климат, гидрометеорологические характеристики, изменчивость экосистемы.

Благодарности: Работа выполнена в РГГМУ в рамках госзадания Минобрнауки РФ № FSZU—2023—0002. Статистический анализ данных по фитопланктону выполнен Е. К. Ланге в рамках госзадания ИО РАН №FMWE—2021—0007.

Для цитирования: Волощук Е. В., Ерёмина Т. Р., Ланге Е. К., Аверкиев А. С. Влияние климатических изменений и антропогенной деятельности на гидрометеорологический режим и состояние экосистемы Финского залива Балтийского моря // Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 493—511. doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-493-511.

Original article

Climate change impact and anthropogenic activity on the hydrometeorological regime and the ecosystem of the Baltic Sea

*Ekaterina V. Voloshchuk¹, Tatiana R. Eremina¹,
Evgenia K. Lange², Alexander S. Averkiev¹*

¹ Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St.Petersburg, Russia

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

Summary. The paper studies the variability of hydrometeorological characteristics and components of the ecosystem of the Eastern part of the Gulf of Finland under climatic changes and anthropogenic activity. Positive trends in the variability of air temperature in the region, noted over the past climatic period, are also characteristic of modern conditions in 1991—2020. The rate of warming in the Gulf of Finland is quite high, about 0,58 °C/10 years, while the increase in surface air temperature is observed in all seasons of the year. Along with this, sea level rise is taking place. According to the calculations in the last 40 years the sea level in the Gulf of Finland has been growing by 4,3 mm per year.

Analysis of hydrochemical indicators such as the content of dissolved oxygen and phosphates in the bottom layer showed that the regime of these characteristics in the eastern part of the Gulf of Finland is characterized by significant interannual variability. Oxygen conditions are characterized by a weak trend towards a decrease in the dissolved oxygen content over 40 years. The positive trend in phosphate concentration in the bottom layer is caused by internal load of phosphorus, accumulated in bottom sediments, and its efflux during the hypoxic conditions.

The thermohaline regime continues to be one of the main factors determining the structural and functional characteristics of phytoplankton in the Eastern part of the Gulf of Finland. The observed increase in water temperature did not cause noticeable structural changes in phytoplankton communities during the study period.

Keywords: Gulf of Finland, climate, hydrometeorological characteristics, ecosystem variability.

Acknowledgments: The research presented in this study was realized in Russian State Hydrometeorological University and funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. FSZU—2023—0002. Statistical analysis of phytoplankton data was made within the framework of IO RAS project No. FMWE—2021—0007.

For citation: Voloshchuk E. V., Eremina T. R., Lange E. K., Averkiev A. S. Climate change impact and anthropogenic activity on the hydrometeorological regime and the ecosystem of the Baltic Sea. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(72): 493—511 (In Russ). doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-493-511.

Введение

Балтийское море — полужакрытый бассейн, находящийся под влиянием суши и крупномасштабных атмосферных процессов. Кроме того, Балтийское море является одним из самых больших солоноватых морей в мире. Изучение изменений климата показало, что потепление в регионе Балтийского моря сохраняется и будет продолжаться в течение всего двадцать первого века и отразится в первую очередь на температуре воды и ледовых условиях [1, 2]. Также наблюдаются

изменения в гидрологическом цикле, которые, как ожидается, будут становиться все более ярко выраженными в ближайшие десятилетия. Основными гидрометеорологическими характеристиками, в которых проявляется изменение климата, являлись повышение температуры поверхностного слоя моря, изменение стока рек, возможное распреснение, сокращение длительности ледового периода и площади покрытия льдом [1, 2].

С середины 1980-х гг. положительные тренды температуры поверхности Балтийского моря четко отмечаются по данным натурных наблюдений, дистанционного зондирования, а также по модельным оценкам.

Анализ многолетних данных измерений температуры поверхности воды позволил выделить период, когда рост температуры воды стал значительным. Так, например, на основе ежедневных наблюдений на маяках в датских водах установлено, что десятилетняя скользящая средняя температуры поверхности воды не показывала существенной изменчивости в период с 1904 г. по 1985 г. с текущими средними значениями 8,2—9,1 °С, однако далее до 1998 г. наблюдались значительные изменения и рост скользящего среднего до 9,8 °С, что на 0,7 °С выше такового в предыдущий период [3]. В исследовании [4] показано, что за период с 1982 г. по 2012 г. Балтийское море прогрелось на 1—2 °С с учетом всех месяцев года и на 3—5 °С, когда рассматривался только июль — сентябрь.

На основе спутниковых данных за период с января 1993 г. по декабрь 2017 г. [5] были рассчитаны линейные тренды температуры поверхности воды (ТПВ) для всего Балтийского моря. Средняя тенденция изменения поверхностной температуры моря (к востоку от 9° в. д.) составила $0,043 \pm 0,01$ °С/год («±» — стандартное отклонение), что дает среднее потепление на 1,1 °С за рассматриваемый период 1993—2017 гг.

Данные инфракрасных спутниковых снимков по температуре поверхности моря за период 1990—2008 гг. свидетельствуют о потеплении от 0,8 до 1 °С за десятилетие, при этом самые высокие значения линейного тренда наблюдаются в Ботническом и Финском заливах. Для центральной части моря потепление составило 0,5—0,9 °С/10 лет. Наименьшие тенденции наблюдаются вдоль восточного побережья Швеции (от 0,3 до 0,5 °С/10 лет), что, вероятно, является результатом апвеллинга в этой области [6].

Согласно оценкам, полученным по региональным моделям «океан—атмосфера», к концу XXI века рост среднегодовой температуры воздуха в Балтийском регионе, согласно сценариям RCP2.6 и RCP8.5, составит 1,5—4,3 °С [1]. Вслед за повышением температуры воздуха ожидаемо возрастет температура поверхности моря. В случае промежуточного (RCP4.5) и худшего (RCP8.5) сценариев климата среднесуточный тренд температуры поверхности Балтийского моря в период с 2006 г. по 2099 г. может составить около 0,18 и 0,35 °С за десятилетие соответственно [7]. Наиболее интенсивное потепление ожидается в северной части Балтийского моря, где наибольшие тренды оцениваются в 0,24 и 0,45 °С за десятилетие. Также существенным ожидается потепление в Финском заливе, особенно в зимний период.

Наряду с изменением климатических условий в Балтийском регионе наблюдается усиление антропогенной нагрузки на водоем. С 1950-х г. поступление биогенных веществ в Балтийское море увеличилось из-за роста населения и более интенсивного использования удобрений в сельском хозяйстве [8].

Поступление биогенных веществ достигло своего пика в 1980-х годах, но неуклонно снижалось после реализации стратегий сокращения поступления биогенных веществ в морскую среду. Тем не менее, начиная с 1960-х годов, для придонных вод Балтийского моря ниже постоянного галоклина характерно низкое содержание кислорода и крупномасштабная гипоксия [9].

Изменения экосистемных процессов в Балтийском море обычно изучаются на основе модельных оценок [7, 10—13] с учетом климатических сценариев и уровней биогенной нагрузки на водоем. Часто для этого используется промежуточный (RCP4.5) и худший (RCP8.5) сценарии [14]. По уровню биогенной нагрузки выделяют сценарий снижения нагрузок согласно Плану действий по Балтийскому морю (Baltic Sea Action Plan, BSAP) [15].

Общей чертой этих оценок является увеличение поступления биогенных соединений с суши и расширение гипоксических зон, однако масштаб этих изменений значительно различается при использовании большого спектра глобальных, региональных моделей и моделей Балтийского моря [7, 12]. Расхождение оценок объясняется разницей в задании в моделях доли биодоступных биогенных веществ, поступающих с суши [16]. Вместе с тем, во всех моделях сценарий BSAP характеризуется более низкими нагрузками по сравнению с задаваемыми в моделях историческими нагрузками за выбранные периоды в XX в. и начале XXI в. Изменение поступления питательных веществ, согласно сценариям BSAP, будет оказывать большее влияние на биогеохимический цикл в Балтийском море, чем изменение климата. Воздействие климата на экосистему моря будет более выраженным при высоких нагрузках биогенных веществ. Следовательно, без дальнейшего сокращения поступления питательных веществ, как это предлагается в BSAP, эвтрофикация и кислородное истощение будут усиливаться [7].

Оценка изменчивости концентрации кислорода в придонном слое значительно различается по отдельным моделям (табл. 1). Оценки приведены для летнего периода и усреднены по всему Балтийскому морю, включая Каттегат. В мелководных районах моря без выраженного галоклина концентрация кислорода в придонном слое, согласно модельным расчетам, будет снижаться вследствие более низкой концентрации насыщения кислородом при повышении температуры воды. В глубоководных районах с выраженным галоклином концентрация O_2 зависит преимущественно от сценария биогенной нагрузки.

В последнее десятилетие особенно значительный рост температуры отмечался в Финском заливе Балтийского моря [1, 17]. Известно, что Финский залив относится к одной из наиболее эвтрофированных акваторий моря с высоким уровнем биогенной нагрузки, поступающей со стоком р. Невы. Современная экосистема залива функционирует под давлением этих двух факторов. Значительное снижение биогенной нагрузки, обусловленное реализацией мер, предусмотренных в Плане действий (доочистка сточных вод от фосфора и другие меры), должно

было привести к улучшению качества вод и понижению уровня эвтрофирования. Однако современные исследования показывают, что ожидаемого улучшения не произошло. Возможной причиной этого стало глобальное потепление климата. В связи с этим целью работы является оценка изменения отдельных компонентов экосистемы восточной части Финского залива на основе данных наблюдений в условиях изменения климата и биогенной нагрузки.

Таблица 1

Средние по ансамблю изменения концентрации кислорода на дне в летний период (в мл/л) по различным климатическим моделям Балтийского моря с учетом сценариев биогенной нагрузки. В ECOSUPPORT изменения кислорода рассчитаны для периодов с 1976 г. по 2005 г. и с 2069 г. по 2098 г., в BalticAPP/CLIMSEA — для периодов с 1978 г. по 2007 г. и с 2069 г. по 2098 г. В CLIMSEA расчеты приведены для условий среднего и высокого уровня моря [7].

Ensemble average changes in the average oxygen concentration (ml/l) at the bottom in summer according to various climatic models of the Baltic Sea, taking into account biogenic load scenarios. In ECOSUPPORT oxygen changes are calculated between the periods 1976—2005 and 2069—2098, in BalticAPP/CLIMSEA —between the periods 1978—2007 and 2069—2098. In CLIMSEA calculations are given for medium and high sea level conditions [7].

Модель Сценарий Уровень моря	ECOSUPPORT A1B/A2	BalticAPP RCP4.5	BalticAPP RCP8.5	CLIMSEA RCP4.5 средний	CLIMSEA RCP4.5 высокий	CLIMSEA RCP8.5 средний	CLIMSEA RCP8.5 высокий
BSAP	-0,1	+0,6	+0,5	+0,6	+0,5	+0,4	+0,3
REF	-0,6	+0,1	-0,2	0	-0,1	-0,2	-0,4
BAU	-1,1	-	-	-	-	-	-
WORST	-	-0,1	-0,5	-	-	-	-

Материалы и методы исследования

Для оценки трендов гидрометеорологических характеристик применялись методы статистического анализа (тренды рядов, среднее квадратическое отклонение, ящики с усами). Основой для расчетов послужили данные наблюдений в Выборгском заливе (вблизи г. Выборг) за период с 1991 г. по 2020 г. Для анализа изменения температуры воздуха использовалась база данных Met Office Hadley Centre observations data sets, version 5. Среднемесячные данные по температуре воды на глубинах 5 и 15 м в прибрежной части Выборгского залива были взяты из базы CARTON—GIESE SODA (version 2.0.2—4) за период с 1991 г. по 2008 г. Данные по уровню моря получены из сетки карты аномалий уровня моря на основе измерений альтиметра DUACS delayed—time (версия DT—2018). Эти продукты распространяются Службой изменения климата Copernicus (sealevel_glo_phy_climate_14_rep_observations_008_057).

Данные натуральных наблюдений по содержанию фосфатов и кислорода в придонном слое, используемые в статье, были получены в ходе экспедиционных исследований РГГМУ (рис. 1); в восточной части Финского залива в позднелетний

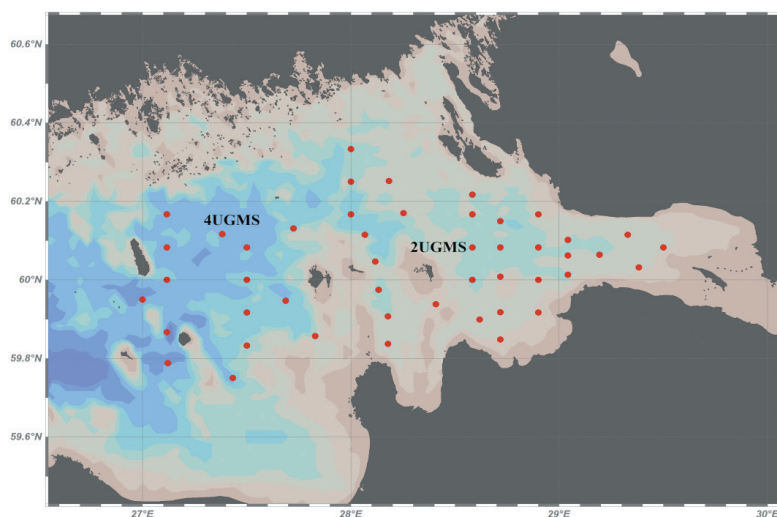


Рис. 1. Карта расположения станций отбора проб РГГМУ в период с 1996 г. по 2016 г.

Fig. 1. Map of RSHU sampling stations in 1996—2016.

период с 1996 г. по 2016 г.; за более ранний период с 1978 г. по 1995 г. использовались данные Северо-Западного УГМС. Набор исследуемых станций отличался год от года, однако на мониторинговых станциях 2UGMS и 4UGMS исследования выполнялись практически каждый год. Анализ многолетней изменчивости биомассы и состава фитопланктона в различных районах восточной части Финского залива выполнен за период с 2000 г. по 2016 г.

Для визуализации результатов использовались программные пакеты Ocean Data View, Microsoft Office и STATISTICA.

Результаты и обсуждение

1. Анализ трендов гидрометеорологических характеристик в восточной части Финского залива.

Анализ изменений среднегодовой приповерхностной температуры воздуха в г. Выборг свидетельствует о быстром ее росте с 1990-х г. по настоящее время (рис. 2). Величина тренда составляет $0,58\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет, что соответствует росту температуры $1,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ за последние тридцать лет. Эта оценка несколько выше той, что получена для Финского залива за период с 1970 г. по 2007 г. [1], когда линейный тренд изменения температуры воздуха составил около $0,35\text{—}0,45\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятилетие.

Вследствие различий в тенденциях изменчивости температуры воздуха в различные сезоны года расчеты проведены раздельно (рис. 3), а величины полученных линейных трендов проверены на значимость (табл. 2). Положительные тренды температуры воздуха выявлены во все сезоны года, но наиболее отчетливо они выражены в осенний период, когда темпы потепления составляют $0,86\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет,

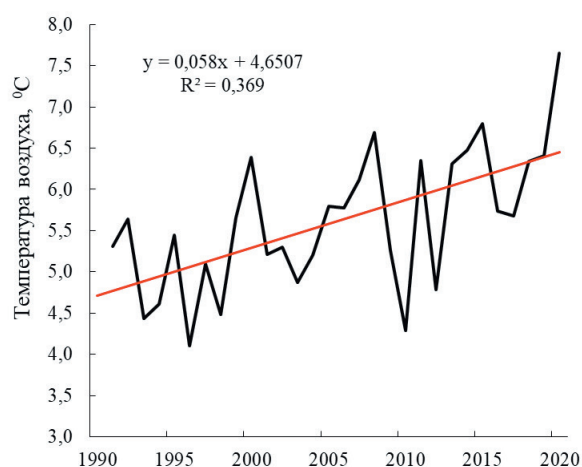


Рис. 2. Изменчивость среднегодовой приповерхностной температуры воздуха в г. Выборг за период с 1991 г. по 2020 г.

Fig. 2. Variability of mean annual near—surface air temperature in Vyborg for the period from in 1991 to 2020.

что соответствует росту температуры на 2,58 °C. Колебания температуры воздуха в зимний период отличались высокой амплитудой: очень теплые зимы со средними значениями от -1 до -3 °C, нередко с положительными температурами в декабре, которые чередовались с более холодными. Для исследуемого района характерна тенденция смещения сезонов года, более позднего перехода через 0 °C в зимний период и позднего похолодания осенью. Увеличилось суммарное за год количество дней с температурой выше 0 °C, около 10 дней/10 лет, а количество морозных дней (с температурой ниже -10 °C) сократилось на 2/10 лет. За исследуемый тридцатилетний период наиболее теплым был 2020 г., когда общее количество дней с температурой выше 0 °C составило 308, а среднесуточная температура в холодный период не опускалась ниже -6 °C. Такая тенденция сезонной изменчивости для г. Выборг за последние тридцать лет в целом согласуется с данными для Балтийского региона за более ранний период [17].

Таблица 2

Линейный тренд изменения температуры воздуха (°C/10 лет) в г. Выборг, рассчитанный за период с 1991 г. по 2020 г.

Linear trend of air temperature change (°C/10 years) in Vyborg, calculated for the period 1991—2020

Год	Зима	Весна	Лето	Осень
0,58	0,33	0,55	0,26	0,86

Примечание. Полужирным шрифтом выделены значимые величины тренда (по критерию Стьюдента при $p < 0,05$)

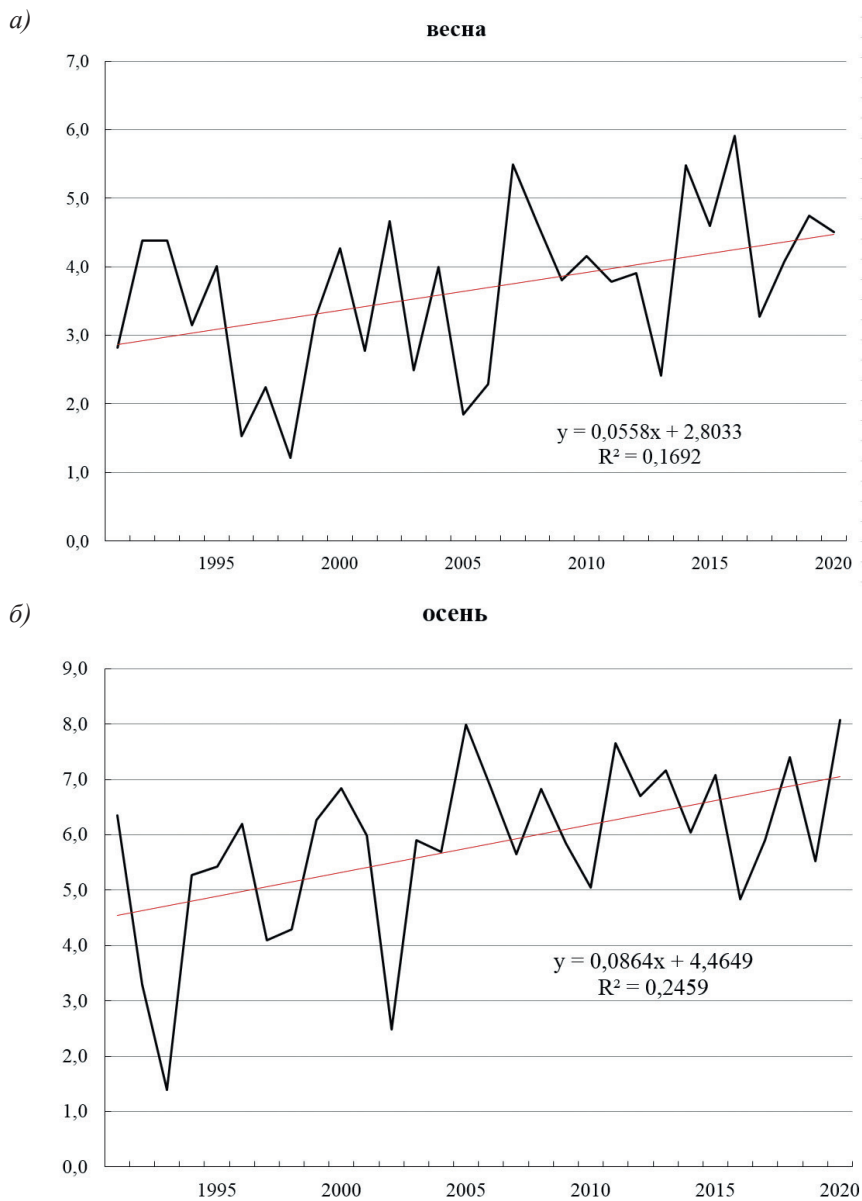


Рис. 3. Межгодовой ход среднесезонной температуры воздуха и ее линейный тренд в г. Выборг за период с 1991 г. по 2020 г.

a — весна, *б* — осень.

Fig. 3. Seasonal air temperature and linear trends of its variability in Vyborg for the period from 1991—2020:

a — spring, *б* — autumn.

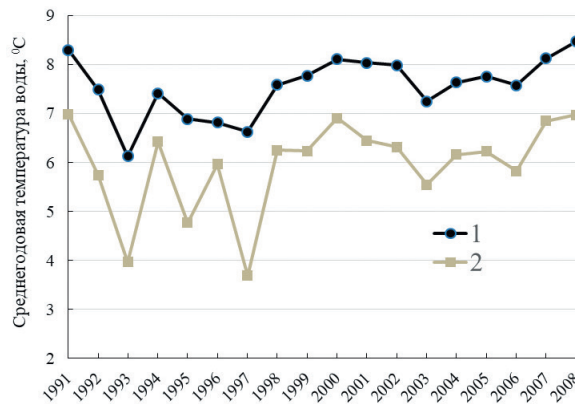


Рис. 4. Изменчивость среднегодовой температуры воды в прибрежной части Выборгского залива за период с 1991 г. по 2008 г.

1 — на глубине 5 м, 2 — на глубине 15 м.

Fig. 4. Mean annual water temperature in the coastal part of the Vyborg Bay for the period from 1991 to 2008.

1 — at 5 m depth, 2 — at 15 m depth.

Данные дистанционного зондирования показывают, что осредненная за год температура вод на глубине 5 м в Выборгском заливе (вблизи г. Выборг) имеет тенденцию к потеплению, причем с той же скоростью, что и температура воздуха, т. е. около $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет (рис. 4). Примерно с такой же скоростью изменялась температура поверхностных вод у побережья Литвы в период с 1990-х гг. по 2008 г. ($0,3\text{—}0,9\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет) [18].

Изучая влияние современного изменения климата на режим восточной части Финского залива, необходимо рассматривать межгодовую изменчивость уровня воды. Надежные и длительные ряды наблюдений имеются лишь на немногих станциях на побережье Балтики и Финского залива, например, на водомерном посту г. Кронштадт [19, 20]. Как известно, наиболее отчетливые климатические изменения начались в последней четверти XX в., что обусловило выбор для анализа временных рядов уровня воды. Средние месячные значения репрезентативны и отражают суммарные колебания уровня синоптического масштаба и подъемы уровня в периоды наводнений. При анализе ряда среднемесячных значений уровня оказалось, что если рассматривать период с 1900 г. по 1979 г., то норма равна $-0,17$ см, среднее квадратическое отклонение равно $19,97$ см, а для периода с 1980 г. по 2018 г. норма увеличилась до $8,18$ см, причем среднее квадратическое отклонение также увеличилось до $21,62$ см.

Поскольку такое повышение нормы значимо по критерию Стьюдента при данной длине рядов (примерно 1300 значений), то его необходимо учитывать в климатических расчетах и при оценке отклонений уровня от среднего (рис. 5). Увеличение нормы на $8,35$ см означает наличие во временном ряду за 1980—2018 гг. положительного тренда. Его расчет показал, что уровень моря повышается

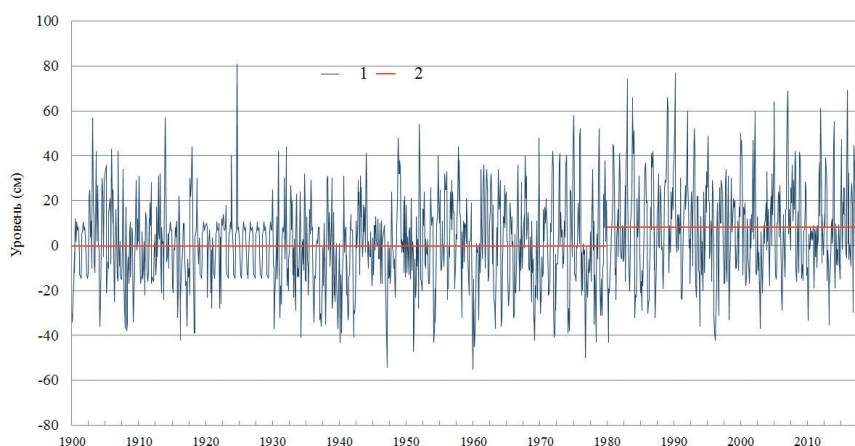


Рис. 5. Временной ряд среднемесячных значений уровня воды в г. Кронштадте за 1900—2018 гг. (1) и средние значения (нормы) за периоды с 1900 г. по 1979 г. и с 1980 г. по 2018 г. (2).

Fig. 5. Time series of mean monthly sea level in Kronstadt for 1900—2018 (1) and mean values (norms) for the periods 1900—1979 and 1980—2018 (2).

со скоростью 2,4 мм/год. По оценкам других авторов [21, 22], уровень моря в Балтийском море и Финском заливе с начала 1990-х гг. повышался на 2—4 мм в год, причем в заливах его рост может быть и выше.

2. *Основные тренды экосистемных характеристик в восточной части Финского залива.*

В связи с проблемой эвтрофирования восточной части Финского залива наибольший интерес у исследователей в последние два десятилетия вызывало изучение режима биогенных соединений, в особенности фосфора, а также кислородного режима в придонных водах и анализ факторов, обуславливающих возникновение гипоксии [9, 23—27]. Ухудшение кислородного режима может быть вызвано как природными факторами, так и антропогенным эвтрофированием [28—30]. В Финском заливе систематически наблюдаются гипоксийно-аноксичные явления в придонных слоях воды. Условия их возникновения хорошо изучены [25, 26].

На режим фосфатов придонного слоя оказывают влияние затоки вод повышенной солености из открытой части залива, приводящие к многократному увеличению содержания фосфатов в эстуарии р. Невы [31]. Кроме того, запасы фосфора, накопленные в донных отложениях, играют роль дополнительного источника фосфатов при возникновении аноксичных условий в придонных слоях.

Результаты анализа данных наблюдений показывают значительную межгодовую изменчивость содержания кислорода в придонном слое и слабый линейный тренд на снижение его концентрации (рис. 6 а). В тоже время отмечена тенденция к росту содержания фосфатов (рис. 6 б). В связи с отсутствием данных

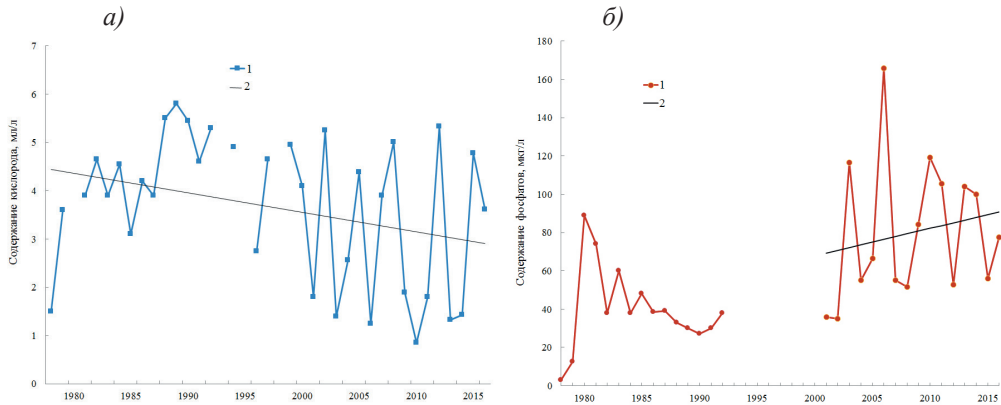


Рис. 6. Межгодовая изменчивость гидрохимических показателей в придонном слое на станции 4UGMS.

a — содержание растворенного кислорода (1) и линейный тренд его ряда (2),
б — концентрация фосфатов (1) и линейный тренд ряда (2).

Fig. 6. Interannual variability of hydrochemical characteristics in the bottom layer at 4UGMS station.

a — content of dissolved oxygen (1) and the linear trend of its variability (2),
б — concentration of phosphates (1) and the linear trend of the series (2).

по содержанию фосфатов за период с 1993 г. по 2000 г. линейный тренд их изменчивости был построен по данным с 2001 г. по 2016 г.

Повышение температуры поверхности моря в летний период будет приводить к усилению вертикальной стратификации и препятствовать перемешиванию вод в заливе. Рост зимних температур способствует ослаблению стратификации и, как следствие, улучшению кислородных условий у дна. В тоже время кислородный режим в Финском заливе определяют и некоторые другие природные гидрометеорологические и биогеохимические процессы [26, 32], а также антропогенное эвтрофирование [28—30].

Действие природных процессов развивается одновременно с действием антропогенного фактора, выражающегося в высоком уровне биогенных соединений, поступающих в залив со стоком реки Невы. В период с 2007 г. по 2013 г. речной сток в Финский залив превышал среднемноголетний 3490 м³/с, однако поступление фосфора от этого источника было ниже, чем среднемноголетнее 6000 т/год. Снижение поступления фосфора обусловлено высокой степенью очистки сточных вод и мерами, принятыми на заводе по производству удобрений «Фосфорит» в бассейне р. Луга [33, 34].

Для оценки изменений в экосистеме с точки зрения развития эвтрофирования и потепления климата несомненный интерес представляет изменчивость структурно-функциональных характеристик фитопланктона в восточной части Финского залива. Анализ многолетней изменчивости биомассы и состава фитопланктона показал, что существует статистически значимая обратная связь

между числом таксонов в пробах фитопланктона (α -разнообразие) и поверхностной соленостью воды, при этом связь наиболее выражена в мелководном районе (II). За период с 2002 г. по 2016 г. в мелководном районе коэффициент корреляции Спирмена составляет $-0,54$ ($n = 55$) при $p < 0,05$ против $-0,45$ ($n = 89$) и $-0,26$ ($n = 117$) во внутреннем (IIIa) и внешнем районах (IIIb) глубоководной части залива соответственно. Для всей акватории отрицательная корреляция между рассматриваемыми характеристиками оказывается выше и составила $-0,66$ ($n = 258$, $p < 0,000$).

В мелководном районе, где происходит смешение соленых и пресных вод, режим солености нестабилен (рис. 7). Осолонение вод является одной из причин снижения видового разнообразия пресноводных зеленых водорослей в среднем до 15 таксонов (при оптимуме свыше 20 таксонов). Во внутреннем глубоководном районе с увеличением солености воды в среднем до $2,60 \pm 0,36$ ‰ число видов в фитоценозах варьирует от 13 до 41. К западу при средней солености $3,91 \pm 0,12$ ‰ во внешнем глубоководном районе таксономическое разнообразие сокращается в среднем до 10 ± 1 (рис. 8).

По многолетним данным, в мелководном районе при поверхностной солености в среднем до $1,35$ — $2,05$ ‰ в 2003 г., с 2007 г. по 2009 г., в 2014 г. α -разнообразие не поднималось выше 20—30 таксонов/проба. Опреснение в среднем до $0,24$ — $1,23$ ‰ в 2002 г., с 2004 г. по 2006 г., с 2010 г. по 2012 г., в 2016 г. сопровождалось увеличением этого показателя до 40—80 таксонов. Наибольшим α -разнообразием фитопланктона отличался 2011 г. (рис. 8, II+IIIa). В западном

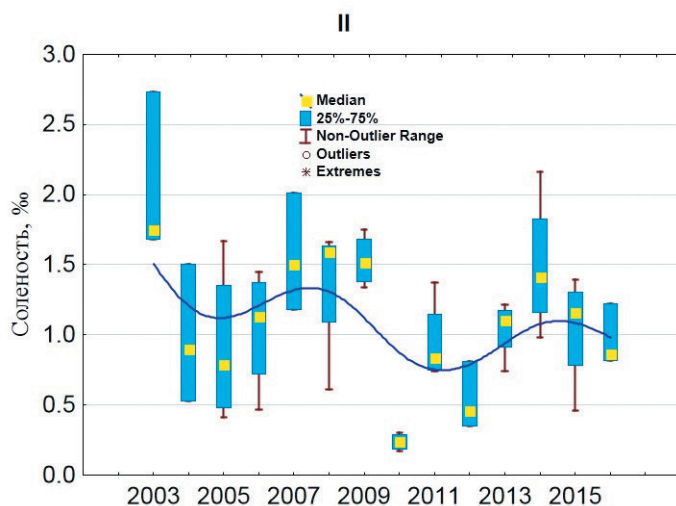


Рис. 7. Изменение поверхностной солености воды в мелководном районе восточной части Финского залива в июле — августе 2000-х гг.

Fig. 7. Changes in surface salinity in the shallow parts of the Eastern part of the Gulf of Finland in July—August of the 2000s.

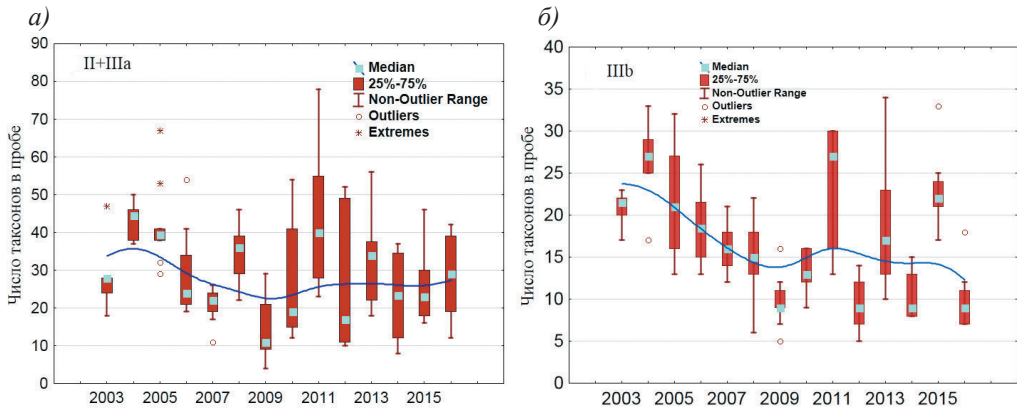


Рис. 8. Таксономическое разнообразие позднелетнего фитопланктона в различных районах восточной части Финского залива в 2000-х гг.

а — мелководный и внутренний глубоководный районы (II+IIIa),
 б — внешний глубоководный район (IIIb) [35].

Fig. 8. Taxonomic diversity of late—summer phytoplankton in various parts of the Eastern Gulf of Finland in the 2000s.

а — shallow and inner deep—water areas (II+IIIa), б — outer deep—water area (IIIb) [35].

направлении с увеличением солености воды α -разнообразие фитопланктона за счет сокращения видов зеленых и диатомовых снижалось (рис. 8, IIIб). После большого затора в Балтику в 2014 г. и 2015 г. отмечалось повышение таксономического разнообразия фитопланктона во внешнем глубоководном районе Финского залива и понижение — в 2016 г. Аналогичная картина наблюдалась после затора в 2003 г. (рис. 8, IIIб).

В течение всего периода наблюдений сине-зеленые водоросли (цианобактерии) периодически становились доминантами фитопланктона восточной части Финского залива. Во всех районах залива чаще других превалировал род *Aphanizomenon*, в основном *Aphanizomenon flosaquae*. Во внешнем глубоководном районе в отдельные годы в числе доминантов оказывались *Nodularia* и *Anabaena*. С 2002 г. по 2016 г. обилие позднелетнего фитопланктона определяли цианобактерии как в мелководном, так и в глубоководном районе. Развитие характерных для Балтийского моря и Финского залива цианобактерий *Aphanizomenon*, *Nodularia*, *Anabaena*, относящихся к азотфиксирующим, потенциально токсичным и вызывающим цветение воды [36, 37], не носило массового характера. В среднем по районам II и IIIa суммарная биомасса цианобактерий *Aphanizomenon*, *Nodularia* и *Anabaena* варьировалась по годам от 0,01 до 0,95 г/м³. Криptomonеды (*Cryptomonadales*) в продуктивности фитопланктона всех трех районов залива периодически играют заметную роль с 2007 г., а в 2016 г. криптомонеды доминировали только во внешнем глубоководном районе (IIIб), где их доля в биомассе достигала 26 % (в среднем 10,5 %), при этом максимум зафиксирован в мелководном районе — 120 мг/м³.

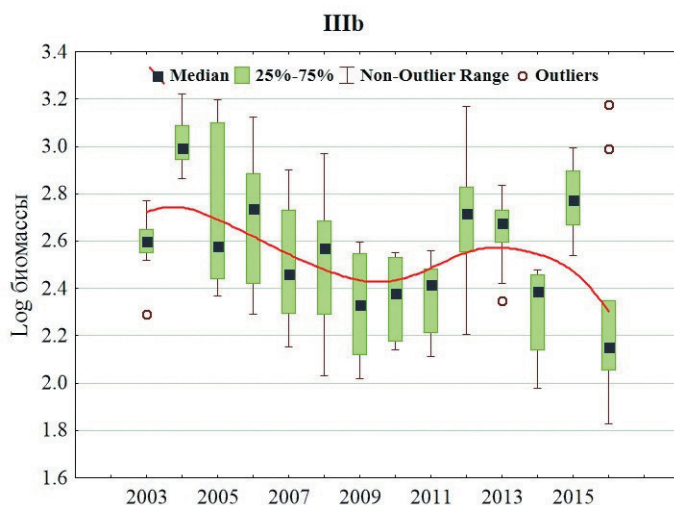


Рис. 9. Динамика биомассы фитопланктона внешнего глубоководного района IIIb восточной части Финского залива в июле — августе с 2003 г. по 2016 г.

Fig. 9. Dynamics of phytoplankton biomass of the outer deepwater part IIIb of the Eastern Gulf of Finland in July—August 2003—2016.

Следует отметить, что биомасса фитопланктона внешнего глубоководного района в 2016 г. по сравнению с таковой в период с 2009 г. по 2014 г. была ниже зафиксированных ранее значений (рис. 9). После большого затора в Балтику в 2014 г. отмечалось повышение таксономического разнообразия и биомассы фитопланктона во внешнем глубоководном районе и понижение в 2016 г. Аналогичная картина наблюдалась после затора в 2003 г.

Заключение

В прибрежной части Балтийского моря (Выборгский залив) за период с 1991 г. по 2020 г. отмечается рост приземной температуры воздуха, причем во все сезоны года. Наибольшая скорость потепления наблюдалась в осенний период (0,86 °C/10 лет), а в среднем за год величина тренда составила 0,58 °C/10 лет. Среднегодовая температура воды на глубине 5 м в Выборгском заливе увеличилась на 0,5 °C за десятилетие, однако на глубине 15 м положительный тренд выражен очень слабо.

Наряду с этим происходит повышение уровня Финского залива со скоростью около 2,4 мм/год за период с 1980 г. по 2018 г. Анализ гидрохимических показателей (содержание растворенного кислорода и фосфатов в придонном слое) показал, что их режим в восточной части Финского залива отличается значительной межгодовой изменчивостью. Для кислородных условий в летний период в придонных слоях восточной части Финского залива характерен слабый тренд к понижению содержания растворенного кислорода за сорок лет. Однако поскольку

формирование кислородных условий в глубоководных районах залива зависит от целого ряда факторов, то выделить, какие из них являются определяющими (антропогенные или природные) на основе данных наблюдений не представляется возможным. Для решения этой проблемы требуется использование математических моделей и проведение сценарных расчетов с привлечением климатических сценариев и с учетом изменения биогенных нагрузок.

Положительный тренд в изменении содержания фосфатов в придонном слое обусловлен внутриводными процессами, что связано с огромными запасами фосфатов, накопленными в донных отложениях и поступающими в водную среду при возникновении гипоксических условий [38]. Климатические факторы, приводящие к увеличению продолжительности теплого периода осенью и, как следствие, продлению вегетационного периода, могут способствовать накоплению фосфатов в результате минерализации образующегося органического вещества.

Кроме этого, высокое содержания фосфора в воде в 2010-х гг. может быть связано с неблагоприятными погодными условиями в период с 2012 г. по 2016 г., а именно большим количеством осадков в Санкт-Петербурге в середине лета и ростом поверхностного и речного стока. Значительная корреляционная связь также была получена между содержанием общего фосфора в эстуарии Невы и количеством дождливых дней в июле [39]. Возможно, такая закономерность может наблюдаться и для глубоководного района Ша.

Одним из главных факторов, определяющим структурно-функциональные характеристики фитопланктона в восточной части Финского залива, продолжает оставаться термогалинный режим. Наблюдаемое повышение температуры воды заметных структурных изменений в фитопланктонных сообществах за период исследований не вызвало.

Список литературы

1. ВАСС II Author Team. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Springer Science & Business Media, 2015. 501 p. doi:10.1007/978-3-319-16006-1.
2. Костяной А. Г., Ерёмкина Т. Р., Иванов В. В. и др. Морские природные системы / Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет. СПб.: Научно-технические технологии, 2022. С. 202—207.
3. Madsen K. S., Hojerslev N.K. Long-term temperature and salinity records from the Baltic Sea transition zone // *Boreal Environ Res.* 2009. 14. P. 125—131.
4. Hoyer J. L., Karagali I. Sea surface temperature climate data record for the North Sea and Baltic Sea // *Journal of Climate.* 2016. 29. 7. P. 2529—2541. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0663.1.
5. Mulet S., Nardelli B. B., Good S. et al. Ocean temperature and salinity. / In: Copernicus Marine Service Ocean State Report. 2018. Issue 2 *Journal of Operational Oceanography*, 11: sup1, P. 13—16. doi: 10.1080/1755876X.2018.1489208.
6. Lehmann A., Getzlaff K., Harlaß J. Detailed assessment of climate variability of the Baltic Sea area for the period 1958—2009 // *Climate Res.* 2011. 46. P. 185—196. doi:10.3354/cr00876.
7. Meier M., Dieterich S., Gröger M. et al. Oceanographic regional climate projections for the Baltic Sea until 2100 // *Earth Syst. Dynam.* 2022. 13.P. 159—199. doi: 10.5194/esd-13-159-2022.
8. Gustafsson B. G., Schenk F., Blenckner T. et al. Reconstructing the development of Baltic Sea eutrophication 1850—2006 // *Ambio.* 2012. 41. P. 534—548. doi:10.1007/s13280-012-0318-x.
9. Савчук О. П. Исследование эвтрофикации Балтийского моря // Труды Государственного океанографического института. 2005. Т. 209. 272 с.

10. Isaev A. V., Eremina T. R., Ryabchenko V. A., Savchuk O. P. Model estimates of the impact of bioirrigation activity of *Marenzelleria* spp. on the Gulf of Finland ecosystem in a changing climate // *Journal of Marine Systems*. 2017. V. 171, P. 81—88. doi: 10.1016/j.jmarsys.2016.08.005.
11. Ryabchenko V. A., Karlin L. N., Isaev A. V. et al. Model estimates of the eutrophication of the Baltic Sea in the contemporary and future climate // *Oceanologia*. 2016. 56. P. 36—45. doi: 10.1134/S0001437016010161.
12. Meier M., Edman M. K., Eilola K. J. et al. Assessment of eutrophication abatement scenarios for the Baltic Sea by multi-model ensemble simulations // *Front. Mar. Sci*. 2018. V. 5. Article 440. doi: 10.3389/fmars.2018.00440.
13. Ерёмина Т. Р., Исаев А. В., Рябченко В. А. Оценка и прогноз тенденций в эволюции экосистемы восточной части Финского залива при различных сценариях изменения биогенной нагрузки в будущем климате // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2014. № 36. С. 118—127.
14. Moss R. H., Edmonds J. A., Hibbard K. A. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment // *Nature*. 2010. 463. P. 747—756. doi: 10.1038/nature08823.
15. HELCOM. Baltic Sea Action Plan. Helsinki Commission Publ. Helsinki. 2007. 103 p.
16. Eilola K., Gustafsson B. G. Kuznetsov I. et al. Evaluation of biogeochemical cycles in an ensemble of three state of the art numerical models of the Baltic Sea // *J. Mar. Syst.* 2011. 88. P. 267—284. doi: 10.1016/j.jmarsys.2011.05.004.
17. BACC Author Team Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin (Regional Climate Studies) (Berlin: Springer) 2008. 474 p.
18. Dailidienė I., Baudler H., Chubarenko B., Navrotskaya S. Long term water level and surface temperature changes in the lagoons of the southern and eastern Baltic // *Oceanologia*. 2011. 53. P. 293—308. doi: 10.5697/oc.53-1-TI.293.
19. Bogdanov V. I., Medvedev M. Yu., Solod. et al. Evaluation of biogeochemical cycles in an ensemble of three state of the art numerical models of the Baltic Sea // *Reports of the Finnish Geodetic Institute*. 2000. V.1. 34 p.
20. Богданов В. И. Кронштадтский футшток и его Шепелевский дублер. СПб.: Нестор—История. 2015. 248 с.
21. Madsen K. S., Høyer J. L., Suursaar Ü. et al. Sea Level Trends and variability of the Baltic Sea From 2D Statistical Reconstruction and Altimetry // *Front. Earth Sci*. 2019. Vol. 7. Art. 243. P. 1—12. doi: 10.3389/feart.2019.00245.
22. Малинин В. Н., Гордеева С. М., Митина Ю. В. Изменчивость невских наводнений и морского уровня в Финском заливе в современных климатических условиях // *Водные ресурсы*. 2015. Т. 42. № 5. С. 544—557. doi: 10.7868/S0321059615030098.
23. Savchuk O., Wulff F. Modelling regional and large—scale response of Baltic Sea ecosystems to nutrient load reductions // *Hydrobiologia*. 1999. Vol. 393. P. 35—43. doi: 10.1023/A:1003529531198.
24. Pitkänen H., Lehtoranta J., Räsänen A. Internal nutrient fluxes counteract decreases in external load: the case of the estuarial Eastern Gulf of Finland, Baltic Sea // *AMBIO J. of the Human Environment*. 2001. 30(4). P. 195—201. doi: 10.1579/0044-7447-30.4.195.
25. Максимов А. А. Причины возникновения придонной гипоксии в восточной части Финского залива Балтийского моря // *Океанология*. 2006. Т. 46. № 2. С. 204—210.
26. Ерёмина Т. Р., Максимов А. А., Волощук Е. В. Влияние изменчивости климата на кислородный режим глубинных вод восточной части Финского залива // *Океанология*. 2012. Т. 52. № 6. С. 1—9.
27. Владимирова О. М., Ерёмина Т. Р., Исаев А. В. и др. Модельные оценки составляющих баланса азота и фосфора в экосистеме Финского залива // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2018. № 53. С. 72—82.
28. Zillén L., Conley D. J., Andrén T. et al. Past occurrence of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact // *Earth Sci. Rev.* 2008. 91. P. 77—92. doi: 10.1016/j.earscirev.2008.10.001.
29. Golubkov S., Alimov A. Ecosystem changes in the Neva Estuary (Baltic Sea): Natural dynamics or response to anthropogenic impacts? // *Marine Pollution Bulletin*. 2010. Vol. 61. No. 4—6. P. 198—204. doi: 10.1016/j.marpolbul.2010.02.014.

30. Conley D. J., Carstensen J., Aigars J. et al. Hypoxia is increasing in the coastal zone of the Baltic sea // *Environmental Science and Technology*. 2011. 45 (16). P. 6777—6783. doi: 10.1021/es201212r.
31. Шатрова О. В., Ерёмкина Т. Р., Ланге Е. К. Анализ изменчивости параметров эвтрофирования в Финском заливе по данным натурных наблюдений // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2016. 44. С. 129—140.
32. Ерёмкина Т. Р., Волощук Е. В., Максимов А. А. Оценка биогеохимических изменений в донных отложениях восточной части Финского залива вследствие вселения полихет *Marenzelleria* spp. // *Известия РГО*. 2016. Т. 148. Вып. 1. С. 55—71.
33. Atkins International Ltd. PG Phosphorit LLC: Assessment of Collection and Treatment System for Surface Waters and Monitoring of Phosphorus Loads to the River Luga. Final Report. 2015. 41.
34. Vodokanal of St. Petersburg. Annual Report 2014. Vodokanal. 2015. P. 249.
35. Pitkänen H. Nutrient dynamics and conditions in the eastern Gulf of Finland: the regulatory role of the Neva estuary // *Aqua Fennica*. 1991. 21 (2). P. 105—115.
36. Niemi Å. Blue—green algal blooms and N: P ratio in the Baltic Sea // *Acta Botanica Fennica*. 1979. V. 110. P. 57—61.
37. Kononen K. Dynamics of the toxic cyanobacterial blooms in the Baltic Sea // *Finnish Marine Research*. 1992. V. 261. P. 1—36.
38. Savchuk O. P., Eremina T.R., Isaev A. V., Neelov I. A. Response of eutrophication in the Eastern Gulf of Finland to nutrient load reduction scenarios // *Hydrobiologia*. 2009. Vol. 629. No. 1. P. 225—237. doi: 10.1007/s10750-009-9776-y.
39. Golubkov M., Golubkov S. Eutrophication in the Neva Estuary (Baltic Sea): Response to temperature and precipitation patterns // *Marine and Freshwater Research*. 2020. Vol. 71. No. 6. P. 641—652. doi 10.1071/MF18422.

References

1. BACC II Author Team. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. *Springer Science & Business Media*. 2015: 501 p. doi:10.1007/978-3-319-16006-1.
2. Kostyanoy A. G., Eremina T. R., Ivanov V. V. et al. Marine environmental systems. The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. *Rosgidromet. SPb.: Naukoemkie tehnologii. = High-tech technologies*, 2022: 202—207. (In Russ.).
3. Madsen K. S., Hojerslev N. K. Long-term temperature and salinity records from the Baltic Sea transition zone. *Boreal Environ Res*. 2009; (14):125—131.
4. Høyer J. L., Karagali I. Sea surface temperature climate data record for the North Sea and Baltic Sea. *Journal of Climate*. 2016; 29 (7): 2529—2541. doi: 10.1175/JCLI-D15-0663.1.
5. Mulet S., Nardelli B. B., Good S. et al. Ocean temperature and salinity. In: Copernicus Marine Service Ocean State Report. 2018. Issue 2. *Journal of Operational Oceanography*, 11; sup. (1):13—16. doi: 10.1080/1755876X.2018.1489208.
6. Lehmann A., Getzlaff K., Harlaß J. Detailed assessment of climate variability of the Baltic Sea area for the period 1958—2009. *Climate Res*. 2011; (46):185—196. doi:10.3354/cr00876.
7. Meier M., Dieterich C., Gröger M. et al. Oceanographic regional climate projections for the Baltic Sea until 2100. *Earth Syst. Dynam.* 2022; (13):159—199. doi: 10.5194/esd-13-159-2022.
8. Gustafsson B. G., Schenk F., Blenckner T. et al. Reconstructing the development of Baltic Sea eutrophication 1850—2006. *Ambio*. 2012; (41):534—548. doi: 10.1007/s13280-012-0318-x.
9. Savchuk O. P. Baltic Sea eutrophication study. *Trudi Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta. = Proceedings of the State Oceanographic Institute*. 2005; 209: 272 p. (In Russ.).
10. Isaev A. V., Eremina T. R., Ryabchenko V. A., Savchuk O. P. Model estimates of the impact of bioirrigation activity of *Marenzelleria* spp. on the Gulf of Finland ecosystem in a changing climate. *Journal of Marine Systems*. 2017; (171):81—88. doi: 10.1016/j.jmarsys.2016.08.005.
11. Ryabchenko V. A., Karlin L. N., Isaev A. V. et al. Model estimates of the eutrophication of the Baltic Sea in the contemporary and future climate. *Oceanology*. 2016; (56):36—45. doi: 10.1134/S0001437016010161.

12. Meier M., Edman M. K., Eilola K. J. et al. Assessment of eutrophication abatement scenarios for the Baltic Sea by multi—model ensemble simulations. *Front. Mar. Sci.* 2018; 5(440). doi: 10.3389/fmars.2018.00440.
13. Eremina T. R., Isaev A. V., Ryabchenko V. A. Assessment and forecast of the trends in the ecosystem evolution of the Eastern part of the Gulf of Finland under different scenarios of changes in nutrient loading in a future climate. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Proceedings of Russian State Hydrometeorological University.* 2014; (36):(118—127). (In Russ.).
14. Moss R. H., Edmonds J. A., Hibbard K. A. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature.* 2010; (463):747—756. doi:10.1038/nature08823.
15. HELCOM. Baltic Sea Action Plan. Helsinki Commission Publ. Helsinki. 2007:103 p.
16. Eilola K., Gustafsson B. G., Kuznetsov I. et al. Evaluation of biogeochemical cycles in an ensemble of three state of the art numerical models of the Baltic Sea. *J. Mar. Syst.* 2011; (88):267—284. doi: 10.1016/j.jmarsys.2011.05.004.
17. BACC Author Team Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin (Regional Climate Studies) Berlin. Springer. 2008 : 474 p.
18. Dailidienė I., Baudler H., Chubarenko B., Navrotskaya S. Long term water level and surface temperature changes in the lagoons of the southern and eastern Baltic. *Oceanologia.* 2011; (53):293—308. doi: 10.5697/oc.53-1-TI.293.
19. Bogdanov V. I., Medvedev M. Yu., Solodov V. A. et al. Mean monthly series of sea level observations (1777—1993) at the Kronstadt gauge. *Reports of the Finnish Geodetic Institute.* 2000; (1): 34 p.
20. Bogdanov V. I. The Kronstadt footstock and its Shepelevsky understudy. SPb.: *Nestor—Istoriya = Nestor—History*, 2015: 248 p. (In Russ.).
21. Madsen K. S., Høyer J. L., Suursaar Ü., She J. and Knudsen P. Sea level trends and variability of the Baltic Sea from 2D statistical reconstruction and altimetry. *Front. Earth Sci.* 2019; 7:243. doi: 10.3389/feart.2019.00245.
22. Malinin V. N., Gordeeva S. M., Mitina U. V. Variability of the Neva floods and the sea level in the Gulf of Finland in modern climatic conditions. *Vodnie resursi = Water resources.* 2015; (42):(544—557). (In Russ.). doi: 10.7868/S0321059615030098.
23. Savchuk O., Wulff F. Modelling regional and large—scale response of Baltic Sea ecosystems to nutrient load reductions. *Hydrobiologia.* 1999; (393):35—43. doi: 10.1023/A:1003529531198.
24. Pitkänen H., Lehtoranta J., Räike A. Internal Nutrient Fluxes Counteract Decreases in External Load: The Case of the Estuarial Eastern Gulf of Finland, Baltic Sea. *AMBIO: A J. of the Human Environment.* 2001; 30(4): 195—201. doi: 10.1579/0044-7447-30.4.195.
25. Maximov A. A. Causes of bottom hypoxia in the eastern part of the Gulf of Finland of the Baltic Sea. *Okeanologiya = Oceanology.* 2006; (46):(204—210). (In Russ.).
26. Eremina T. R., Maximov A. A., Voloschuk E. V. Effects of climatic variability on deepwater oxygen conditions in the Eastern Gulf of Finland. *Okeanologiya = Oceanology.* 2012; (52):(1—9). (In Russ.).
27. Vladimirova O. M., Eremina T. R., Isaev A. V. et al. Model estimates of nitrogen and phosphorus budget components for the Gulf of Finland ecosystem. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta. = Proceedings of Russian State Hydrometeorological University.* 2018; (53):(72—82). (In Russ.).
28. Zillén L., Conley D. J., Andrén T. et al. Past occurrence of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact. *Earth Sci. Rev.* 2008; (91):77—92. doi: 10.1016/j.earscirev.2008.10.001.
29. Golubkov S., Alimov A. Ecosystem changes in the Neva Estuary (Baltic Sea): Natural dynamics or response to anthropogenic impacts? *Marine Pollution Bulletin.* 2010; 61(4—6): 198—204. doi: 10.1016/j.marpolbul.2010.02.014.
30. Conley D. J., Carstensen J., Aigars J. et al. Hypoxia Is Increasing in the Coastal Zone of the Baltic Sea. *Environmental Science & Technology.* 2011; 45 (16): 6777—6783. doi: 10.1021/es201212r.
31. Shatrova O. V., Eremina T. R., Lange E. K. Variability of parameters of eutrophication in the Gulf of Finland based on field observations. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta. = Proceedings of Russian State Hydrometeorological University.* 2016; (44):(129—140). (In Russ.).

32. Eremina T. R., Voloshchuk E. V., Maximov A. A. Assessment of biogeochemical changes in the sediments of the Eastern part of the Gulf of Finland due to invasion of polychaetes *Marenzelleria* spp. on observational data and modeling results. *Izvestiya RGO = Proceedings of Russian Geographical Society*. 2016; (148):(55—71). (In Russ.).
33. Atkins International Ltd. PG Phosphorit LLC: Assessment of Collection and Treatment System for Surface Waters and Monitoring of Phosphorus Loads to the River Luga. Final Report. 2015: 41 p.
34. Vodokanal of St. Petersburg. Annual Report 2014. *Vodokanal*. 2015: 249 p.
35. Pitkänen H. Nutrient dynamics and conditions in the eastern Gulf of Finland: the regulatory role of the Neva estuary. *Aqua Fennica*. 1991; 21 (2): 105—115.
36. Niemi Å. Blue—green algal blooms and N: P ratio in the Baltic Sea. *Acta Botanica Fennica*. 1979; (110): 57—61.
37. Kononen K. Dynamics of the toxic cyanobacterial blooms in the Baltic Sea. *Finnish Marine Research*. 1992; (261): 1—36.
38. Savchuk O. P., Eremina T. R., Isaev A. V., Neelov I. A. Response of eutrophication in the eastern Gulf of Finland to nutrient load reduction scenarios. *Hydrobiologia*. 2009; 629(1): 225—237. doi: 10.1007/s10750-009-9776-y.
39. Golubkov M., Golubkov S. Eutrophication in the Neva Estuary (Baltic Sea): Response to temperature and precipitation patterns. *Marine and Freshwater Research*. 2020; 71(6): 641—652. doi 10.1071/MF18422.

Информация об авторах

Екатерина Васильевна Волощук, кандидат географических наук, доцент кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами, Российский государственный гидрометеорологический университет, Ketrin492006@mail.ru.

Татьяна Рэмовна Ерёмкина, кандидат физико-математических наук, доцент, директор Института гидрологии и океанологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, Tanya.er@gmail.com.

Евгения Кирилловна Ланге, научный сотрудник лаборатории морской экологии Института океанологии им. П. П. Шишова РАН, Москва, evlange@gmail.com.

Александр Сергеевич Аверкиев, доктор географических наук, доцент, профессор кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами, Российский государственный гидрометеорологический университет, asav@rshu.ru.

Information about authors

Ekaterina Vasilyevna Voloshchuk, PhD (Geogr.), Associate Professor of the Faculty of Applied oceanography and integrated coastal zone management of Russian State Hydrometeorological University, Ketrin492006@mail.ru.

Tatyana Removna Eremina, PhD (Phys. and Math. Sci.), Associate Professor, Director of the Institute of Hydrology and Oceanology of Russian State Hydrometeorological University, Tanya.er@gmail.com.

Evgeniya Kirillovna Lange, researcher at the Laboratory of Marine Ecology of Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, evlange@gmail.com.

Alexander Sergeevich Averkiev, Dr. Sci. (Geogr.), Professor of the Faculty of Applied oceanography and integrated coastal zone management of Russian State Hydrometeorological University, asav@rshu.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 12.05.2023

Принята к печати после доработки 15.08.2023

The article was received on 12.05.2023

The article was accepted after revision on 15.08.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 512—524.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(72): 512—524.

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья
УДК [502.51:504.5]:639.22
doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-512-524

Отходы рыбопромыслового флота и их влияние на морскую среду

***Артур Айварович Майсс¹, Наталья Александровна Майсс²,
Яна Юрьевна Блиновская², Мария Владимировна Высоцкая²***

¹ ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет», г. Владивосток, Россия

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

Аннотация. В статье обсуждается проблема отходов рыбопромыслового флота, в том числе потерянных орудий лова. Установлено, что рыболовство, представленное крупными промыслами, практически во всех частях Мирового океана, является существенным антропогенным фактором, оказывающим негативное воздействие на состояние водных биологических ресурсов и экосистеме океана, особенно в районах интенсивного рыбного промысла. Выявлено, что только во время промысла минтая в Охотском море ежегодно образуется около 250 тысяч тонн отходов, включая фрагменты оставленных, утерянных или выброшенных орудий лова. Показано, что для решения данной проблемы представляется необходимым усовершенствовать систему управления отходами, образующимися на рыбопромысловом флоте в части учета, хранения, транспортировки и переработки пластиковых отходов, как на национальном, так и на международном уровне.

Ключевые слова: промышленное рыболовство, Мировой океан, отходы, потерянные орудия лова, загрязнение, пластик.

Для цитирования: Майсс А. А., Майсс Н. А., Блиновская Я. Ю., Высоцкая М. В. Отходы рыбопромыслового флота и их влияние на морскую среду // Гидрометеорология и экология. 2023. № 72. С. 512—524. doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-512-524.

Original article

Fishing fleet waste and its impact on the marine environment

*Arthur A. Maiss¹, Natalia A. Maiss²,
Yana Yu. Blinovskaya², Maria V. Vysotskaya²*

¹ FGBOU VO «Far Eastern State Technical Fisheries University», Vladivostok, Russia

² FGAOU VO «Far Eastern Federal University», Vladivostok, Russia

Summary. The World Ocean plays an important role in the formation of habitat, it's a unique source of natural resources and ensures ecological balance in general. In the evolution process, the biosphere has developed the ability to self-regulate and neutralize negative consequences. As a result of the intense growth of the anthropogenic press, caused, among other things, by fishing activities, the World Ocean are not able to cope with such an impact. This in turn leads to a chain of negative consequences, including a decrease in fish stocks. So, in the Far Eastern Basin waters about 60% of the total all-Russian fish catch is mined. However, the irrational use of its riches, the disposal and dumping of wastes including fishing gear cause the emergence of a danger associated with the marine ecosystems' degradation. In this regard, the study of the fishing waste impact, especially during mass fishing, is an urgent task.

Based on the studies carried out it was found that every year only one large vessel providing fishing produces at least 4,000 tons of waste, which includes worn and lost fishing gear, and the current national waste management system does not take into account this category, which requires its adjustment.

To reduce the environmental impact of fisheries, it is necessary to determine the structure and volume of all waste that is generated during fishing. In addition, the development of a waste management system is required, which would include estimated waste generation indicators, an action plan for their collection, accounting and disposal, and the subsequent integration of fishing waste into a circular economy.

Thus, worldwide and national fishing is a powerful anthropogenic factor that has a negative impact on the state of aquatic biological resources and the ecosystem of the oceans. The negative impact is carried out in two directions: irrational fishing and waste pollution. To solve this problem, it seems appropriate to improve the management of waste generated by fishing vessels, in terms of the accounting, storage, transportation and processing of plastic, both nationally and internationally.

Keywords: industrial fishing, the World Ocean, waste, marine litter, lost fishing gear, pollution, plastic.

For citation: Maiss A. A., Maiss N. A., Blinovskaya Y. Yu., Vysotskaya M. V. Fishing fleet waste and its impact on the marine environment. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(72): 512—524 (In Russ). doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-512-524.

Введение

Современный этап развития человеческой цивилизации характеризуется существенным ростом воздействия на морские экосистемы. Среди причин, повлиявших на данную ситуацию, следует выделить развитие научно-технического прогресса, увеличение численности населения и его потребностей, что, в свою очередь, обусловило увеличение мирового объема вылова водных биологических ресурсов (ВБР). Согласно данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), вылов ВБР за 70 лет увеличился в 4,5 раза с 20 млн. т в 1950 г. до 90,3 млн. т в 2020 г. (рис. 1).

Для обеспечения такого объема вылова в мире было задействовано порядка 4,1 млн рыболовных судов, но с 2020 г. наблюдается уменьшение их количества,

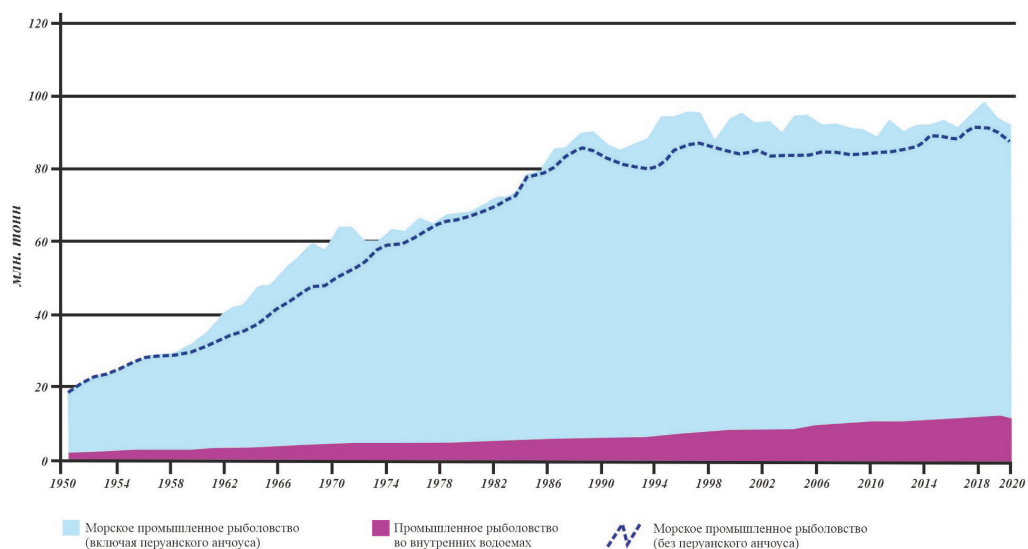


Рис. 1. Динамика показателей мирового промышленного рыболовства по данным [1].

Fig. 1. Global industrial fisheries indicators dynamics according to [1].

прежде всего, за счет программ по сокращению флота в Китае и Евросоюзе [1]. Однако это не сказывается на снижении антропогенного воздействия вследствие общемировой тенденции роста размеров и мощности судов и орудий лова [2].

Таким образом, рыболовство, представленное крупными промыслами практически во всех частях Мирового океана, стало важным антропогенным фактором, влияющим на его экологическое состояние, приводящим к явным или скрытым нарушениям состояния экосистем и водных объектов в целом [3].

Выделяются два основных направления влияния рыболовства на окружающую среду. Первое связано с воздействием на состояние ВБР нерационального промысла [4—10]. Второе является следствием загрязнения судовыми и рыболовными отходами [11—14].

Проблема нерационального промысла является объектом многочисленных действий национальных правительств и международных организаций, что позволяет удерживать уровень данного вида антропогенного воздействия на определенном некритическом уровне. Согласно оценкам ФАО, доля максимально устойчивого улова в мире снизилась в 2019 г. до 64,6 %, а доля запасов, вылавливаемых за пределами уровня биологической устойчивости, продолжает расти. Также усиливается проблема загрязнения морской среды отходами: в Тихом и Атлантическом океанах происходит разрастание мусорных островов, береговая черта всех континентов характеризуется разной степенью засорения, крупные отложения из отходов находят на дне морей и океанов, даже в их достаточно глубоководных частях. При этом значимым источником загрязнения являются рыбопромысловые суда. Установлено, что большая часть пластика в Большом тихоокеанском мусорном пятне

является отходами от орудий рыболовства: ежегодно теряется 740 тыс. км траловых сетей, почти 3 тыс. км² жаберных сетей, 75 тыс. км² кошельковых неводов [15].

Борьбе с морским мусором посвящены многочисленные инициативы на глобальном, национальном и региональном уровнях. Однако до настоящего времени ни одна из них не принесла ожидаемых результатов не только из-за недостатка системных знаний в данном вопросе и финансовых механизмов, но и вследствие отсутствия технологий и, самое главное, стратегического подхода к проблеме [16]. Самой сложной представляется задача определения количественных параметров отходов. Несмотря на очевидность данного вопроса, он до сих пор является открытым.

Одним из инструментов, способствующих решению данной задачи, является предлагаемый авторами подход к оценке объемов загрязнения морской среды отходами рыбного промысла, основанный на концепции природно-технических систем. Учитывая, что Дальневосточный регион является лидером по добыче рыбы, авторами дается обзор проблемы загрязнения морской среды потерянными орудиями лова и обсуждается потенциальное влияние отходов рыбопромыслового флота на загрязнение на примере наиболее продуктивного района — Охотского моря, в котором главным объектом промысла является минтай.

Материалы и методы

Оптимальным подходом для решения обозначенной проблемы является концепция природно-технических систем, позволяющая не только прогнозировать антропогенную нагрузку в процессе рыбного промысла, но и находить решения по формированию интенсивности рыболовства, а также по разработке природоохранных технологий, направленных на минимизацию негативного воздействия.

Представим рыболовную систему (рис. 2) в виде совокупности судов и применяемых ими орудий лова и укажем влияние каждой системной составляющей на морскую среду [17, 18].

Предложенный подход делает очевидным тот факт, что размеры воздействия рыболовной системы на морскую среду зависят от параметров, применяемых для промысла орудий лова, судов, их количества и времени нахождения в акватории водоема. Надо принимать во внимание также экологические последствия, представляющие такие изменения в морских водоёмах, которые вызывают нарушения (отклонения от природного фона) условий среды и состояния биоты и приводят к изменению структуры и функций экосистем [19].

Материалами для данного исследования послужили отчеты ФАО о состоянии мирового рыболовства и аквакультуры, справочные и инструктивные документы об эксплуатации рыбопромыслового флота, а также статистические данные по рыбной промышленности России.

Результаты и обсуждение

В 1990 г. рыболовный флот СССР составлял 2801 единицу валовой вместимостью 3 670 тыс. брутто регистровых тонн [20]. После распада СССР состав флота стал сокращаться. Данная тенденция сохраняется вплоть до настоящего времени:

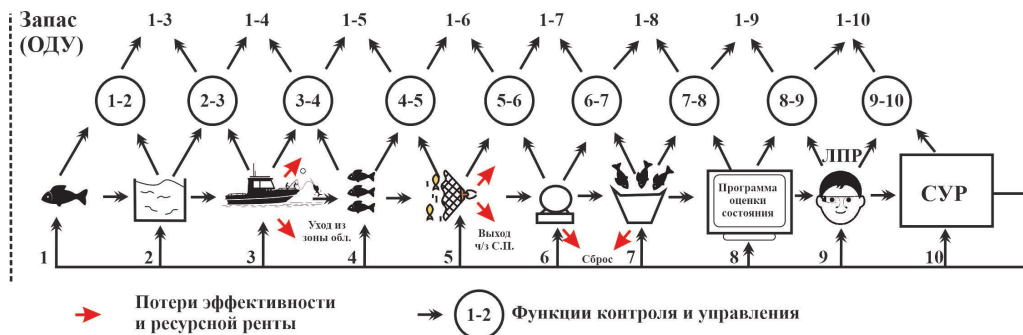


Рис. 2. Алгоритм анализа рыболовной системы на примере промысла минтая [17].

- 1 — параметры популяции; 2 — параметры среды обитания; 3 — промышленные мощности;
- 4 — промышленные усилия; 5 — параметры орудия рыболовства; 6 — средства механизации;
- 7 — средства переработки и хранения уловов; 8 — контроль и анализ текущих параметров процесса лова, анализ конъюнктуры рынка; 9 — лица, принимающие управленческие решения (ЛПР);
- 10 — система управления процессом контроля и принятия решений.

Fig. 2. Algorithm for analyzing the fishing system using the example of pollock fishing [17].

- 1 — population parameters; 2 — habitat parameters; 3 — production capacity; 4 — field effort;
- 5 — fishery tool parameters; 6 — mechanization means; 7 — means of processing and storage of catches;
- 8 — current parameters monitoring and analysis of the fishing process, market conditions analysis;
- 9 — persons making management decisions; 10 — monitoring and decision-making process control system.

с 1995 г. по 2021 г. количество судов уменьшилось на 75 %, при этом доля судов со сверхнормативным сроком службы остается достаточно высокой. По данным [21], срок безопасного и эффективного использования судов составляет не более 25—30 лет, что требует безотлагательных мер по его обновлению.

На начало 2020 г. под флагом России насчитывалось 1075 единиц рыбопромыслового флота общим дедвейтом 746,9 тыс. т и валовой вместимостью 1345,5 тыс. брутто регистровых тонн [22]. В 2021 г. количество судов составило 1391 единицу, из которых 71 % эксплуатируется в Дальневосточном рыбохозяйственном бассейне [21]. Размерная категория и количество рыболовного флота России представлены в табл. 1.

Таблица 1

Размерная категория и количество рыболовного флота РФ на 2021 г.
The measurement and amount of the Russian Federation fishing fleet for 2021

Размерная категория судов*	Общее количество судов в России, ед.	Количество судов на Дальнем Востоке, ед.	Количество судов в Северном бассейне, ед.
Крупные (длиной более 100 м)	25	18	4
Большие (65–100 м)	177	126	28
Средние (34–65 м)	850	603	136
Малые (24–34 м)	339	241	54
Всего:	1391	988	222

* Инструкция по классификации судов флота рыбного хозяйства. Гипрорыбфлот: СПб: 1995, 34 с.

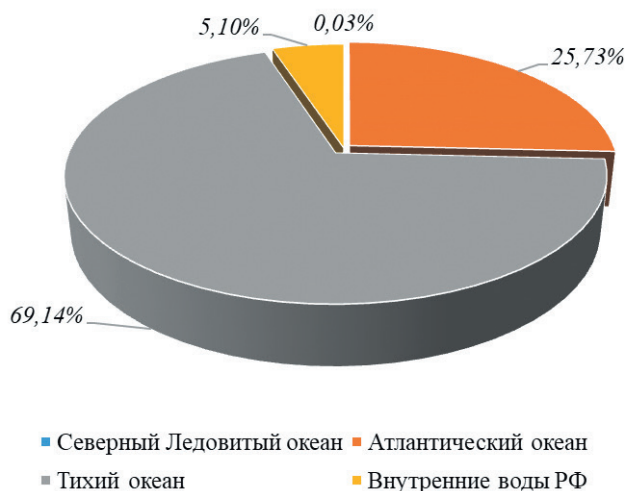


Рис. 3. География и объемы добычи рыбы в России в 2020 г., в % [24].

Fig. 3. Geography and fishery volumes in Russian in 2020, in % [24].

Объемы добычи российским рыболовным флотом за последние пять лет стабилизировались на уровне около 5 млн тонн. Основная доля промысла сосредоточена в Тихом океане (Дальневосточный бассейн) (рис. 3). При этом в структуре промысла значительную долю составляет минтай. В табл. 2 представлена структура океанского вылова в России в 2020 г. Следует отметить, что в это же время в соответствии с Постановлением Правительства РФ № 485 от 27.09.2021 г. «О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации «Развитие рыбохозяйственного комплекса» началась реализация Программы государственной поддержки инвестиционных квот под строительство современных промысловых судов и предприятий по переработке рыбы и морепродуктов. По результатам реализации данной программы предполагается сокращение изношенного флота и строительство новых судов. Однако несмотря на модернизацию и реализуемые мероприятия по формированию эффективной системы освоения морских биологических ресурсов, рыбопромысловые суда являются источниками образования большого количества отходов разного генезиса [23], что способно ухудшить качество морской среды и может, в свою очередь, отразиться на запасах морских ресурсов.

Каждое рыболовное судно генерирует определенное количество отходов, объем которых зависит от длины судна, водоизмещения, мощности главного и вспомогательных двигателей, количества экипажа, продолжительности рейса, типа добываемых ресурсов. К основным загрязнителям, поступающим в морскую среду с судов в виде эксплуатационных отходов, можно отнести нефть и её производные, сточные воды, мусор, противобрастающие покрытия, грязные балластные воды, выбросы в атмосферу, а также пластиковые отходы от эксплуатации орудий лова и упаковки продукции (табл. 3).

Таблица 2

Видовая структура российского океанского промысла
со способами добычи в 2020 г. по данным [24]

The fish species structure of the Russian ocean fishery with production methods in 2020 [24]

Объект промысла	Вылов, тонн	Способ добычи
Минтай	1 731 746	Траловый, неводной
Сельдь тихоокеанская	385 034	Траловый, неводной
Треска атлантическая	320 800	Траловый
Тихоокеанские лососи	269 250	Ловушечный, неводной, сетной
Путассу северная	188 006	Траловый
Треска тихоокеанская	154 509	Траловый, ярусный
Скумбрия восточная	152 862	Траловый
Скумбрия атлантическая	147 746	Траловый
Камбалы, палтусы, морские языки	131 417	Траловый, неводной, ярусный, сетной
Сардина иваси	131 088	Траловый, неводной
Сельдь атлантическая, балтийская, беломорская	113 679	Траловый, неводной, ловушенный
Головоногие моллюски	98 228	Траловый, ловушенный, водолазный
Крабы и крабоиды	92 119	Ловушечный
Пикша	76 370	Траловый
Креветки, шримсы	44 389	Траловый, ловушечный
Беспозвоночные, моллюски и оболочники	42 828	Траловый, водолазный
Остальные виды	642 438	
Итого	4 731 509	

Таблица 3

Характеристики загрязнений,
поступающих в окружающую среду при рыбном промысле

The pollution characteristics entering the environment during the fishing

Вид отхода	Причина и источник образования	Нормирование загрязнения, ед. измерения
Льяльные воды	Мощность энергетических установок	Количество нефтесодержащих льяльных вод, м ³ /сут.
Трюмные и балластные воды	Водоизмещение судна	Бактериологический показатель, более 5000 КОЕ/л. Общее микробное число, не более 100 КОЕ/мл.
Санитарные (мыгьевые воды)	Количество экипажа	Загрязненные воды, 50 л/(чел.*сут.)
Фекальные (фановые воды)	Количество экипажа	Загрязненные воды, 4100 мл/(чел.*сут.)
Твердые отходы (стружка, тара, бумага, ветошь)	Количество экипажа	Сухой бытовой мусор, 0,002 м ³ /(чел.*сут.)
Пищевые отходы	Количество экипажа	Пищевые отходы, 0,003 м ³ /(чел.*сут.)

Вид отхода	Причина и источник образования	Нормирование загрязнения, ед. измерения
Выбросы отработавших газов от сгорания топлива	Тип и мощность силовой установки	Расход топлива, кг/ч*коэффициент выбросов углерода, тонн/Дж
Пластиковые отходы от эксплуатации орудия лова	Вид и размер орудия лова	Масса орудия лова на количество промысловых операций, кг

Для большинства вышеуказанных загрязнений существуют расчетные нормы образования отходов, которыми регламентированы действия по их сбору, учету и утилизации. При этом установлено, что количество образуемых отходов зависит от типа судна, количества членов экипажа, объекта промысла и технологического процесса, осуществляемого на борту, и продолжительности рейса.

Исследование структуры рыбодобывающего флота на промысле самого массового объекта — минтая, показало преобладание трех типов судов: относящийся к категории крупнотоннажных большой морозильный рыболовный траулер (БМРТ) проекта Пулковский меридиан, среднетоннажный — средний траулер рыболовный (СТР) проекта Альпинист-503 и малотоннажный рыболовный сейнер — РС-300. Результаты предварительного анализа количества отходов, образующихся на этих судах во время промысла минтая в Охотском море при средней продолжительности рейса три месяца, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Качественная и количественная структура отходов на основных типах рыболовных судов во время промысла минтая в Охотском море

Qualitative and quantitative waste structure on the fishing vessels main types during pollock fishing in the Sea of Okhotsk

Виды отходов	БМРТ	СТР	РС
Сточные воды, в том числе нефтесодержащие, от эксплуатации судовых энергетических установок, тонн	600	180	46
Биологические отходы от переработки рыбы, тонн	3000	1200	0
Бытовые отходы от жизнедеятельности экипажа, тонн	7	2,5	0,6
Синтетические (пластиковые) отходы от использованных орудий лова, тонн	7	3,5	1
Итого	3614	1386	47,6

Учитывая, что на промысле минтая в Охотском море работает около 50 БМРТ, 50 СТР, 10 РС, общее количество отходов составляет около 250 тысяч тонн, из которых около 500 тонн — это пластик от использованных орудий лова.

Анализ данных по управлению отходами показал, что использованные орудия лова в числе судовых отходов не учитываются как на национальном, так и на международном уровнях. Приложение V Конвенции МАРПОЛ запрещает сброс в море любой пластмассы и пластмассовых изделий, включая веревки и рыболовецкие сети из синтетических материалов, однако в нем предусмотрены исключения, связанные со «случайной утратой орудий лова, при условии, что

для предотвращения такой утраты были приняты все разумные меры предосторожности» [11].

Учитывая количество образуемых синтетических отходов от использованных орудий лова и отсутствие их в номенклатуре сдаваемых в порту на утилизацию, можно предположить, что данный вид материала попадает в морскую среду. В качестве еще одной причины их отсутствия в порту следует отметить навигационно-логистическую специфику рыболовного флота Дальневосточного региона, который до недавнего времени редко заходил в российские порты, предпочитая проходить ежегодное межрейсовое техническое обслуживание в портах Норвегии, Китая и Южной Кореи.

Международное сообщество пытается решить проблему загрязнения морской среды отходами, образовавшимися от использования орудий лова, с помощью их маркировки [12, 14], однако это пока малоэффективно.

Российская государственная система обращения с отходами, действующая на основе классификации отходов, установленной основным классификатором Федеральным классификационным каталогом отходов (ФККО), утвержденным приказом Федеральной службы по надзору в сфере природопользования № 242 от 22.05.2017 г., включает ряд отходов, образуемых на рыболовных судах, например, «особые судовые отходы» под кодом 7 34 205 21 72 4, «мусор от бытовых помещений судов и других плавучих средств, не предназначенных для перевозки пассажиров» под кодом 7 33 151 01 72 4. Однако в действующей редакции ФККО не учитываются, а значит, и отсутствуют подходы к управлению такими отходами, как изношенные орудия лова. Данный тип отходов мог бы быть отнесен к категории «особые судовые отходы», но, вследствие большого объема массы, а также весьма негативных последствий от их попадания в морскую среду [25], это нецелесообразно, и поэтому требует их выделения в самостоятельную категорию отходов.

Таким образом, для снижения воздействия рыболовства на окружающую среду необходимо определить структуру и объемы всех отходов, которые генерируются во время рыбного промысла. Кроме того, требуется разработка системы обращения с соответствующими видами отходов, которая бы включала расчетные показатели образования отходов, план действий по их сбору, учету и утилизации, а также предполагала последующую интеграцию рыболовных отходов в экономику замкнутого цикла.

Выводы

На основании выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

— Мировое и отечественное рыболовство является мощным антропогенным фактором, оказывающим негативное воздействие на состояние ВБР и экосистему Мирового океана. Негативное воздействие осуществляется по двум направлениям: нерациональный промысел и загрязнение отходами. Установлено, что только на промысле минтая в Охотском море ежегодно образуется около 250 тысяч тонн разнообразных отходов, включая фрагменты оставленных, утерянных или

иным образом выброшенных орудий лова, которые преимущественно попадают в морскую среду. Несмотря на очевидность данной проблемы, до сих пор нет достоверных данных о количестве потерянных орудий лова как в отечественной, так и в мировой практике.

— Мировая тенденция сокращения количества рыбопромысловых судов, обозначившаяся в течение последних пяти лет (с 2015 г. по 2020 г. на 8 %), сама по себе не гарантирует снижения антропогенного воздействия из-за общемировой тенденции по увеличению размеров и мощности судов и размеров орудий лова.

— Одной из глобальных нерешенных экологических проблем является рост загрязнения Мирового океана пластиком, в числе которого значительная доля представлена изношенными орудиями лова. Для решения данной проблемы представляется целесообразным совершенствование системы управления отходами, образующимися на рыбопромысловом флоте в части учета, хранения, транспортировки и переработки пластиковых отходов как на национальном, так и на международном уровне.

Список литературы

1. ФАО. Состояние мирового рыболовства и аквакультуры — 2022. На пути к «голубой» трансформации. Рим: ФАО, 2022. 236 с. doi.org/10.4060/cc0461ru.
2. Rousseau Y., Watson R. A., Blanchard J. L., Fulton E. A. Evolution of global marine fishing fleets and the response of fished resources // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2019. V. 116(25). P. 12238—12243. doi.org/10.1073/pnas.1820344116.
3. GESAMP. Report of the Thirty-first Session. Rep. Stud. GESAMP. 2001. № 72, 56 p.
4. Баранов Ф. И. К вопросу о биологических основаниях рыбного хозяйства // *Известия отдела рыбоводства и научно-промысловых исследований*. 1918. Т. 1. Вып. 1. С. 84—128.
5. Баранов Ф. И. К вопросу о динамике рыбного промысла // *Бюллетень рыбного хозяйства*. 1925. № 8. С. 26—38.
6. Cushing D. H. *Marine ecology and fisheries*. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1975. 278 pp.
7. Larkin P. A. An epitaph for the concept of maximum sustained yield // *Trans. Amer. Fish. Soc.* 1977. V. 106. P. 1—11.
8. Хилборн Р. Количественные методы оценки рыбных запасов. Выбор, динамика и неопределенность. СПб.: Политехника, 2001. 228 с.
9. Worm B. Rebuilding global fisheries // *Science*. 2009. V. 325(5940). P. 578—585.
10. Pauly D., Zeller D., Woroniak J. et al. Fishery biomass trends of exploited fish populations in marine ecoregions, climatic zones and ocean basins // *Stuarine, Coastal and Shelf Science*. 2020. V. 243. 106896. doi:10.1016/j.ecss.2020.106896.
11. Конвенция по предотвращению загрязнения моря сбросами отходов и других материалов от 29 декабря 1972 года. Сборник действующих договоров, соглашений и конвенций, заключенных с иностранными государствами. 1978. Вып. XXXII. 540 с.
12. ФАО. Рекомендации по маркировке орудий лова. Рим: ФАО, 2020. 33 с.
13. Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП). Проблема загрязнения и ее решение: Глобальная оценка загрязнения морской среды мусором и пластмассами. Сводный доклад. Найроби: ЮНЕП, 2021. 44 с.
14. IMO's Maritime Environment Protection Committee (MEPC). Action plan to address marine plastic litter from ships // International Maritime Organization: official website. URL: <https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/IMO%20marine%20litter%20action%20plan%20MEPC%2073-19-Add-1.pdf> (дата обращения: 03.05.2023).
15. Lebreton, L., B. Slat, F. Ferrari et al. Evidence That the Great Pacific Garbage Patch Is Rapidly Accumulating Plastic // *Scientific Reports*. 2018. V. 8(1). 4666. doi:10.1038/s41598-018-22939-w.

16. Notten, P. Addressing marine plastics: A systemic approach — Recommendations for action. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2019. 74 pp.
17. Кузнецов, Ю. А., Организационно-технический базис рыболовства, рыбоводства и аквакультуры: учебное пособие. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2014. 339 с.
18. Исаев С. В. Концепция природно-технических систем и ее использование при изучении антропогенной трансформации природной среды // Географический вестник. 2016. N 3(38). С. 106—113. doi: 10.17072/2079-7877-2016-3-105-113.
19. Патин С. А. Антропогенное воздействие на морские экосистемы и биоресурсы: источники, последствия, проблемы // Труды ВНИРО. 2015. Т. 154. С.85—104.
20. Фридман А. Л., Севастьянов Н. Б. Резервы рыболовства // Рыбное хозяйство. № 10. 1990. С. 3—8.
21. Сроки эксплуатации рыболовных судов. Ассоциация судовладельцев рыболовного флота: офиц. сайт. — URL: <https://fsarf.ru/analytics/sroki-ekspluatatsii-rybolovnykh-sudov/> (дата обращения: 03.05.2023).
22. Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота: офиц. сайт. — URL: <https://cniimf.ru/> (дата обращения: 03.05.2023).
23. Ершова А. А., Ерёмкина Т. Р., Макеева И. Н. и др. Микропластиковое загрязнение морской среды Баренцева и Карского морей в 2019 г. // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 691—711. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-691-711.
24. Статистические сведения по рыбной промышленности России. М.: ВНИРО, 2021. 90 с.
25. Майсс А. А., Блиновская Я. Ю., Высоцкая М. В. Потерянные орудия лова: оценка, экологические последствия и пути решения // Успехи современного естествознания. 2018. № 11. С. 185—190.

References

1. FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture — 2022. Towards a «blue» transformation. Rome: FAO, 2022: 236 p. doi.org/10.4060/cc0461ru.
2. Rousseau Y., Watson R. A., Blanchard J. L., Fulton E. A. Evolution of global marine fishing fleets and the response of fished resources. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2019. 116(25): 12238—12243 p. doi. org/10.1073/pnas.1820344116.
3. GESAMP. Report of the Thirty-first Session. 2001; (72): 56 p.
4. Baranov F. I. On the biological basis of fisheries. *Izvestiya otdela rybovodstva I nauchno-promyslovykh issledovaniy = News of the Department of Fish Farming and Scientific and Commercial Research*. 1918; 1 (1):(84—128). (In Russ.).
5. Baranov F. I. On the dynamics of fisheries. *Byulleten' rybnogo khozyaystva = Fisheries Bulletin*. 1925; (8):(26—38). (In Russ.).
6. Cushing D. H. Marine ecology and fisheries. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1975: 278 p.
7. Larkin P. A. An epitaph for the concept of maximum sustained yield. *Trans. Amer. Fish. Soc.* 1977; (106):1—11.
8. Khilborn R. *Kolichestvennye metody otsenki rybnykh zapasov. Vybor, dinamika I neopredelennost = Quantitative methods for estimating fish stocks. Choice, dynamics and uncertainty*. SPb.: Polytechnika, 2001: 228. (In Russ.).
9. Worm B. Rebuilding global fisheries. *Science*. 2009; 325(5940): 578—585.
10. Pauly D., Zeller D., Woroniak J. et al. Fishery biomass trends of exploited fish populations in marine ecoregions, climatic zones and ocean basins. *Stuarine, Coastal and Shelf Science*. 2020. 243: 106896. doi: 10.1016/j.ecss.2020.106896.
11. Convention on the Prevention of Marine Pollution by Discharges of Waste and Other Materials of 29 December 1972. Collection of existing treaties, agreements and conventions concluded with foreign states. 1978. XXXII: 540.
12. FAO. Recommendations for marking fishing gear. Rome: FAO, 2020: 33 p.
13. United Nations Environment Programme (UNEP). Pollution problem and its solution: Global assessment of marine pollution by debris and plastics. Summary report. Nairobi: UNEP, 2021: 44 p.
14. Action plan to address marine plastic litter from ships. International Maritime Organization: official website. Available at: <https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/HotTopics/>

- Documents/IMO%20marine%20litter%20action%20plan%20MEPC%2073-19-Add-1.pdf (accessed on: 03.05.2023).
15. Lebreton, L., B. Slat, F. Ferrari et al. Evidence *That the Great Pacific Garbage Patch Is Rapidly Accumulating Plastic*. Scientific Reports. 2018; 8(1): 4666. doi:10.1038/s41598-018-22939-w.
 16. Notten, P. Addressing marine plastics: A systemic approach — Recommendations for action. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2019: 74 p.
 17. Kuznetsov Yu. A., *Organizacionno-technicheskiy basis rybolovstva, rybovodstva I akvakultury = Organizational and technical basis of fishing, fish farming and aquaculture*. A textbook. Vladivostok: Dalrybtuz, 2014: 339 p. (In Russ.).
 18. Isaev S. V. The concept of natural and technical systems and its use in the study of anthropogenic transformation of the natural environment. *Geographicheskii vestnik = Geographic Bulletin*. 2016; 3(38):(106—113). (In Russ.). doi: 10.17072/2079-7877-2016-3-105-113.
 19. Patin S. A. Anthropogenic impact on marine ecosystems and bioresources: sources, consequences, problems. *Trudy VNIRO = Proceedings of VNIRO*. 2015; (154):(85—104). (In Russ.).
 20. Fridman A. L., Sevastianov N. B. Fisheries Reserves. *Rybnoye khozyaistvo = Fisheries*. 1990; (10):(3—8). (In Russ.).
 21. Life of fishing vessels. Association of fishing fleet shipowners: officers. Available at: <https://fsarf.ru/analytics/sroki-ekspluatatsii-rybolovnykh-sudov/> (accessed on: 03.05.2023).
 22. Central Research and Design Institute of the Navy: office holder. Available at: <https://cniimf.ru/> (accessed on: 03.05.2023).
 23. Ershova A. A., Eremina N. R., Makeeva I. N. et al. Marine environmental microplastic pollution of the Barents and Kara seas in 2019. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2022; (69):(691—711). (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-691-711.
 24. *Statisticheskiye svedeniya po rybnoy promyshlennosti = Statistical data on the fishing industry of Russia*. M.: VNIRO. 2021: 90 p. (In Russ.).
 25. Maiss A. A., Blinovskaya Ya. Yu., Vysotskaya M. V. Lost Fishing Gear: Assessment, Environmental Impacts and Solutions. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = The successes of modern natural science*. 2018; (11):(185—190). (In Russ.).

Сведения об авторах

Артур Айварович Майсс, старший преподаватель кафедры промышленного рыболовства, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, mayss.aa@dgtru.ru.

Наталья Александровна Майсс, кандидат экономических наук, доцент, доцент Департамента менеджмента и предпринимательства, Дальневосточный федеральный университет, Школа экономики и менеджмента, mayss.na@dvfu.ru.

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

Мария Владимировна Высоцкая, аспирант, Дальневосточный федеральный университет, Политехнический институт, департамент природно-технических систем и техносферной безопасности, vysotskaya.mv@dvfu.ru.

Information about authors

Artur Aivarovich Maiss, Senior Lecturer of Department of Industrial Fishing, Far Eastern State Technical Fisheries University, mayss.aa@dgtru.ru.

Natalia Alexandrovna Maiss, PhD (Econ. Sci.), associate professor, Far Eastern Federal University, Economic and Management school, entrepreneurship and management department, mayss.na@dvfu.ru.

Yana Yurievna Blinovskaya, Grand PhD (Tech. Sci.), associate professor, Far Eastern Federal University, Polytechnical institute, natural and technical system and technospherical safety department, professor, blinovskaia.iaiu@dvfu.ru.

Maria Vladimirovna Vysotskaya, post-graduate student, Far Eastern Federal University, Polytechnical institute, natural and technical system and technosferical safety department, vysotskaya.mv@dvfu.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 29.05.2023

Принята к печати после доработки 15.08.2023

The article was received on 29.05.2023

The article was accepted after revision on 15.08.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 525—555.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(72): 525—555.

Научная статья
УДК 528.8:553.9(26)
doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-525-555

Обзор методов дистанционного обнаружения морских залежей углеводородов

***Виктория Владимировна Позднякова,
Марина Александровна Кустикова***

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация, viktoriya.17@mail.ru

Аннотация. Мировой океан содержит огромное количество минеральных ресурсов, среди которых большую долю занимают углеводороды. По мере развития методов и технологий обнаружения морских залежей возможности и научная база расширяются. Особое внимание уделяется дистанционным методам исследования океана, что обусловлено их наибольшей информативностью и возможностью оперативного получения данных. В данной работе выполнен анализ источников, представляющих интерес для исследователей, занимающихся разработкой методов и средств обнаружения морских залежей углеводородов с использованием информации о видах и индикаторах, их возможных проявлениях на поверхности воды, а также о существующих методах их дистанционного обнаружения. Обзор научной литературы позволяет наметить основные задачи и перспективы исследований в области обнаружения морских залежей.

Ключевые слова: морские залежи углеводородов, методы дистанционного обнаружения углеводородов, геологоразведка, оценка нефтегазоносности акватории, индикаторы морских залежей, углеводороды, Мировой океан.

Для цитирования: Позднякова В. В., Кустикова М. А. Обзор методов дистанционного обнаружения морских залежей углеводородов // Гидрометеорология и экология. 2023. № 72. С. 525—555. doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-525-555.

Original article

The offshore hydrocarbon deposits remote detection methods review

Viktoriia V. Pozdniakova, Marina A. Kustikova

ITMO University, Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia

Summary. The World Ocean contains a huge amount of mineral resources at its bottom, among which hydrocarbons occupy a large share. The suitable method for identifying indicators of offshore hydrocarbon deposits choice is an important step towards qualitative and quantitative analysis results. With the detecting marine deposits technologies development special attention are paid to Remote Ocean studying methods. This article gives an overview aimed at presenting the available information on the types and indicators

of marine hydrocarbon deposits, their possible manifestations on the water surface, as well as on existing methods of their remote detection.

In the presented work, the main hydrocarbon gases, their background concentrations and manifestations in the water areas were analyzed and described. It was found out that the following factors are indicators of deposits: the presence of gas bubbles on the water surface and the water column; development of phytoplankton vital activity; water temperature change; the presence of mud volcanoes.

This article discusses such remote methods of offshore hydrocarbon deposits detecting as gravimetric method, magnetometric, seismic, geoelectrochemical and acoustic methods. Furthermore, the analysis of satellite methods is also presented by aerospace photography and thermal imaging, as well as the analysis of optical methods - the method of absorption spectroscopy, the method of fluorescence, laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and Raman spectroscopy. The comparative analysis of the methods characteristics as well as technical features are given, among which the most and least studied are identified.

The review allows to outline the main tasks and prospects of research in the field of marine exploration.

Keywords: marine hydrocarbon deposits, offshore hydrocarbon deposits, remote hydrocarbons detection methods, geological exploration, assessment of oil and gas potential of the water area, marine deposits indicators, hydrocarbons, the World Ocean.

For citation: Pozdniakova V. V., Kustikova M. A. The offshore hydrocarbon deposits remote detection methods review. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(72): 525—555 (In Russ). doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-525-555.

Введение

Мировой океан содержит огромное количество ресурсов, включая углеводороды, полезные ископаемые, гидротермальные источники и биологические ресурсы [1, 2]. По данным [3], континентальный шельф содержит около 35 % мировых запасов нефти и 29 % запасов природного газа (рис. 1); разработанные морские месторождения обеспечивают 30 % общемировой добычи нефти и газа.

Первая «морская» скважина была пробурена в Каспийском море в 1949 г. [4], однако активные геологоразведочные работы морских месторождений начались примерно в 60-х годах прошлого столетия [5—6].

Ресурсы Мирового океана, млрд т нефтяного эквивалента



Рис. 1. Углеводородный потенциал морских месторождений [2].

Fig. 1. Hydrocarbon potential of offshore fields.

Для понимания тенденций совершенствования методов обнаружения морских углеводородов был проведен библиометрический анализ на основе одной из самых крупных библиографических и реферативных баз данных рецензируемой научной литературы Scopus, согласно которой первые научные публикации, посвященные методам обнаружения морских залежей углеводородов, появились только в 1981 г. Значительный рост публикационной активности начался с 2008 г. По результатам анализа данных, приведённых на рис. 2, можно сделать вывод об эволюции направлений исследований в области шельфовой геологоразведки. Так, до 2014 г. основные исследования были посвящены строению нефтяных пластов инвазивными методами каротажа и нефтяного машиностроения. С 2015 г. по настоящее время к актуальным вопросам относятся методы дистанционного обнаружения углеводородов, основанные на изучении разных физических и химических явлений, происходящих в толще воды.

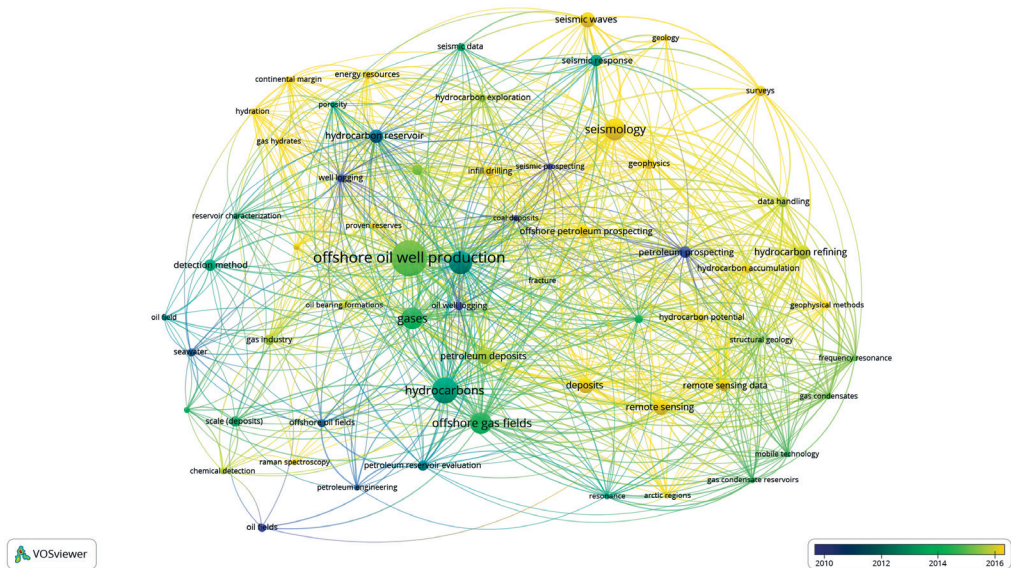


Рис. 2. Библиометрическая карта использования ключевых слов по теме «Методы обнаружения морских залежей углеводородов» (по данным базы Scopus на конец декабря 2022 г.), отображающая наиболее часто встречающиеся в статьях в различный период времени ключевые слова, которые имеют цветовой градиент от фиолетового (основное количество публикаций выпускалось в 2010 г. и ранее) до желтого (публикации с 2016 г.) в зависимости от даты публикации.

Fig. 2. Bibliometric map of the keywords use on the topic “Methods for detecting offshore hydrocarbon deposits” (based on Scopus data from the end of December 2022) displaying the most frequently used keywords in articles in different periods of time, which have a color gradient from purple (the main number of publications were issued in 2010 and earlier) to yellow (published since 2016) depending on the publication date.

Помимо этого, основываясь на данных библиометрического анализа, следует отметить тенденцию разделения научных исследований на кластеры. Так, например, отдельно выделяется направление «сейсмология», что объясняет обширную применимость, значимость и изученность данного метода. Однако несмотря на «популярность» вопросов сейсмологии, можно сделать вывод о том, что многие темы представленного направления были обширно исследованы лишь в период с 2012 г. по 2014 г. В свою очередь, кластер «Дистанционные методы детектирования» становится все более привлекательным в настоящее время. Помимо кластеров «Сейсмология» и «Дистанционные методы детектирования» ярко выражены исследования о «Расчете потенциала нефтегазоносности», а также «Геологическом описании резервуаров».

Данная работа посвящена обзору существующих методов дистанционного детектирования различных видов морских залежей углеводородов, а также индикаторных веществ и их проявлений на дне, поверхности или в толще воды. Приведен сравнительный анализ характеристик методов, среди которых выявлены наиболее и наименее изученные. Обзор позволяет наметить основные методологические задачи и перспективы исследований в данной области.

Виды морских углеводородов

Углеводород представляет собой органическое вещество, состоящее из углерода и водорода [7]. В природе углеводороды как в газообразной (метан C_1 , этан C_2 , пропан C_3 , бутан C_4), так и в жидкой фазах (бензол, гексан, октан, газовый конденсат C_5+), в основном содержатся в пористых горных породах, составляющих верхнюю континентальную кору Земли, являются продуктом химических и физических процессов, и могут сохраняться в течение тысяч или миллионов лет [8]. Углеводороды с более низкой молекулярной массой находятся в газообразном состоянии, в то время как углеводороды с более высокой молекулярной массой представляют собой жидкие или воскообразные твердые вещества [9].

Считается, что морская среда идеальна для образования углеводородов, поскольку фитопланктон, зоопланктон, наземные и морские растения оседают в большом количестве на морском дне, и содержащееся в них органическое вещество быстро подвергается анаэробному разложению из-за незначительного содержания кислорода на глубине [10]. Кроме того, высокие и быстрые скорости осадения, типичные для определенных морских сред, способствуют быстрому захоронению и разложению органического вещества из-за изменения температуры в зависимости от глубины залегания.

Наиболее распространенным углеводородом является метан, который считается относительно чистым ископаемым топливом, однако он также является важным парниковым газом, мониторинг которого необходимо проводить постоянно, чтобы избежать массовых утечек. Глубоководные морские отложения являются крупнейшим резервуаром метана, в основном в их гидратной форме [11].

В статье [12] описаны результаты исследований, включающие определение нефтегазового потенциала, проводившихся вдоль склона юго-западного суббассейна

Южно-Китайского моря. На основе 39 образцов сделан вывод, что из представленных проб метан является доминирующим газом. Его концентрация изменялась от 0,5 до 440 ppm, при этом фоновой считается концентрация в 40 ppm. Помимо этого, аномальные концентрации метана наблюдались на обширных территориях. В исследованиях [13—14] также отмечаются высокие концентрации метана, что говорит о газоносном потенциале акватории [15]. Помимо метана были также отмечены превышения фоновых концентраций таких газов, как этан, этилен и пропан, концентрация этилена составляла 0,06—70 ppm, а этана — 0,01—124 ppm. В [16—18] представлена похожая ситуация, когда измеренные концентрации углеводородных газов значительно превышали фоновые.

Отдельное внимание следует уделить значениям фоновых концентраций углеводородов, которые имеют отличающиеся значения для разных регионов [19]. Это требуется для выявления аномалий концентрации, которые могут быть результатом миграции. Фоновые концентрации метана для некоторых акваторий океана приведены в табл. 1. Для удобства сравнения приведённые в таблице концентрации были переведены в общую единицу измерения — ppm.

Таблица 1

Фоновые концентрации метана на различных акваториях
Methane background concentrations in various water areas

№	Акватория	Фоновая концентрация	Источник
1	Северное море	0,025—0,05 ppm	[19]
2	Южно-Китайское море	40 ppm	[12]
3	Баренцево море	0,178 ppm	[19]
4	Норвежское море	1,91—1,95 ppm	[17]
5	Берингово море	30—80 ppm	[18]
6	Гданьский залив	14 ppm	[20]

Процессы просачивания углеводородов

Углеводороды менее плотны, чем окружающие породы и отложения, поэтому они имеют тенденцию мигрировать в более мелкие осадочные горизонты и, в конечном итоге, «прокалывать» морское дно, приводя к возникновению своеобразных особенностей морского дна, таких как покмарки [21—22], газовые сипы [23] и грязевые вулканы [24].

Впервые просачивание углеводородных газов было описано в [25], а затем подтверждено многими научными исследованиями, в том числе российскими [26—33].

Просачивание углеводородов варьируется от больших концентраций — макросипов — до очень сложно детектируемых — микросипов [34, 35]. Поверхностное просачивание углеводородов разделяют на активное и пассивное [35]. Активными называются области просачивания, где фиксируются высокие концентрации углеводородов над самими залежами, они также подразделяются на постоянные и разовые [36]. Постоянные газовые проявления способны обеспечивать

жизнь хемоавтотрофным организмам, к которым относятся метанотрофные митилиды (мидии) и моллюски *Vesicomyid*, что, в свою очередь, может являться индикатором местонахождения морских залежей. Разовыми газовыми проявлениями называют экстренный выброс большого количества газа в приповерхностный слой, например, в виде грязевых вулканов или газовых факелов [37]. Пассивные же характеризуют акватории, где фиксируются предповерхностные просачивания в очень маленьких концентрациях (меньше 50 ppm) и обнаруживаются газовые гидраты в донных отложениях.

Активные выбросы происходят за счет быстрого осадконакопления и движения тектонических плит, что приводит к активному образованию залежей под избыточным давлением и диапиризму за счет ила и соли. Такие проявления характерны для южных районов Каспийского моря [38], Мексиканского залива [39] и др. Пассивная микрофильтрация в основном встречается в северных регионах: Норвежское море [40], Чукотское море [41], Северное море и происходит в бассейнах с медленным осадконакоплением и «тектоническим покоем» [34].

Одной из важных задач в фиксировании просачиваний углеводородов является интерпретация поверхностных геохимических данных, для чего необходимо понимание вертикального и горизонтального распределения аномальных углеводородов. Горизонтальное распределение формируется за счет аномальных концентраций углеводородов, значительно превышающих фоновые, которые образуются над нефтегазовыми месторождениями, образуя ореолы рассеяния [34]. В статье [34] приводится обзор исследований [40, 42—47], в которых описаны узорчатые ореолы микросипов над различными морскими месторождениями. Большинство примеров показывает, что наибольшие концентрации углеводородов наблюдаются вблизи самих разломов и в донных осадках, но никаких геофизических или геохимических аномалий в толще воды или на поверхности океана обнаружено не было.

Однако выполненные исследования вертикального распределения углеводородов [48—52] демонстрируют значительные различия в их концентрациях и типах. Вертикальные профили показали наличие углеводородов и их увеличение с глубиной. Например, в исследовании [53] при проведении анализа вертикального распределения выявлено, что общая концентрация газа увеличилась более чем в 100 раз при увеличении глубины от 1 до 10 м (рис. 3). Кривая вертикального распределения концентраций весьма важна и для других акваторий [26, 55—56].

Российские исследования [26—32] зафиксировали выход метана в атмосферу. Метан выбрасывается в атмосферу двумя процессами: диффузионным переносом газа и кипением (барботажем) через границу раздела «вода–атмосфера» [29]. Особенно активные выбросы метана из донных источников наблюдались в мае–июне, так как в это время происходит перемешивание газа по всей толще воды в результате конвекции [37].

После выброса метана в водную толщу может происходить либо окислительный процесс, где метан растворяется в воде, либо пузырьки газа достигают водной поверхности, где возможен один из двух вариантов: переход в атмосферу в летний период, так как метан не успевает окислиться, или столкновение с ледовой

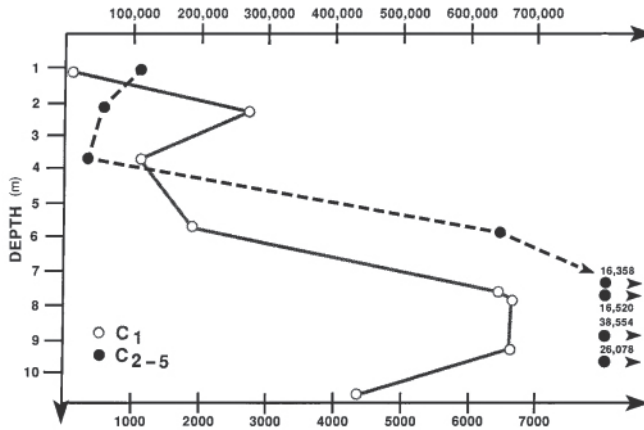


Рис. 3. Зависимость концентраций углеводородов от глубины шельфа Мексиканского залива [53], где C_1 и C_{2-5} — виды углеводородов.

Fig. 3. Dependence of hydrocarbon concentrations on the depth in the shelf of the Gulf of Mexico [53], where C_1 and C_{2-5} are the hydrocarbons types.

поверхностью в зимний период [57]. При этом окисление метана сопровождается значительным выделением тепла [58], поэтому в зимний период на нижней границе льда могут фиксироваться трещины и каналы. Помимо этого скорость подъема пузырьков может также быть индикатором вертикальных течений [59].

Анализ углеводородных газов, которые мигрировали на поверхность, и сопутствующих факторов позволяет получить полезную информацию о подповерхностных углеводородных системах, особенно в плохо изученных «пограничных» районах, где нет доказательств наличия нефтяных систем путем глубокого бурения. Информация о просачивании углеводородов имеет огромное значение при планировании геологоразведочных исследований для понимания геологии морского бассейна и динамики образования нефтегазовых залежей, а также при правильной интерпретации поверхностных геохимических данных. Данные исследования также представляют особую ценность для климатического мониторинга.

Дистанционные методы детектирования

Просачивание углеводородов на поверхность акватории является индикатором потенциальной нефтегазоносности территории, однако в то же время из-за изменения плотности воды является опасным фактором для проведения полевых судовых работ по оценке предполагаемых месторождений [60]. Помимо этого прямой отбор проб газа в водной среде не так прост, как на суше из-за высокого гидростатического давления и необходимости поддерживать давление отбираемых жидкостей на уровне их собственного [61]. В связи с этим методы дистанционного зондирования являются наиболее оптимальными и актуальными.

Геологоразведка начинается с изучения морской толщи воды и морского дна. Для этих целей сначала используют неинвазивные методы, а затем, после определения примерного объема и местонахождения залежей, используется метод пробной скважины [62].

Неинвазивные методы обнаружения углеводородов можно разделить на те, которые применяются с исследовательских судов, авиационные или спутниковые методы, транспортные подводные аппараты (ТПА), а также гибриды перечисленных методов [63].

К методам обнаружения углеводородов с судов относятся: гравиметрический метод, магнитометрический, сейсмический, геоэлектрохимический и акустический.

Гравиметрический метод основан на измерении изменений в гравитационном поле Земли. Данный метод может быть использован для обнаружения подводных холмов и вулканических образований, которые могут указывать на наличие месторождений. Гравиметрические работы обычно включают в себя опорные (причальные), рядовые и контрольные морские измерения [64]. Опорные (причальные) измерения проводятся на борту судна до его отправки в полевые исследования в течение нескольких суток, рядовые измерения проводятся при самих геофизических работах и контрольные — по секущим профилям.

Помимо непосредственных измерений с судна существуют также аэрогравиметрические системы, позволяющие провести анализ территории с воздушных носителей [65]. При сравнении наземной и воздушной гравиметрии китайскими исследователями [66] было отмечено, что в целом разломы крупного и среднего размера, полученные с воздушных носителей, совпадают с наземными измерениями, но есть различия в расположении мелкомасштабных разломов.

Современные программные пакеты, разработанные российскими учеными для обработки гравиметрических данных [67—68], совместно с данными систем спутникового позиционирования позволяют снизить погрешность приливных поправок.

Однако данный метод не всегда является точным из-за возможного наличия других объектов, которые могут влиять на гравитационное поле. При проведении измерений в Арктическом регионе возникают трудности из-за ограничения в маневрировании, которые связаны с постоянным перемещением ледового покрова с разной толщиной и сплоченностью [69].

Магнитометрический метод основан на измерении изменений в магнитном поле Земли, обусловленных магнитными свойствами подстилающих пород [70], и используется для обнаружения подводных магматических пород и других объектов, которые могут указывать на наличие месторождений.

Измерения проходят следующим образом: два магнитометра опускаются за борт судна на разном расстоянии, в результате чего получается градиент магнитных аномалий, который в дальнейшем дает возможность картировать зоны разломов и более детально исследовать геолого-структурное строение исследуемой территории [64]. Данная процедура также может применяться при неэффективности гидроакустических средств, например, на мелководьях [71], но при условии разработки усовершенствованной модели магнитного градиента, описанной в [72].

К очевидным достоинствам магниторазведки относится ее низкая стоимость по сравнению с другими методами [73]. Магнитные съемки в шельфовых морях направлены не только на изучение структуры дна, но и на прогнозирование экологических опасностей [72].

Основная проблема как гравиметрического, так и магнитометрического метода состоит в том, что зачастую источники могут создавать один и тот же гравитационный и/или магнитный резонанс [74], а в высокоширотных районах точность геомагнитной съемки существенно снижается из-за искажающего влияния геомагнитных вариаций [72, 75].

Сейсмическая разведка — метод, при котором на дно акватории опускается специальное оборудование, состоящее из искрового излучателя (спаркера) и приемного устройства (косы), генерирующее звуковые волны, которые отражаются от различных слоев грунта и возвращаются на поверхность, где они регистрируются и анализируются.

Разделяют традиционную сейсмическую обработку (частота от 5 до 120 Гц) для разведки морских месторождений нефти и газа на глубинах в несколько километров [76] и инженерную (частоты до нескольких килогерц в секунду) для характеристики отложений в верхних слоях на несколько сотен метров ниже уровня морского дна [77]. Существуют примеры успешного применения технологии с двумя датчиками для изучения верхних подповерхностных отложений [78]. Этот метод является наиболее распространенным и эффективным [79], но дорогостоящим и требующим большого количества времени.

В [80] предложен новый геоэлектрохимический метод разведки морских месторождений нефти и газа во время движения судна без взятия донных проб. Принцип действия состоит в следующем: подвесная часть морской разведывательной системы буксируется за судном, проникая в среднюю часть водной толщи, фиксируя ионную активность преимущественно тяжелых металлов. Он может использоваться также для определения метана [80]. В тоже время можно измерить напряженность естественного электрического поля слоя воды. Данный метод был апробирован на нефтегазоносной территории Карского моря, что позволяет сделать вывод о возможности работы аппаратуры в условиях Крайнего Севера.

Акустические исследования заключаются в распознавании зон газовых факелов посредством излучения сложного сигнала с частотной или фазовой модуляцией и дальнейшем его приеме от водной толщи в удаленной точке приемником колебательной скорости. По данным акустической съемки, представляется возможным оценить количество и объем газовых пузырьков на разных глубинах, а также рассчитать их направление движения, что позволяет понять траекторию от дна к поверхности и оценить скорость всплытия [81].

Акустические методы можно разделить на три группы в зависимости от диапазона частот: 5—200 Гц; 200 Гц — несколько кГц; несколько кГц — больше 100 кГц [82].

Акустический метод обладает высокой точностью при обнаружении газа в морской воде, т.к. газ обладает отличительными акустическими свойствами по сравнению с окружающей водой и осадочными породами. Основная проблема

для реализации исследований по акустическому зондированию заключается в необходимости проводить длительные по времени измерения с высоким пространственным и временным разрешением [83].

Несмотря на эффективность судовых исследований, с целью снижения стоимости и времени поисковых работ их целесообразно проводить, основываясь на уже имеющихся данных о потенциальной нефтегазоносности территории, которые могут быть получены с помощью методов, реализованных на спутниках, воздушных носителях или транспортных подводных аппаратах (ТПА).

Прежде чем перейти к обзору данных методов, следует обратить особое внимание на физическую основу спутниковых систем мониторинга, так как наибольшими трудностями при измерениях является влияние атмосферы [84—86]. Различные сенсоры, установленные на спутниковых системах, позволяют детектировать видимую, ИК и СВЧ области электромагнитного спектра, которые могут использоваться для мониторинга поверхности воды [86]. Краткая информация об основных спутниках, используемых для задач морского мониторинга, приведена в табл. 2.

Таблица 2

Краткие сведения о распространенных спутниковых системах
Brief information about common satellite systems

№	Спутниковая система	Страна	Тип данных	Год запуска	Источник с актуальными исследованиями
1	LANDSAT	США	оптические	несколько запусков с 1972	[87]
2	Aqua	США	оптические	2002	[88]
3	Ресурс	РФ	оптические	2006	[89]
4	Radarsat-2	Канада	радарные	2007	[90]
5	TerraSar-X/ TanDEM-X	Германия	радарные	2007	[91]
6	Канопус-В	РФ	оптические	2012	[92]

К методам анализа с помощью спутников, воздушных носителей и ТПА относятся: оптическая, аэрокосмическая и тепловизионная съемка.

Аэрокосмическое изучение месторождений основано на исследовании характеристик земной поверхности, прогнозируемых ландшафтных аномалий и геоморфологических особенностей территории. Их дальнейший анализ включает в себя структурное дешифрирование космических снимков, в результате чего выделяются региональные разломы, зоны неотектонических поднятий, строение фундамента и т.д. [93]. По результатам аэрокосмической съемки строят геологические, тектонические, инженерно-геологические карты, а на выявленных локальных ландшафтных аномалиях рекомендуется проведение сейсморазведочных работ [94].

К явным плюсам аэрокосмического метода можно отнести следующие: большое пространственное разрешение, возможность работы в любых труднодоступных районах, возможность многократно наблюдать исследуемые районы и

работать при частичном или полном отсутствии топографической основы, а также относительную дешевизну информации [94].

Метод тепловизионной съемки основан на обработке снимков теплового излучения поверхности Земли, а также морской поверхности и толщи океана. Таким образом получают и обрабатывают спектрзональные снимки в диапазонах видимого спектра и в инфракрасном диапазоне длин волн 8—14 мкм [95].

В процессе дешифрирования снимков теплового поля выявляются разрезы геотермических аномалий, термодинамические неоднородности, зоны сжатия, разуплотнения пород. Современные приборы помимо качественного анализа дают возможность провести и количественный анализ [96]. Все эти данные позволяют построить объемную модель формирования глубинных структур и блоково-разломных структур, составить карты горизонтальных и вертикальных разрезов [95—96]. С помощью построенных моделей и интерпретации других геодинамических данных определяют механизмы тепловых потоков [97—98], в частности, возможность накопления глубинных флюидов, включая углеводороды.

Ученым Р.Д. Мухамедяровым был разработан усовершенствованный метод МВТГМ (метод видеотепловизионной генерализации Мухамедярова), основанный на тепловизионном анализе данных космо- и аэросъемок в ИК тепловом диапазоне [99]. Суть метода основана на таком явлении, как «память» теплового излучения о своем происхождении, ибо глубинная структура Земли полупрозрачна в оптическом диапазоне длин волн [100].

Другими, хорошо зарекомендовавшими себя как для обнаружения макросипов [101], так и микросипов [102—103] методами, являются *оптические* методы. Основу лазерных спектрально-оптических комплексов для подводных исследований составляет спектрометр, который в зависимости от вида применяемого источника излучения может работать по одной из измерительных схем: абсорбционной, флуоресцентной или рамановской.

Метод абсорбционной спектроскопии основан на излучении лазерного луча и его отражении обратно в детектор. Вдоль пути лазерного луча присутствие целевого газа изменяет спектр лазера за счет поглощения света в определенном диапазоне длин волн, который обнаруживается прибором по возвращении лазерного луча.

В настоящее время существуют методики, которые позволяют выделить целевой газ из жидкой фазы при помощи специальных мембран или распыляющих систем, которые также основаны на методе абсорбции [104]. Однако в связи с тем, что метод абсорбционной спектроскопии требует выделения газовой фазы из жидкостной, такая методика перестает быть дистанционной. К реализованным в настоящее время приборам можно отнести компактные датчики метана METS и HydroC/CH₄ [105], которые помещаются в подводные аппараты геологоразведки, и могут снимать данные до нескольких километров в глубину.

К недостаткам представленных систем относится резкое снижение скорости диффузии газов при низких температурах морской воды, что ведет к существенному увеличению времени измерений и делает невозможным проведение глубинного профилирования, то есть составления карты вертикального распределения

газов [105], поэтому его использование в северных районах не является целесообразным.

Спектроскопия флуоресценции основана на принципе регистрации обратного упругого рассеяния при использовании гидролидарных систем. Основной составляющей спектра является широкая полоса флуоресценции растворенного органического вещества [106—108]. Данный метод неоднократно использовался при обнаружении углеводородных газов в воде, а также нефтяных пленок в режиме реального времени [109, 110]. Однако основным его недостатком является то, что флуоресцентные аппараты не предоставляют информацию о степени диспергирования нефти и количественном анализе газов [111, 112].

В работе [113] авторами предложен аппаратный комплекс, основанный на методе *лазерной искровой спектроскопии (LIBS)*, принцип которого заключается в генерации лазерной плазмы как источника возбуждения атомных и молекулярных эмиссионных спектров [113, 114].

Несмотря на то, что данный метод активно используется для газовых сред, сложности, связанные с высокой теплопроводностью воды [115, 116], делают его менее привлекательным для исследователей морской среды. Это связано с тем, что плазма, генерируемая в воде, подвергается сильному эффекту гашения и удержания, что значительно ухудшает качество сигнала [115]. Имеющиеся разработки могут быть использованы только на подводных аппаратах носителей рабочего класса. Основываясь на работах [113, 117—119], можно сделать вывод, что у данного метода есть ряд преимуществ, главным из которых является тот факт, что при определенных обстоятельствах он позволяет дистанционно обнаружить любое вещество и исследовать различные аспекты глубоководной среды [114, 118].

Не так давно для задач морского мониторинга начал широко применяться *метод комбинационного рассеяния* [120, 121], в частности для распознавания газовых включений в морской воде [122—125]. Данный метод хорошо зарекомендовал себя при обнаружении газовых гидратов [126—128], углеводородных газов в морской воде [129] и даже их изотопов в воздухе [130—134], поэтому был апробирован в ряде исследований. Эффект комбинационного рассеяния света характеризуется сдвигом длины волны излучения, рассеянного молекулярными связями [135]. Метод детектирования позволяет измерять несколько компонентов одновременно и не требует никаких реагентов или расходных материалов, что делает его наиболее оптимальным при измерениях *in situ*.

В последние годы всё большую популярность в мониторинге состояния морской среды набирают оптоволоконные датчики [136—137], основанные на разных оптических явлениях (табл. 3). На сегодняшний день с их помощью можно измерять физические свойства водной толщи (глубина, температура [138], давление [127] и др.), а также некоторые химические показатели (рН и соленость воды) [139]. В целях обнаружения утечек жидких углеводородов исследователями предложены определенные виды датчиков [140—143], однако данное направление требует дальнейшего развития.

Сравнение характеристик методов дистанционного обнаружения залежей углеводородов представлено в табл. 4 и табл. 5.

Таблица 3

Виды оптоволоконных датчиков
Types of fiber optic sensors

Оптоволоконные датчики (сенсоры)		
Точечный датчик	Квазираспределенный датчик	Распределенный датчик
интерферометрический датчик FBG датчик	WDM-FBG датчик	комбинационное рассеяние света рэлееское рассеяние света бриллиэновское рассеяние света

Таблица 4

Сравнение характеристик дистанционных методов обнаружения
морских залежей углеводородов

Remote methods characteristics for offshore hydrocarbon deposits detecting comparison

№	Метод	Погрешность измерений	Установка измерительного комплекса	Источник
1	Гравиметрический	1—1,5 мГал	Судно, воздушные средства мониторинга	[64, 67, 69]
2	Магнитометрический	10^{-3} — 10^{-4} А/м	Судно	[64, 72]
3	Сейсмический	± 15 %	Судно	[144]
4	Геоэлектрохимический	0,02 мВ	Судно	[80]
5	Акустический	0,33±0,07 ммоль×м ⁻² ×с ⁻¹	Судно	[81]
6	Аэрокосмическая съемка	0,9 Вт/(см ² мкм)	Воздушные средства мониторинга, спутник	[93—94]
7	Тепловизионная съемка	2,5—2,72	Воздушные средства мониторинга, спутник	[99—100, 145]
8	Метод абсорбционной спектроскопии	-	ТПА	[110, 146]
9	Метод флуоресценции	±17,27 ppb	Воздушные средства мониторинга, спутник	[119]
10	Метод лазерной искровой спектроскопии	± 5 %	ТПА	[113, 147]
11	Метод комбинационного рассеяния	± 5%	Воздушные средства мониторинга, спутник, ТПА Оптические датчики	[119, 130]

Таблица 5

Преимущества и недостатки дистанционных методов обнаружения углеводородов

The remote hydrocarbon detection methods advantages and disadvantages

Метод	Преимущества	Недостатки
Гравиметрический	Простота измерений Дешевизна получения экспериментальных данных	Обнаружение только косвенных признаков месторождений Возможность влияния других объектов на полученные данные

Метод	Преимущества	Недостатки
Магнитометрический	Простота измерений Дешевизна получения экспериментальных данных Возможность прогнозирования экологических опасностей	Обнаружение только косвенных признаков месторождений Возможность влияния других объектов на полученные данные
Сейсмический	Позволяет построить детальную картину морского дна Высокая эффективность	Сложность интерпретации полученных данных Длительность измерений Дороговизна получения экспериментальных данных
Геоэлектрoхимический	Возможность дополнительных измерений тяжелых металлов	Возможность измерений только одного индикаторного вещества — метана
Акустический	Высокое пространственное разрешение Высокая точность Позволяет оценить количество и объем газовых пузырьков на разных глубинах	Сложность интерпретации полученных данных Длительность измерений Дороговизна получения экспериментальных данных
Аэрокосмическая съемка	Высокое пространственное разрешение Возможность работы в любых труднодоступных районах Выявление локальных аномалий Возможность реализации различного вида картирования Возможность многократного наблюдения исследуемых районов	Обнаружение только косвенных признаков месторождений Недостаточно эффективный как самостоятельный метод Влияние атмосферы
Тепловизионная съемка	Высокое пространственное разрешение Возможность работы в любых труднодоступных районах Выявление локальных аномалий Возможность многократного наблюдения исследуемых районов	Сложность интерпретации полученных данных Влияние атмосферы Обнаружение только косвенных признаков месторождений Недостаточно эффективный как самостоятельный метод
Метод абсорбционной спектроскопии	Высокое пространственное разрешение Возможность детектирования всех индикаторных веществ	Невозможность проведения глубинного профилирования Сложный пробоотбор и пробоподготовка в морской среде Длительность измерений
Метод флуоресценции	Высокое пространственное разрешение Возможность работы в любых труднодоступных районах Возможность детектирования всех индикаторных веществ	Невозможность проведения глубинного профилирования Влияние атмосферы
Метод лазерной искровой спектроскопии	Возможность детектирования всех индикаторных веществ	Сложный пробоотбор и пробоподготовка в морской среде

Метод	Преимущества	Недостатки
Метод комбинационно-го рассеяния	Высокое пространственное разрешение Возможность работы в любых труднодоступных районах Возможность детектирования всех индикаторных веществ Высокая селективность компонентов	Дороговизна получения экспериментальных данных Влияние атмосферы

Заключение

В представленной работе были проанализированы и описаны методы дистанционного детектирования морских залежей углеводородов, их видов, а также возможности их обнаружения. Было показано, что индикаторами залежей углеводородов являются следующие факторы:

- 1) наличие газовых пузырьков на водной поверхности и водной толще;
- 2) развитие жизнедеятельности фитопланктона;
- 3) изменение температуры воды;
- 4) наличие грязевых вулканов и покмарков.

Приведены и подробно описаны существующие методы дистанционного изучения морской геологоразведки.

Следует отметить, что выбор подходящего метода идентификации индикаторов морских залежей углеводородов является важным этапом на пути к их качественному и количественному анализу. Кроме того, разумное сочетание нескольких методов для определения комплекса индикаторов также может помочь в получении полной картины для последующего геологического моделирования месторождений.

Список литературы

1. Zhai M., Hu. R., Wang Y. et al. Mineral resource science in China: Review and perspective // *Geography and Sustainability*. 2021. V. 2. P. 107—114. doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.002.
2. Пономарев А. С., Поздняков А. С. Современные тренды развития мирового сектора морской добычи углеводородов // *Территория «НЕФТЕГАЗ»*. 2018. № 11. С. 40—50.
3. Makarov A. A., Grigoriev L. M., Mitrova T. A. World and Russian Energy Outlook up to 2040, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 2013, 110 p.
4. Васильцова В. М. Проблемы освоения шельфовых месторождений нефти и газа // *Записки Горного института*. 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemu-osvoeniya-shelfovyh-mestorozhdeniy-nefti-i-gaza> (дата обращения: 04.04.2023).
5. Wolfe K. J., Parker G. J., Sellars S. L. Hebron Offshore Development Project Overview // *Offshore Technology Conference*. 2018. P.1—12. doi:10.4043/28695-ms.
6. Kaiser M. J. A Review of Exploration, Development, and Production Cost Offshore Newfoundland // *Natural Resources Research*. 2021. V. 30(2). P. 1253—1290 doi.org/10.1007/s11053-020-09784-3.
7. Jahn F., Cook M., Graham M. Hydrocarbon Exploration and Production. Elsevier Science: Amsterdam, The Netherlands, 2008. 456 p.
8. Picard K., Radke L. C., Williams D. K. et al. Origin of high density seabed pockmark fields and their use in inferring bottom currents // *Geosciences*. 2018. No. 8 (6): 195. doi.org/10.3390/geosciences8060195.

9. Земцова М. Н., Бормашева К. М., Моисеев И. К. Углеводороды: учебное пособие. Самара: Самарский государственный технический университет, 2016. 147 с.
10. Rovere M., Mercorella A., Frapiccini E. et al. Geochemical and Geophysical Monitoring of Hydrocarbon Seepage in the Adriatic Sea // *Sensors*. 2020. No. 20(5). 1504. doi.org/10.3390/s20051504.
11. Kvenvolden K. A. Methane hydrate—A major reservoir of carbon in the shallow geosphere? // *Chemical Geology*. 1988. V. 71. P. 41—51. doi.org/10.1016/0009-2541(88)90104-0.
12. Ле Д. Л., Обжиров А.И., Нгуен Х. и др. Распределение газов в донных отложениях юго-западного суббассейна Южно-Китайского моря // *Тихоокеанская геология*. 2021. Том 40. № 2. С. 67—77. DOI: 10.30911/0207-4028-2021-40-2-67-77.
13. Shakirov R. B., Lan N. H., Yatsuk A. et al. Methane flux into the atmosphere in the Bien Dong (East Sea of Vietnam) // *Journal of Marine Science and Technology*. 2018. V. 18. No. 3. P. 250—255. DOI: 10.15625/1859-3097/18/3/12696.
14. Shakirov R. B., Yatsuk A. V., Mishukova G. I. et al. Methane flux into the atmosphere in the South China Sea // *Doklady Earth Sciences*. 2019. P. 1. V. 486. P. 533—536. doi.org/10.1134/S1028334X19050064.
15. Старобинец И. С. Газеохимические показатели нефтегазоносности и прогноз состава углеводородных скоплений. Москва. Недра. 1986. 200 с.
16. Mishukova G. I., Shakirov R. B. Spatial variations of methane distribution in marine environment and its fluxes at the water-atmosphere interface in the western Sea of Okhotsk // *Water Resources*. 2017. V. 44, N 4. P. 662—672. doi.org/10.1134/S0097807817040133.
17. Новигатский А. Н., Беликов И. Б., Белоусов В. А. и др. Результаты судовых измерений метана над Северной Атлантикой и прилегающей Арктикой летом 2020 г. // *Морские исследования и образование (MARESEDU-2021)*. Труды X Международной научно-практической конференции. 2021. Том III (III). С. 72—75.
18. Dafner E., Obzhairov A., Vereshzhagina O. Distribution of methane in waters of the Okhotsk and western Bering Seas and the area of the Kuril Islands // *Hydrobiologia*. 1997. V. 362. P. 93—101. doi.org/10.1023/A:1003114031011.
19. Weniger P., Blumenberg M., Berglar K. et al. Origin of near-surface hydrocarbon gases bound in northern Barents Sea sediments // *Marine and Petroleum Geology*. 2019. V. 102. P.455—476. doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.12.036.
20. Jaśniewicz D., Klusek Z., Brodecka-Goluch A. et al. Acoustic investigations of shallow gas in the southern Baltic Sea (Polish Exclusive Economic Zone): a review // *Geo-Marine Letters*. 2019. V. 39. P. 1—17. doi.org/10.1007/s00367-018-0555-5.
21. Mazzini A., Ivanov M.K., Parnell J. et al. Methane related authigenic carbonates from the Black Sea geochemical characterization and relation to seeping fluids // *Marine Geology*. 2004. V. 212. P. 153—181. doi.org/10.1016/j.margeo.2004.08.001.
22. Judd A., Hovland M. Seabed fluid flow. The impact on geology, biology and the marine environment. Cambridge: Cambr. Univ. Press, 2007. 475 p.
23. Hovland M., Judd A. G., King L. H. Characteristic features of pockmarks on the North Sea Floor and Scotian Shelf // *Sedimentology*. 1984. No. 31. P. 471—480. doi.org/10.1111/j.1365-3091.1984.tb01813.x.
24. Mazzini A., Etiope G. Mud volcanism: An updated review // *Earth-Science Reviews*. 2017. V. 168. P. 81—112. doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.03.001.
25. Kennicut M. C., Brooks J. M., Bidigare R. J. R. et al. Vent type taxa in a hydrocarbon seep region on the Luisiana slope // *Nature*. 1985. V. 317. P. 351—353. doi:10.1038/317351a0.
26. Мишукова Г. И., Яцук А. В., Шакиров Р. Б. Распределение потоков метана на границе вода–атмосфера в различных районах Мирового океана // *Геосистемы переходных зон*. 2021. Т. 5. № 3. с. 240—254. doi.org/10.30730/gtr.2021.5.3.240-247.247-254.
27. Lammers S., Suess E., Mansurov M. N. et al. Variations of atmospheric methane supply from the Sea of Okhotsk induced by the seasonal ice cover // *Global Biogeochemical Cycles*. 1995. V. 9 (3). P. 351—358. doi.org/10.1029/95GB01144.
28. Mishukova G. I., Shakirov R. B., Obzhairov A. I. Methane fluxes on the water–atmosphere boundary in the Sea of Okhotsk // *Doklady Earth Sciences*. 2017. V. 475(2). P. 963—967. doi.org/10.1134/S1028334X17080256.

29. Мишукова Г. И., Мишуков В. Ф., Обжиров А. И. Распределение метана и его потоки на границе вода–атмосфера в некоторых районах Охотского моря // Вестник ДВО РАН. 2010. № 6. С. 36—43.
30. Адушкин В. В., Кудрявцев В. П. Об эмиссии метана в Арктическом регионе // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Вып. 4(23). С. 1—9. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art64.
31. Антонов К. Л., Поддубный В. А., Маркелов Ю. И. и др. Некоторые итоги мониторинга парниковых газов в Арктическом регионе России // Арктика: экология и экономика. 2018. № 1 (29). С. 56—67. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-56-67.
32. Шакиров Р. Б., Мишукова Г. И. Пространственное распределение потоков метана на границе вода–атмосфера в Охотском море // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3. № 1. С. 107—123. doi: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.107-123.
33. Obzhirov A. I., Pestrikova N. L., Mishukova G. I. et al. Distribution of methane content and methane fluxes in the Sea of Japan, Sea of Okhotsk, and near-Kuril Pacific // Russian Meteorology and Hydrology. 2016. V. 41(3). P. 205—212. doi.org/10.3103/S1068373916030067.
34. Abrams M. A. Distribution of subsurface hydrocarbon seepage in near-surface marine sediments // American Association Petroleum Geology Memoir. 1996. P. 1.—14. doi:10.1306/d9cb6943-1715-11d7-8645000102c1865d.
35. Abrams M. A. Interpretation of surface methane carbon isotopes for detection of subsurface hydrocarbons. American Association Petroleum Geology Bulletin, 1987. Vol. 71/5. 524 p.
36. Macdonald I., Boland G., Baker J. et al Gulf of Mexico hydrocarbon seep communities // Marine Biology. 1989. V. 101. P. 235—247. DOI: 10.1007/BF00391463.
37. Roberts H. H., Carney R. S. Evidence of episodic fluid, gas, and sedimentary venting on the northern Gulf of Mexico continental slope // Economic Geology. 1997. Vol. 92 (7—8). P. 863—879. doi.org/10.2113/gsecongeol.92.7-8.863.
38. Abrams M. A., Narimanov A. A. Geochemical evaluation of hydrocarbons and their potential sources in the western South Caspian depression, Republic of Azerbaijan // Marine and Petroleum Geology. 1997. Vol. 14(4). P. 451—468. doi:10.1016/s0264-8172(97)00011-1.
39. Solomon E. A., Kastner M., MacDonald I. R., Leifer I. Considerable methane fluxes to the atmosphere from hydrocarbon seeps in the Gulf of Mexico // Nature Geoscience. 2009. Vol. 2(8). P. 561—565. doi:10.1038/ngeo574.
40. Abrams M. A. Geophysical and geochemical evidence for subsurface hydrocarbon leakage in the Bering Sea, Alaska // Marine and Petroleum Geology Bulletin. 1992. Vol. 9. P. 208—221. doi.org/10.1016/0264-8172(92)90092-S.
41. Schumacher D., Abrams M. A. Hydrocarbon migration and its near surface migration, AAPG Memoir 66, 1996, p. 441. DOI:10.1306/M66606.
42. Horvitz L. Geochemical Exploration for Petroleum // Science. 1985. Vol. 229. P. 821—827 DOI: 10.1126/science.229.4716.821.
43. Levinson A. A. Introduction to exploration geochemistry. Applied Pub. 1980, 924 p.
44. Price L. C. Aqueous Solubility of Petroleum as Applied to Its Origin and Primary Migration // AAPG Bulletin. 1976. Vol. 60 (2). P. 213—244. doi: https://doi.org/10.1306/83D922A8-16C7-11D7-8645000102C1865D.
45. Fischer P. J., Stevenson A. J. Natural hydrocarbon seeps along the northern shelf of the Santa Barbara Basin // California: Offshore Technology Conference, 1973. P. 159—166. doi.org/10.4043/1738-MS.
46. Reitsema R. H., Linberg F. A., Kaltenback A. J. Light hydrocarbons in Gulf of Mexico water: sources and relation to structural highs // Journal of Geochemical Exploration. 1978. V. 10. P. 139—151. doi.org/10.1016/0375-6742(78)90014-6.
47. Clayton C., Hay S. Gas migration mechanisms from accumulation to surface // Geology. 1994. No. 6. P. 12—23. doi.org/10.37570/bgsd-1995-41-03.
48. Whelan T., Coleman J. M., Shuayada J. N. The geochemistry of recent Mississippi river delta: gas concentrations and sediment stability // Proceedings of the 7th Offshore Technology Conference. 1975. V. 3. P. 71—84. doi.org/10.4043/2342-MS.
49. Zhizhchenko B. P. Generation of hydrocarbon gases in recent marine sediments // International Geology Review. 1978. V. 21. No. 4. P. 163—170. doi.org/10.1080/00206818209467081.

50. Boetius A., Wenzhöfer F. Seafloor oxygen consumption fuelled by methane from cold seeps // *Nature Geoscience*. 2013. Vol. 6(9). P. 725—734. doi:10.1038/ngeo1926.
51. Silyakova A., Jansson P., Serov P. et al. Physical controls of dynamics of methane venting from a shallow seep area west of Svalbard // *Continental Shelf Research*. 2019 Vol. 194. P. 104030. doi:10.1016/j.csr.2019.104030.
52. Kvenvolden K. A., Field M. F. Thermogenic hydrocarbons in unconsolidated sediment of Eel River Basin, offshore northern California // *AAPG Bulletin*. 1981. V. 65 (9). P. 1642—1646. doi.org/10.1306/03B5963E-16D1-11D7-8645000102C1865D.
53. Anderson R. K., Scalan R. S., Parker P. L. et al. Seep oil and gas in Gulf of Mexico slope sediments // *Science*. 1983. V. 222(4624). P. 619—621. doi: 10.1126/science.222.4624.619.
54. Sechman H., Kotarba M. J., Kędzior S. et al. Distribution of methane and carbon dioxide concentrations in the near-surface zone, genetic implications, and evaluation of gas flux around abandoned shafts in the Jastrzębie-Pszczyna area (southern part of the Upper Silesian Coal Basin, Poland) // *International Journal of Coal Geology*. 2019. V. 204. P. 51—69. doi:10.1016/j.coal.2019.02.001.
55. Sechman H., Kotarba M. J., Fiszler J. et al. Distribution of methane and carbon dioxide concentrations in the near-surface zone and their genetic characterization at the abandoned “Nowa Ruda” coal mine (lower Silesian Coal Basin, SW Poland) // *International Journal of Coal Geology*. 2013. V. 116 (117). P. 1—16. doi.org/10.1016/j.coal.2013.05.005.
56. Sechman H., Kotarba M. J., Dzieniewicz M. et al. Evidence of methane and carbon dioxide migration to the near surface zone in the area of the abandoned coal mines in Wałbrzych District (lower Silesian Coal Basin, SW Poland) based on periodical changes of molecular and isotopic compositions // *International Journal of Coal Geology*. 2017. V. 183. P. 138—160. doi.org/10.1016/j.coal.2017.10.011.
57. Бондур В. Г., Мохов И. И., Макоско А. А. Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты. М.: Российская академия наук, 2022. 388 с.
58. Люшвин П. В. Метанотрофное таяние льда // *Электронное науч. изд. Альманах пространство и время*. 2013. Т. 2. № 2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metanotrofnoe-tayanie-lda> (дата обращения: 28.03.2023).
59. Baschek B., Farmer D. M. Gas Bubbles as Oceanographic Tracers // *Journal of Atmosphere and Oceanic Technology*. 2010. Vol. 27, No. 1. P. 241—245. doi.org/10.1175/2009JTECHNO688.1.
60. Богоявленский В. И. Перспективы и проблемы освоения месторождений нефти и газа шельфа Арктики // *Бурение и нефть*. 2012. С. 4—10.
61. ESDP European Scientific Diving Panel. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ssd.imbe.fr/SD-European-Standards?lang=fr> (дата обращения: 09.01.2022).
62. Birin I., Maglić L. Analysis of seismic methods used for subsea hydrocarbon exploration // *Pomorski zbornik*. 2020. V. 58. P. 77—89. DOI:10.18048/2020.58.05.
63. Cui W. An overview of submersible research and development in China // *Journal of Marine Science and Application*. 2018. V. 17. P. 459—470 doi.org/10.1007/s11804-018-00062-6.
64. Обжиров А. И., Телегин Ю. А., Шакиров Р. Б. Необходимость использования подводной робототехники в инженерно-геологических изысканиях в районе газовых проявлений. // *Технические проблемы освоения Мирового океана: материалы Восьмой всероссийской научно-технической конференции, 30 сентября — 3 октября 2019 г. Владивосток*. 2019. С. 23—31.
65. Verdun J., Klingele E., Bayer R. B. The Alpine Swiss-French Airborne Gravity Survey // *Geophysical Journal International*. 2003. V. 152. P. 8—19. doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01748.x.
66. Wenyong L., Jianxin Z., Shengqing X. et al. Effect and Prospect of Basic Geological Survey Based on Airborne Gravimetry in China // *Acta Geologica Sinica — English Edition*. 2012. V. 86(1). P. 38—47. doi:10.1111/j.1755-6724.2012.00609.x.
67. Михайлов П. С., Железняк Л. К., Конешов В. Н. и др. Современные технологии программно-математического и методического сопровождения морских гравиметрических съемок // *Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: Материалы 47-й сессии Международного научного семинара Д. Г. Успенского — В. Н. Страхова. Воронеж, 27 января — 30 января 2020 г.* 2020. С. 205—208.
68. Конешов В. Н., Костицын В. И. Аппаратура и технологии гравиразведки и магниторазведки: авиационные и морские гравиметры: учебное пособие. Пермь: ПГНИУ, 2021. 108 с.

69. Конешов В. Н., Железняк Л. К., Михайлов П. С. и др. Развитие технологий морских гравиметрических исследований в Арктике // Труды IX международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)» 2020. Том III (III). С. 518—521.
70. Kearey P., Brooks M., Hill I. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science Ltd, 3rd edh, 2016. 155 p.
71. Нерсесов Б. А. Методы вероятностной оценки эффективности средств морской магнитометрии // Океанологические исследования. 2019. Том 47. No 4. С. 152—160 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(4).10.
72. Gorodnitskiy A. M., Brusilovskiy Y. V., Ivanenko et al. New methods for processing and interpreting marine magnetic anomalies: Application to structure, oil and gas exploration, Kuril forearc, Barents and Caspian seas // *Geoscience Frontiers*. 2013. V. 4(1). P. 73—85. doi:10.1016/j.gsf.2012.06.002.
73. Mostafaei K., Kianpour M. Application of Magnetometry in Manto-type Copper Deposit Exploration, Case study: Meyami, Iran // *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2022. V. 37(5). P. 1—14. DOI: 10.17794/rgn.2022.5.1.
74. De Castro D. L. Gravity and magnetic joint modeling of Potiguar Rift Basin (NE Brazil): Basement control during Neocomian extension and deformation // *Journal of South American Earth Sciences*. 2011. V. 31. P. 186—198. doi.org/10.1016/j.jsames.2011.01.005.
75. Vitte L. V., Vasilevskiy A. N. Geologic nature of regional magnetic and gravity anomalies in Mongol-Transbaikalian province of the central Asian Fold Belt // *Russian Geology and Geophysics*. 2013. V. 54. P. 1442—1449. doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.011.
76. Ампилов Ю. П. Сейсморазведка на российском шельфе в условиях санкций и низких цен на нефть // Технологии сейсморазведки. 2015. № 4. С. 5—14. DOI: 10.18303/1813-4254-2015-4-5-14.
77. Isaenkov R., Ponimaskin A. I., Tokarev M. J. Processing workflow for the dynamic interpretation of very high-resolution P-wave seismic data // *EAGE Near Surface Geoscience 2016 — Second Applied Shallow Marine Geophysics Conference*. 2016. V. 2016. P. 1—5. doi.org/10.3997/2214-4609.201602154.
78. Ampilov Y. P., Vladov M. L., Tokarev M. Y. Broadband Marine Seismic Acquisition Technologies: Challenges and Opportunities // *Seismic Instruments*. 2019. V. 55(4). P. 388—403. doi: 10.3103/s0747923919040030.
79. Min L. O. U., Hua C. A. I., Xianke H. E. et al. Application of seismic sedimentology in characterization of fluvial-deltaic reservoirs in Xihu sag, East China Sea shelf basin // *Petroleum Exploration and Development*. 2023. V. 50(1). P. 138—151 doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60375-6.
80. Putikov O., Kholmymanski M., Ivanov G. et al. Application of geoelectrochemical method for exploration of petroleum fields on the Arctic shelf // *Geochemistry*. 2020. V. 80 (3). P. 125498. doi:10.1016/j.geoch.2019.02.001.
81. Черных Д. В., Юсупов В. И., Саломатин А. С. и др. Новый акустический метод количественной оценки пузырькового потока метана в системе донные отложения — водная толща и его реализация на примере моря Лаптевых, Северный Ледовитый океан // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329. № 11. 153—167. doi.org/10.18799/24131830/2018/11/218.
82. Ampilov Y. P., Terekhina Y. E., Tokarev M. Y. Applied Aspects of Different Frequency Bands of Seismic and Water Acoustic Investigations on the Shelf // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. V. 55(7). P. 705—720. doi:10.1134/s0001433819070028.
83. Буланов В. А., Корсков И. В., Стороженко А. В. и др. Исследования акустических характеристик верхнего слоя моря методом многочастотного акустического зондирования // *Средства и методы подводных исследований 2020*. No. 1 (31). С. 42—55. DOI: 10.37102/24094609.2020.31.1.006.
84. Жаворонкин О. В., Трегуб А. И. Дистанционное зондирование Земли при геологических исследованиях. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2012. 46 с.
85. Денисов Ю. В., Райкунов Г. Г., Трофимов Д. М. Дистанционные методы поисков месторождений нефти и газа на морских акваториях. Монография. Вологда: Инфра-Инженерия, 2017. 68 с.
86. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 334 с.
87. Landsat Science [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/> (дата обращения: 28.05.2023).

88. Aqua Earth-observing satellite mission [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://aqua.nasa.gov/> (дата обращения: 28.05.2023).
89. Российские космические системы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://russianspacesystems.ru/bussines/dzz/resurs-p/> (дата обращения: 28.05.2023).
90. The official website of the Government of Canada [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat2/> (дата обращения: 28.05.2023).
91. The European Space Agency [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/terrasar-x-and-tandem-x> (дата обращения: 29.05.2023).
92. Российские космические системы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://russianspacesystems.ru/bussines/dzz/kanopus-v/> (дата обращения: 29.05.2023).
93. Бондур В. Г., Кузнецова Т. В. Исследования естественных нефте- и газопроявлений на морской поверхности по космическим изображениям // *Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса*. 2012. С. 272—287.
94. Бондур В. Г. *Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса*. М: Научный мир, 2012. 558 с.
95. Каримов К. М., Онегов В. Л., Кокутин С. Н. и др. Дистанционное тепловизионное зондирование Земли при решении геологических задач // *Георесурсы*. 2009. № 1(29). С. 38—42.
96. Зенченко С. С. Методы и результаты эффективного применения современных тепловизионных средств измерения гидрофизических процессов // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2021. № 2(396). С. 134—138. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-2-396-134-138.
97. Малинин В. Н., Гордеева С. М., Глок Н. И. К оценке теплосодержания Мирового океана по спутниковым данным о температуре поверхностного слоя воды // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10. № 3. С. 201—207.
98. Малинин В. Н., Глок Н. И. Использование спутниковых данных о температуре поверхностного слоя воды для оценки стерических колебаний уровня Мирового океана // *Исследование Земли из космоса*. 2014, № 3. С. 27—32.
99. Мухамедяров Р. Д., Дабаев А. И. Инновационная технология «МВТГМ» для поиска нефтегазовых месторождений и решения геотехногенных задач // *Труды общества нефтяников-геологов Казахстана*. 2014. Вып. 4. С. 293—295.
100. Мухамедяров Р. Д., Туманов В. Р. Геолого-геофизические значение метода видеотепловизионной генерализации // *Инновации и технологии в разведке, добыче и переработке нефти и газа*. 2010. С. 307—312.
101. Ellis J. M., Davis H. H., Zamudio J. A. Exploring for onshore oil seeps with hyperspectral imaging // *Oil & Gas Journal*. 2001. V. 99. P. 49—58.
102. Van Der Meer F., Van Dijk P., Van Der Werff H. et al. Remote sensing and petroleum seepage: a review and case study // *Terra Nova*. 2002. V. 14. P. 1—17. doi.org/10.1046/j.1365-3121.2002.00390.x.
103. Almeida-Filho R. Remote detection of hydrocarbon microseepage induced soil alteration // *International Journal of Remote Sensing*. 2002. V. 23. P. 3523—3524. DOI: 10.1080/01431160210137712.
104. Boulart C., Connelly D. P., Mowlem M. C. Sensors and technologies for in situ dissolved methane measurements and their evaluation using Technology Readiness Levels // *Trends in Analytical Chemistry*. 2010. V. 29, No. 2. P. 186—195. doi.org/10.1016/j.trac.2009.12.001.
105. Салюк П. А., Буланов В. А., Корсков И. В. и др. Возможность дистанционного обнаружения повышенных концентраций метана в морской воде с использованием методов оптической спектроскопии на подводных телеуправляемых аппаратах // *Подводные исследования и робототехника*. 2011. № 2(12). С. 43—51.
106. Barbini R., Colao F., Fantoni R. et al. Differential lidar fluorensensor system used for phytoplankton bloom and sea water quality monitoring in Antarctica // *International Journal of Remote Sensing*. 2001. V. 22. No. 2/3. P. 369—384. DOI: 10.1080/014311601449989.
107. Bukin O. A., Mayor A. Yu., Pavlov V. A. et al. Measurement of the lightscattering layers structure and detection of the dynamic processes in the upper ocean layer by shipborne lidar // *International Journal of Remote Sensing*. 1998. V. 19. No. 4. P. 707—717. DOI: 10.1080/014311698215946.
108. Майор А. Ю., Букин О. А., Крикун В. А. и др. Компактный судовой проточный флуориметр // *Оптика атмосферы и океана*. 2007. Т. 20. № 3. С. 283—285.

109. Carstea E. M., Baker A., Bierzoza M. et al. Continuous fluorescence excitation–emission matrix monitoring of river organic matter // *Water Research*. 2010. V. 44(18). P. 5356–5366. doi:10.1016/j.watres.2010.06.036.
110. White H., Commy R., MacDonald I. et al. Methods of Oil Detection in Response to the Deepwater Horizon Oil Spill // *Oceanography*. 2016. V. 29(3). P. 76–87. doi:10.5670/oceanog.2016.72.
111. Colcomb K., Salt D., Peddar M. et al. Determination of the limiting oil viscosity for chemical dispersion at sea. // *International Oil Spill Conference Proceedings*. 2005. V. 1. P. 53–58. doi.org/10.7901/2169-3358-2005-1-53.
112. SMART. 2006. Special Monitoring of Applied Response Technologies Protocol Report. National Oceanic and Atmospheric Administration, US Coast Guard, U.S. Environmental Protection Agency, 43 pp.
113. Прощенко Д. Ю., Голик С. С., Майор А. Ю. и др. Разработка метода лазерной искровой спектроскопии для задач геологоразведки и экологического мониторинга водных сред в режиме реального времени // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. 2021. № 1. С. 112–119. doi:10.21685/2072-3040-2021-1-9.
114. Thornton B., Takahashi T., Sato T. Development of a deep-sea laser-induced breakdown spectrometer for in situ multi-element chemical analysis // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2015. V. 95. P. 20–36. doi.org/10.1016/j.dsr.2014.10.006.
115. Nakanishi R., Ohba H., Saeki M. et al. Highly sensitive detection of sodium in aqueous solutions using laser-induced breakdown spectroscopy with liquid sheet jets // *Optics Express*. 2021. V. 29 (4). P. 5205–5212. DOI:10.1364/OE.415308.
116. Sakka T., Takatani K., Ogata Y. H. et al. Laser ablation at the solid–liquid interface: transient absorption of continuous spectral emission by ablated aluminium atoms // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2001. V. 35. № 1. P. 65. DOI: 10.1088/0022-3727/35/1/312.
117. Tian Y., Hou S., Wang L. et al. CaOH Molecular Emissions in Underwater Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: Spatial–Temporal Characteristics and Analytical Performances // *Analytical chemistry*. 2019. V. 91. № 21. P. 13970–13977. doi.org/10.1021/acs.analchem.9b03513.
118. Masamura T., Thornton B., Ura T. Spectroscopy and imaging of laser-induced plasmas for chemical analysis of bulk aqueous solutions at high pressures // *OCEANS’11 MTS/IEEE KONA*. 2011. P. 1–6. doi: 10.23919/OCEANS.2011.6107194.
119. Golik S. S., Ilyin A. A., Kolesnikov A. V. et al. The influence of laser focusing on the intensity of spectral lines in femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy of liquids // *Technical Physics Letters*. 2013. V. 39(8). P. 702–704. doi:10.1134/s106378501308004x.
120. Dong Bao, Dengxin Hua, Hao Qi et al. Investigation of a Raman scattering spectral model for seawater containing a composite salt solute // *Optic Express*. 2022. V. 30 (5). P. 6713–6725. doi.org/10.1364/OE.450250.
121. Pinto R., Vilarinho R., Carvalho A. P. et al. Raman spectroscopy applied to diatoms (microalgae, Bacillariophyta): Prospective use in the environmental diagnosis of freshwater ecosystems // *Water Research*. 2021. V. 198. P. 117102. doi:10.1016/j.watres.2021.117102.
122. White S. N. Qualitative and quantitative analysis of CO₂ and CH₄ dissolved in water and seawater using laser Raman spectroscopy // *Applied spectroscopy*. 2010. V. 64, No. 7. P. 819–827. DOI: 10.1366/000370210791666354.
123. Somekawa T., Fujita M. Raman spectroscopy measurement of CH₄ gas and CH₄ dissolved in water for laser remote sensing in water // *EPJ Web of Conferences*. 2018. V. 176. P. 01021. doi:10.1051/epjconf/201817601021.
124. Pozdniakova V. V., Kustikova M. A. Raman spectroscopy for offshore hydrocarbon deposits detection // 2022 International Conference Laser Optics (ICLO). 2022. P. 1–1. doi: 10.1109/ICLO54117.2022.9840226.
125. Shiyu C., Guangming Z., Kai W. et al. Raman spectroscopic and microscopic monitoring of on-site and in-situ remediation dynamics in petroleum contaminated soil and groundwater // *Water Research*. 2023. V. 233. P. 119777. doi.org/10.1016/j.watres.2023.119777.
126. Hiraga Y., Sasagawa T., Yamamoto S. et al. A precise deconvolution method to derive methane hydrate cage occupancy ratios using Raman spectroscopy // *Chem. Eng. Sci.* 2020. V. 214. P. 115361. DOI:10.1016/j.ces.2019.115361.

127. Tulk C. A., Ripmeester J. A., Klug D. D. The application of Raman spectroscopy to the study of gas hydrates // *Gas hydrates: challenges for the future*. 2000. V. 912(1). P. 859—872 doi.org/10.1111/j.1749-6632.2000.tb06840.x.
128. Schicks J. M., Pan M., Giese R. et al. A new high-pressure cell for systematic in situ investigations of micro-scale processes in gas hydrates using confocal micro-Raman spectroscopy // *Rev Sci Instrum*. 2020. V. 91 (11). P. 115103. doi.org/10.1063/5.0013138.
129. Guillaume D., Teinturier S., Dubessy J. et al. Calibration of methane analysis by Raman spectroscopy in H₂O–NaCl–CH₄ fluid inclusions // *Chemical Geology*. 2003. V. 194(1—3). P. 41—49. doi:10.1016/s0009-2541(02)00270-x.
130. Singh J., Muller A. Ambient Hydrocarbon Detection with an Ultra-Low-Loss Cavity Raman Analyzer // *Analytical Chemistry*. 2023. V. 95 (7). P. 3703—3711. DOI: 10.1021/acs.analchem.2c04707.
131. Zhevnikov A. P., Bepalov V. G., Grishkanich A. S. et al. Oil and gas deposits determination by ultraviolet lidar // *Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies XII*. 2015. V. 9112 P. 91121F. doi.org/10.1117/12.2049920.
132. Kascheev S. V., Elizarov V. V., Grishkanich A. S. et al. Upgraded raman lidar with ultraspectral resolution // 2014 International Conference Laser Optics, St. Petersburg, Russia. 2014. P. 1—1. doi: 10.1109/LO.2014.6886397.
133. Chubchenko I., Popov E., Grigorenko K. et al. Raman Gas Analyzer of Carbon Isotopologues with 50 ppm Level Sensitivity // 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC). 2021. P. 1—1. doi: 10.1109/CLEO/Europe-EQEC52157.2021.9541690.
134. Vikin V., Polishchuk A., Chubchenko I. et al. Raman laser spectrometer: Application to 12 C/ 13 C isotope identification in CH₄ and CO₂ greenhouse gases // *Appl. Sci*. 2020. V. 10. No. 21. P. 7473. doi.org/10.3390/app10217473.
135. Moore C., Barnard A., Fietzek P. et al. Optical tools for ocean monitoring and research // *Ocean Science*. 2009. V. 5(4). P. 661—684. doi:10.5194/os-5-661-2009.
136. Chen S., Wang J., Zhang C. et al. Marine Structural Health Monitoring with Optical Fiber Sensors: A Review // *Sensors*. 2023. V. 23. P. 1877. doi.org/10.3390/s23041877.
137. Min R., Liu Z., Pereira L. et al. Optical fiber sensing for marine environment and marine structural health monitoring: A review // *Optics & Laser Technology*. 2021. V. 140. P. 107082. doi:10.1016/j.optlastec.2021.107082.
138. Chakravartula V., Rakshit S., Dhanalakshmi S. et al. Linear Temperature Distribution Sensor Using FBG in Liquids—Local Heat Transfer Examination Application // *IEEE Sensors Journal*. 2021. V. 21. No. 15. P. 16651—16658. doi: 10.1109/JSEN.2021.3078731.
139. Wynn R. B., Huvenne V. A. I., Le Bas T. P. et al. Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience // *Marine Geology*. 2014. V. 352. P. 451—468. doi.org/10.1016/j.margeo.2014.03.012.
140. Baggio A., Turani M., Olivero M. et al. Selective distributed optical fiber sensing system based on silicone cladding optical fiber and Rayleigh backscattering reflectometry for the detection of hydrocarbon leakages // *Optics & Laser Technology*. 2023. V. 161. P. 109—158. doi.org/10.2139/ssrn.4108008.
141. Arief H. A., Wiktorski T., Thomas P. J. A Survey on Distributed Fibre Optic Sensor Data Modelling Techniques and Machine Learning Algorithms for Multiphase Fluid Flow Estimation // *Sensors*. 2021. V. 21. No.8. P. 2801. doi.org/10.3390/s21082801.
142. Totland C., Thomas P. J., Størdal I. F. et al. A Fully Distributed Fibre Optic Sensor for the Detection of Liquid Hydrocarbons // *IEEE Sensors Journal*. 2021. V. 21. No. 6. P. 7631—7637 doi: 10.1109/JSEN.2020.3047549.
143. Tanimola F., Hill D. Distributed fibre optic sensors for pipeline protection // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2009. V.1 (4—5). P. 134—143. doi: 10.1016/j.jngse.2009.08.002.
144. Ампилов Ю. П. Анализ погрешностей сейсморазведки при моделировании месторождений углеводородов и прогнозе подсчетных параметров // *European Association of Geoscientists & Engineers*. 2004. С. 37—00024. doi.org/10.3997/2214-4609.201405518.
145. Мухамедьяров Р. Д. Метод видеотепловизионной генерализации и его геотехногенное значение // *Вестник казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева*. 2012. №1. С. 60—66.

146. Conmy R. N., Coble P. G., Farr J. et al. Submersible Optical Sensors Exposed to Chemically Dispersed Crude Oil: Wave Tank Simulations for Improved Oil Spill Monitoring // *Environmental Science & Technology*. 2014. V. 48(3). P. 1803—1810. doi:10.1021/es404206y.
147. Царев В. И., Букин О. А., Голик С. С. и др. Применение метода лазерной искровой спектроскопии в экологических исследованиях // *Исследовано в России*. 2003. С. 2108—2116. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/174.pdf> (дата обращения: 04.04.2023).

References

- Zhai M., Hu R., Wang Y. et al. Mineral resource science in China: Review and perspective. *Geography and Sustainability*. 2021; (2):107—114. doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.002.
- Ponomarev A. S., Pozdnyakov A. S. Modern trends in the development of the global sector of offshore hydrocarbon production. *Territoriya «NEFTEGAZ» = The territory of “NEFTEGAZ”* 2018; (11):(40—50). (In Russ.).
- Makarov A. A., Grigoriev L. M., Mitrova T. A. *World and Russian Energy Outlook up to 2040*. Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 2013: 110 p.
- Vasiltsova V. M. Problems of development of offshore oil and gas fields. *Zapiski Gornogo instituta = Notes of the Mining Institute*. 2016. Available online: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-osvoeniya-shelfovyh-mestorozhdeniy-nefti-i-gaza> (accessed on: 04.04.2023). (In Russ.).
- Wolfe K. J., Parker, G. J., Sellars S. L. Hebron Offshore Development Project Overview. *Offshore Technology Conference*. 2018: 1—12. doi: 10.4043/28695-ms.
- Mark J., Kaiser A Review of Exploration, Development, and Production Cost Offshore Newfoundland. *Natural Resources Research*. 2021; 30(2): 1253—1290. doi.org/10.1007/s11053-020-09784-3.
- Jahn F., Cook M., Graham M. *Hydrocarbon Exploration and Production*. Elsevier Science: Amsterdam. The Netherlands, 2008: 456 p.
- Picard K., Radke L. C., Williams D. K. et al. Origin of high density seabed pockmark fields and their use in inferring bottom currents. *Geosciences*. 2018; 8(6): 195. doi.org/10.3390/geosciences8060195.
- Zemtsova M. N., Bormasheva K. M., Moiseev I. K. *Uglevodorody: uchebnoye posobiye = Hydrocarbons: textbook*. Samara: Samara State Technical University, 2016: 147 p. (In Russ.).
- Rovere M., Mercorella A., Frapiccini E. et al. Geochemical and Geophysical Monitoring of Hydrocarbon Seepage in the Adriatic Sea. *Sensors*. 2020; 20(5): 1504. doi.org/10.3390/s20051504.
- Kvenvolden K. A. Methane hydrate — A major reservoir of carbon in the shallow geosphere? *Chemical Geology*. 1988; (71):41—51. doi.org/10.1016/0009-2541(88)90104-0.
- Le D. L., Obzhirou A. I., Nguyen H. et al. Distribution of gases in bottom sediments of the southwestern sub-basin of the South China sea (Bien Dong). *Tihookeanskaya geologiya = Pacific geology*. 2021; 40(2):(67—77). (In Russ.). DOI: 10.30911/0207-4028-2021-40-2-67-77.
- Shakirov R. B., Lan N.H., Yatsuk A. et al. Methane flux into the atmosphere in the Bien Dong (East Sea of Vietnam). *Journal of Marine Science and Technology*. 2018; 18(3): 250—255. DOI: 10.15625/1859-3097/18/3/12696.
- Shakirov R. B., Yatsuk A. V., Mishukova G. I. et al. Methane flux into the atmosphere in the South China Sea. *Doklady Earth Sciences*. 2019; 1(486): 533—536 doi.org/10.1134/S1028334X19050064.
- Starobinets I. S. *Gazogehimicheskie pokazateli neftegazonosnosti i prognoz sostava zalezhej uglevodorodov = Gas-geochemical indicators of oil and gas content and forecast of the composition of hydrocarbon accumulations*. Nedra: Moscow 1986: 200 p. (In Russ.).
- Mishukova G. I., Shakirov R. B. Spatial variations of methane distribution in marine environment and its fluxes at the wateratmosphere interface in the western Sea of Okhotsk. *Water Resources*. 2017; 44 (4): 662—672. doi.org/10.1134/S0097807817040133.
- Novigatsky A. N., Belikov I. B., Belousov V. A. et al. Results of ship measurements of methane over the northern Atlantic and the adjacent Arctic in summer 2020. *Morskie issledovaniya i obrazovanie (MARESEDU-2021). Trudy X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Marine Research and Education (MARESEDU-2021). Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference*. 2021; III (III): 72—75. (In Russ.).

18. Dafner E., Obzhirov A., Vereshzhagina O. Distribution of methane in waters of the Okhotsk and western Bering Seas and the area of the Kuril Islands. *Hydrobiologia*. 1997; (362):93—101. doi.org/10.1023/A:1003114031011.
19. Weniger P., Blumenberg M., Berglar K. et al. Origin of near-surface hydrocarbon gases bound in northern Barents Sea sediments. *Marine and Petroleum Geology*. 2019; (102):455—476. doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.12.036.
20. Jaśniewicz D., Klusek Z., Brodecka-Goluch A. et al. Acoustic investigations of shallow gas in the southern Baltic Sea (Polish Exclusive Economic Zone): a review. *Geo-Marine Letters*. 2019; (39):1—17. doi.org/10.1007/s00367-018-0555-5.
21. Mazzini A., Ivanov M. K., Parnell J. et al. Methane related authigenic carbonates from the Black Sea geochemical characterization and relation to seeping fluids. *Marine Geology*. 2004; (212):153—181. doi.org/10.1016/j.margeo.2004.08.001.
22. Judd A., Hovland M. *Seabed fluid flow. The impact on geology, biology and the marine environment*. Cambridge: Cambr. Univ. Press 2007: 475 p.
23. Hovland M., Judd A. G., King L. H. Characteristic features of pockmarks on the North Sea Floor and Scotian Shelf. *Sedimentology*. 1984; (31):471—480. doi.org/10.1111/j.1365-3091.1984.tb01813.x.
24. Mazzini A., Etiope G. Mud volcanism: An updated review. *Earth-Science Reviews*. 2017; (168):81—112. doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.03.001.
25. Kennicut M. C., Brooks J. M., Bidigare R. J. R. et al. Vent type taxa in a hydrocarbon seep region on the Louisiana slope. *Nature*. 1985; (317):351—353. doi:10.1038/317351a0.
26. Mishukova G. I., Yatsuk A. V., Shakirov R. B. Distribution of methane fluxes on the water–atmosphere interface in different regions of the World Ocean. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of transition zones*. 2021; 5(3):(240—254). doi.org/10.30730/gtr.2021.5.3.240-247.247-254 (In Russ.).
27. Lammers S., Suess E., Mansurov M. N. et al. Variations of atmospheric methane supply from the Sea of Okhotsk induced by the seasonal ice cover. *Global Biogeochemical Cycles*. 1995; 9 (3): 351—358. doi.org/10.1029/95GB01144.
28. Mishukova G. I., Shakirov R. B., Obzhirov A. I. Methane fluxes on the water–atmosphere boundary in the Sea of Okhotsk. *Doklady Earth Sciences*. 2017; 475(2): 963—967 doi.org/10.1134/S1028334X17080256.
29. Mishukova G. I., Mishukov V. F., Obzhirov A. I. Distribution of Methane and Its Fluxes at the Water–Atmosphere Boundary in Some Regions of the Sea of Okhotsk. *Vestnik DVO RAN = Bulletin of the FEB RAS*. 2010; (6):(36—43). (In Russ.).
30. Adushkin V. V., Kudryavtsev V. P. On methane emission in the Arctic. *Aktual'nye problemy nefti i gaza = Actual problems of oil and gas*. 2018; 4(23):(1—9). (In Russ.). DOI: 10.29222/ippng.2078-5712.2018-23.art64.
31. Antonov K. L., Poddubny V. A., Markelov Yu. I. et al. Some results of greenhouse gases monitoring in the Arctic region of Russia. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: ecology and economy*. 2018; 1(29):(56—67). (In Russ.). DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-56-67.
32. Shakirov R. B., Mishukova O. V. The spatial distribution of the methane fluxes on the water-atmosphere boundary in the Sea of Okhotsk. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of transition zones*. 2019; 3(1):(107—123). (In Russ.). doi: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.107-123.
33. Obzhirov A. I., Pestrikova N. L., Mishukova G. I. et al. Distribution of methane content and methane fluxes in the Sea of Japan, Sea of Okhotsk, and near-Kuril Pacific. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016; 41(3): 205—212. doi.org/10.3103/S1068373916030067.
34. Abrams M. A. Distribution of subsurface hydrocarbon seepage in near-surface marine sediments. *American Association Petroleum Geology Memoir*. 1996; (77):1—14. doi:10.1306/d9cb6943-1715-11d7-8645000102c1865d.
35. Abrams M. A. Interpretation of surface methane carbon isotopes for detection of subsurface hydrocarbons. *American Association Petroleum Geology Bulletin*. 1987; 71/5: 524. doi.org/10.1306/M66606C22.
36. Macdonald L., Boland G., Baker J. et al. Gulf of Mexico hydrocarbon seep communities. *Marine Biology*. 1989; (101):235—247. DOI: 10.1007/BF00391463.
37. Roberts H. H., Carney R. S. Evidence of episodic fluid, gas, and sedimentary venting on the northern Gulf of Mexico continental slope. *Economic Geology*. 1997; 92 (7—8): 863—879. doi.org/10.2113/gsecongeo.92.7-8.863.

38. Abrams M. A., Narimanov A. A. Geochemical evaluation of hydrocarbons and their potential sources in the western South Caspian depression, Republic of Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*. 1997; 14(4): 451—468. doi:10.1016/s0264-8172(97)00011-1.
39. Solomon E. A., Kastner M., MacDonald I. R., Leifer I. Considerable methane fluxes to the atmosphere from hydrocarbon seeps in the Gulf of Mexico. *Nature Geoscience*. 2009; 2(8): 561—565. doi:10.1038/ngeo574.
40. Abrams M. A. Geophysical and geochemical evidence for subsurface hydrocarbon leakage in the Bering Sea, Alaska. *Marine and Petroleum Geology Bulletin*. 1992; (9):208—221. doi.org/10.1016/0264-8172(92)90092-S.
41. Schumacher D., Abrams M. A. Hydrocarbon migration and its near surface migration, *AAPG Memoir*. 1996; 66: 441 p. DOI:10.1306/M66606.
42. Horvitz L. Geochemical Exploration for Petroleum. *Science*. 1985; (229):821—827. DOI: 10.1126/science.229.4716.821.
43. Levinson A. A. *Introduction to exploration geochemistry*. Applied Pub. 1980: 924 p.
44. Price L. C. Aqueous Solubility of Petroleum as Applied to Its Origin and Primary Migration. *AAPG Bulletin*. 1976; 60(2): 213—244. doi: https://doi.org/10.1306/83D922A8-16C7-11D7-8645000102C1865D.
45. Fischer P. J., Stevenson A. J. Natural hydrocarbon seeps along the northern shelf of the Santa Barbara Basin. *California: Offshore Technology Conference*. 1973: 159—166. doi.org/10.4043/1738-MS.
46. Reitsema R. H., Linberg F. A., Kaltenback A. J. Light hydrocarbons in Gulf of Mexico water: sources and relation to structural highs. *Journal of Geochemical Exploration*. 1978; (10):139—151. doi.org/10.1016/0375-6742(78)90014-6.
47. Clayton C., Hay S. Gas migration mechanisms from accumulation to surface. *Geology*. 1994; (6):12—23. doi.org/10.37570/bgsd-1995-41-03.
48. Whelan T., Coleman J. M., Shuayada J. N. The geochemistry of recent Mississippi river delta: gas concentrations and sediment stability. *Proceedings of the 7th Offshore Technology Conference*. 1975; (3):71—84. doi.org/10.4043/2342-MS.
49. Zhizhchenko B. P. Generation of hydrocarbon gases in recent marine sediments. *International Geology Review*. 1978; 21(4):163—170. doi.org/10.1080/00206818209467081.
50. Boetius A., Wenzhöfer F. Seafloor oxygen consumption fuelled by methane from cold seeps. *Nature Geoscience*. 2013; 6(9): 725—734. doi:10.1038/ngeo1926.
51. Silyakova A., Jansson P., Serov P. et al. Physical controls of dynamics of methane venting from a shallow seep area west of Svalbard. *Continental Shelf Research*. 2019; 194: 104030. doi:10.1016/j.csr.2019.104030.
52. Kvenvolden K. A., Field M. F. Thermogenic hydrocarbons in unconsolidated sediment of Eel River Basin, offshore northern California. *AAPG Bulletin*. 1981; 65(9): 1642—1646. doi.org/10.1306/03B5963E-16D1-11D7-8645000102C1865D.
53. Anderson R. K., Scalan R. S., Parker P. L. et al. Seep oil and gas in Gulf of Mexico slope sediments. *Science*. 1983; 222(4624): 619—621. doi: 10.1126/science.222.4624.619.
54. Sechman H., Kotarba M. J., Kędzior S. et al. Distribution of methane and carbon dioxide concentrations in the near-surface zone, genetic implications, and evaluation of gas flux around abandoned shafts in the Jastrzębie-Pszczyna area (southern part of the Upper Silesian Coal Basin, Poland). *International Journal of Coal Geology*. 2019; (204):51—69. doi: 10.1016/j.coal.2019.02.001.
55. Sechman H., Kotarba M. J., Fiszler J. et al. Distribution of methane and carbon dioxide concentrations in the near-surface zone and their genetic characterization at the abandoned “Nowa Ruda” coal mine (lower Silesian Coal Basin, SW Poland). *International Journal of Coal Geology*. 2013; 116 (117): 1—16. doi.org/10.1016/j.coal.2013.05.005.
56. Sechman H., Kotarba M. J., Dzieniewicz M. et al. Evidence of methane and carbon dioxide migration to the near surface zone in the area of the abandoned coal mines in Wałbrzych District (lower Silesian Coal Basin, SW Poland) based on periodical changes of molecular and isotopic compositions. *International Journal of Coal Geology*. 2017; (183):138—160. doi.org/10.1016/j.coal.2017.10.011.
57. Bondur V. G., Mokhov I. I., Macosco A. A. *Metan i izmenenie klimata: nauchnye problemy i tekhnologicheskie aspekty = Methane and climate change: scientific problems and technological aspects*. M.: Russian Academy of Sciences, 2022: 388 p. (In Russ.).

58. Lushvin P. V. Methanotrophic Ice Thawing. *Elektronnoe nauch. izd. Al'manah prostranstvo i vremya = Electronic scientific ed. Almanac space and time*. 2013; 2 (2). Available online: <https://cyberleninka.ru/article/n/metanotrofnoe-tayanie-lda> (accessed on 28.03.2023). (In Russ.).
59. Baschek B., Farmer D. M. Gas Bubbles as Oceanographic Tracers. *Journal of Atmosphere and Oceanic Technology*. 2010; 27 (1): 241—245. doi.org/10.1175/2009JTECHO688.1.
60. Bogoyavlensky V. Prospects and problems of the arctic shelf oil and gas fields development. *Burenie i nefi' = Drilling and oil*. 2012: 4—10 (In Russ.).
61. ESDP European Scientific Diving Panel. Available online: <http://ssd.imbe.fr/SD-European-Standards?lang=fr> (accessed on 09.01.2022).
62. Birin I., Maglić L. Analysis of seismic methods used for subsea hydrocarbon exploration. *Pomorski zbornik*. 2020; (58):77—89. DOI:10.18048/2020.58.05.
63. Cui W. An overview of submersible research and development in China. *Journal of Marine Science and Application*. 2018; (17):459—470. doi.org/10.1007/s11804-018-00062-6.
64. Obzhirov A. I., Telegin Yu. A., Shakirov R. B. The need to use underwater robotics in engineering and geological surveys in the area of gas manifestations. *Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana: materialy Vos'moj vsrossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, 30 sentyabrya — 3 oktyabrya 2019 g. Vladivostok = Technical problems of the development of the World Ocean: materials of the Eighth All-Russian Scientific and Technical Conference, September 30 — October 3, 2019 Vladivostok*. 2019: 23—31 (In Russ.).
65. Verdun J., Klingele E., Bayer R. B. The Alpine Swiss-French Airborne Gravity Survey. *Geophysical Journal International*. 2003; (152):8—19. doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01748.x.
66. Wenyong L., Jianxin Z., Shengqing X. et al. Effect and Prospect of Basic Geological Survey Based on Airborne Gravimetry in China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*. 2012; 86(1): 38—47. doi:10.1111/j.1755-6724.2012.00609.x.
67. Mikhailov P. S., Zheleznyak L. K., Koneshov V. N. et al. Modern technologies of software-mathematical and methodological support of marine gravimetric surveys. *Voprosy teorii i praktiki geologicheskoy interpretacii geofizicheskikh polej: Materialy 47-j sessii Mezhdunarodnogo nauchnogo seminar D. G. Uspenskogo — V. N. Strahova. Voronezh, 27 yanvarya — 30 yanvarya 2020 = Questions of theory and practice of geological interpretation of geophysical fields: Materials of the 47th session of the International Scientific Seminar of D. G. Uspensky — V. N. Strakhov. Voronezh, January 27 — January 30, 2020*. 2020: 25—28. (In Russ.).
68. Koneshov V. N., Kostitsyn V. I. *Oborudovanie i tekhnologii dlya gravitacionnoj i magnitnoj razvedki: aviacionnye i morskije gravimetry: uchebnoe posobie = Equipment and technologies for gravity and magnetic exploration: aviation and marine gravimeters: textbook*. Perm': PSNRU, 2021: 108 p. (In Russ.).
69. Koneshov V. N., Zheleznyak L. K., Mikhailov P. S. et al. Development of Marine Gravimetric Research Technologies in the Arctic. *Trudy IX mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Morskije issledovaniya i obrazovanie (MARESEDU-2020)" = Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference "Marine Research and Education (MARESEDU-2020)"*. 2020; III: 518—521 (In Russ.).
70. Kearey P., Brooks M., Hill I. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science Ltd, 3rd edh 2016: 155 p.
71. Nersesov B. A. Methods for Probabilistic Evaluation of the Efficiency of Marine Magnetometry Tools. *Okeanologicheskie issledovaniya = Oceanological research*. 2019; 47(4):(152—160). DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(4).10 (In Russ.).
72. Gorodnitskiy A. M., Brusilovskiy Y. V., Ivanenko et al. New methods for processing and interpreting marine magnetic anomalies: Application to structure, oil and gas exploration, Kuril forearc, Barents and Caspian seas. *Geoscience Frontiers*. 2013; 4(1): 73—85. doi:10.1016/j.gsf.2012.06.002.
73. Mostafaei K., Kianpour M. Application of Magnetometry in Manto-type Copper Deposit Exploration, Case study: Meyami, Iran. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2022; 37(5): 1—14. DOI: 10.17794/rgn.2022.5.1.
74. De Castro D. L. Gravity and magnetic joint modeling of Potiguar Rift Basin (NE Brazil): Basement control during Neocomian extension and deformation. *Journal of South American Earth Sciences*. 2011; (31):186—198. doi.org/10.1016/j.jsames.2011.01.005.

75. Vitte L.V., Vasilevskiy A. N. Geologic nature of regional magnetic and gravity anomalies in Mongol-Transbaikalian province of the central Asian Fold Belt. *Russian Geology and Geophysics*. 2013; (54):1442—1449. doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.011.
76. Ampilov Yu. P. Seismic exploration on the Russian Shelf in terms of sanctions and low oil prices. *Tekhnologii seismorazvedki = Seismic exploration technologies*. 2015; (4):(5—14). (In Russ.). DOI: 10.18303/1813-4254-2015-4-5-14.
77. Isaenkov R., Ponimaskin A. I., Tokarev M. J. Processing workflow for the dynamic interpretation of very high-resolution P-wave seismic data. *EAGE Near Surface Geoscience 2016 — Second Applied Shallow Marine Geophysics Conference*. 2016; 2016: 1—5. doi.org/10.3997/2214-4609.201602154.
78. Ampilov Y. P., Vladov M. L., Tokarev M. Y. Broadband Marine Seismic Acquisition Technologies: Challenges and Opportunities. *Seismic Instruments*. 2019; 55(4): 388—403. doi: 10.3103/s0747923919040030.
79. Lou M., Cai H., He X. et al. Application of seismic sedimentology in characterization of fluvial-deltaic reservoirs in Xihu sag, East China Sea shelf basin. *Petroleum Exploration and Development*. 2023; 50(1): 138—151. doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60375-6.
80. Putikov O., Kholmymanski M., Ivanov G. et al. Application of geoelectrochemical method for exploration of petroleum fields on the Arctic shelf. *Geochemistry*. 2020; 80 (3):125498 doi:10.1016/j.geoch.2019.02.001.
81. Chernykh D. V., Yusupov V. I., Salomatin A. S. A new acoustic method for quantifying the methane bubble flow in the system bottom sediments - water column and its implementation on the example of the Laptev Sea, Arctic Ocean. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursoy = Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2018; 329(11): 153—167. (In Russ.). doi.org/10.18799/24131830/2018/11/218.
82. Ampilov Y. P., Terekhina Y. E., Tokarev M. Y. Applied Aspects of Different Frequency Bands of Seismic and Water Acoustic Investigations on the Shelf. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019; 55(7): 705—720. doi:10.1134/s0001433819070028.
83. Bulanov V. A., Korskov I. V., Storozhenko A. V. et al. Studies of the acoustic characteristics of the upper layer of the sea by the method of multi-frequency acoustic sounding. *Sredstva i metody podvodnyh issledovaniy = Means and methods of underwater research*. 2020; 1(31):(42—55). (In Russ.). DOI: 10.37102/24094609.2020.31.1.006.
84. Zhavoronkin O. V., Tregub A. I. *Distancionnoe zondirovanie Zemli v geologicheskikh issledovaniyah = Remote sensing of the Earth in geological studies*. Voronezh: Voronezh State University 2012: 46 p. (In Russ.).
85. Denisov Yu. V., Raikunov G. G., Trofimov D. M. *Distancionnye metody poiska mestorozhdenij nefiti i gaza v morskikh rajonah. Monografiya = Remote methods of searching for oil and gas deposits in marine areas. Monograph*. Vologda: Infra-Engineering 2017: 68 p. (In Russ.).
86. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostyanoi A. G. *Sputnikovye metody identifikatsii i monitoringa zon riska dlya morskoj sredy = Satellite methods of identification and monitoring of marine environmental risk zones*. Moscow: ICI RAS 2016: 334 p. (In Russ.).
87. Landsat Science Available online: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/> (accessed on: 28.05.2023).
88. Aqua Earth-observing satellite mission Available online: <https://aqua.nasa.gov/> (accessed on: 28.05.2023).
89. Russian space systems Available online: <https://russianspacesystems.ru/bussines/dzz/resurs-p/> (accessed on: 28.05.2023). (In Russ.).
90. The official website of the Government of Canada Available online: <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat2/> (accessed on: 28.05.2023).
91. The European Space Agency Available online: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/terrasar-x-and-tandem-x> (accessed on: 29.05.2023).
92. Russian space systems Available online: <https://russianspacesystems.ru/bussines/dzz/kanopus-v/> (accessed on: 29.05.2023). (In Russ.).
93. Bondur V. G., Kuznetsova T. V. Studies of natural oil and gas shows on the sea surface using satellite images. *Aerokosmicheskij monitoring ob'ektov neftegazovogo kompleksa = Aerospace monitoring of oil and gas facilities*. 2012: 272—287. (In Russ.).
94. Bondur V. G. *Aerokosmicheskij monitoring ob'ektov neftegazovoj otrasli = Aerospace monitoring of oil and gas facilities*. The scientific world 2012: 558 p. (In Russ.).

95. Karimov K. M., Onegov V. L., Kokutin S. N. et al. Remote thermal imaging of the Earth in solving geological problems. *Georesursy = Geo resources*. 2009; 1(29):(38—42). (In Russ.).
96. Zenchenko S. Methods and results of effective application of modern infra-red imaging technologies for measuring hydrophysical processes. *Trudy Krylovskogo Gosudarstvennogo Nauchnogo Centra = Proceedings of the Krylov State Scientific Center*. 2021; 2(396):(134—138). (In Russ.). DOI: 10.24937/2542-2324-2021-2-396-134-138.
97. Malinin V. N., Gordeeva S. M., Glock N. I. On the assessment of the heat content of the World Ocean from satellite data on the temperature of the surface layer of water. *Sovremennye problemy distantsionno zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2013; 10(3):(201—207). (In Russ.).
98. Malinin V. N., Glock N. I. The use of satellite data on the temperature of the surface layer of water to assess steric fluctuations in the level of the World Ocean. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Exploring the Earth from space*. 2014; (3):(27—32). (In Russ.).
99. Mukhamedyarov R. D., Dabaev A. I. Innovative technology “MVTGM” for searching for oil and gas fields and solving geotechnogenic problems. *Trudy obshchestva neftyanikov-geologov Kazakhstana = Proceedings of the Society of Petroleum Geologists of Kazakhstan*. 2014; (4):(293—295). (In Russ.).
100. Mukhamedyarov R. D., Tumanov V. R. Geological and geophysical significance of the method of video thermal imaging generalization. *Innovacii i tekhnologii v razvedke, dobyche i pererabotke nefi i gaza = Innovations and technologies in oil and gas exploration, production and processing*. 2010: 307—312. (In Russ.).
101. Ellis J. M., Davis H. H., Zamudio J. A. Exploring for onshore oil seeps with hyperspectral imaging. *Oil & Gas Journal*. 2001; (99):49—58.
102. Van Der Meer F., Van Dijk P., Van Der Werff H. et al. Remote sensing and petroleum seepage: a review and case study. *Terra Nova*. 2002; (14):1—17. doi.org/10.1046/j.1365-3121.2002.00390.x.
103. Almeida-Filho R. Remote detection of hydrocarbon microseepage induced soil alteration. *International Journal of Remote Sensing*. 2002; (23):3523—3524. DOI: 10.1080/01431160210137712.
104. Boulart C., Connelly D. P., Mowlem M. C. Sensors and technologies for in situ dissolved methane measurements and their evaluation using Technology Readiness Levels. *Trends in Analytical Chemistry*. 2010; 29(2): 186—195. doi.org/10.1016/j.trac.2009.12.001.
105. Salyuk P. A., Bulanov V. A., Korskov I. V. et al. Possibility of remote detection of elevated methane concentrations in sea water using optical spectroscopy methods on underwater remote-controlled vehicles. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika = Underwater research and robotics*. 2011; 2(12):(43—51). (In Russ.).
106. Barbini R., Colao F., Fantoni R. et al. Differential lidar fluorensensor system used for phytoplankton bloom and sea water quality monitoring in Antarctica. *International Journal of Remote Sensing*. 2001; 22 (2/3): 369—384. DOI: 10.1080/014311601449989.
107. Bukin O. A., Mayor A. Yu., Pavlov V. A. et al. Measurement of the lightscattering layers structure and detection of the dynamic processes in the upper ocean layer by shipborne lidar. *International Journal of Remote Sensing*. 1998; 19(4): 707—717. DOI: 10.1080/014311698215946.
108. Major A. Yu., Bukin O. A., Krikun V. A. etc. Compact ship flow fluorimeter. *Optika atmosfery i okeana = Optics of the atmosphere and ocean*. 2007; 20(3): 283—285. (In Russ.).
109. Carstea E. M., Baker A., Bieroza M. et al. Continuous fluorescence excitation—emission matrix monitoring of river organic matter. *Water Research*. 2010; 44(18): 5356—5366. doi:10.1016/j.watres.2010.06.036.
110. White H., Commy R., MacDonald I. et al. Methods of Oil Detection in Response to the Deepwater Horizon Oil Spill. *Oceanography*. 2016; 29(3): 76—87. doi:10.5670/oceanog.2016.72.
111. Colcomb K., Salt D., Peddar M. et al. Determination of the limiting oil viscosity for chemical dispersion at sea. *International Oil Spill Conference Proceedings*. 2005;(1): 53—58. doi:https://doi.org/10.7901/2169-3358-2005-1-53.
112. SMART. 2006. Special Monitoring of Applied Response Technologies Protocol Report. National Oceanic and Atmospheric Administration, US Coast Guard, U.S. Environmental Protection Agency. 2006 : 43 p.
113. Proshchenko D. Yu., Golik S. S., Mayor A. Yu. et al. Development of a method of laser spark spectroscopy for geological exploration and environmental monitoring of aquatic environments in real time. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Povolzhskij region. Fiziko-matematicheskie nauki =*

- bulletin of higher educational institutions. Volga region. Physical and mathematical sciences.* 2021; (1):(112—119). (In Russ.). doi:10.21685/2072-3040-2021-1-9.
114. Thornton B., Takahashi T., Sato T. Development of a deep-sea laser-induced breakdown spectrometer for in situ multi-element chemical analysis. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers.* 2015; (95):20—36. doi.org/10.1016/j.dsr.2014.10.006.
115. Nakanishi R., Ohba H., Saeki M. et al. Highly sensitive detection of sodium in aqueous solutions using laser-induced breakdown spectroscopy with liquid sheet jets. *Optics Express.* 2021; 29 (4): 5205—5212. DOI:10.1364/OE.415308.
116. Sakka T., Takatani K., Ogata Y. H. et al. Laser ablation at the solid–liquid interface: transient absorption of continuous spectral emission by ablated aluminium atoms. *Journal of Physics D: Applied Physics.* 2001; 35(1): 65. DOI: 10.1088/0022-3727/35/1/312.
117. Tian Y., Hou S., Wang L. et al. CaOH Molecular Emissions in Underwater Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: Spatial–Temporal Characteristics and Analytical Performances. *Analytical chemistry.* 2019; 91(21): 13970—13977. doi.org/10.1021/acs.analchem.9b03513.
118. Masamura T., Thornton B., Ura T. Spectroscopy and imaging of laser-induced plasmas for chemical analysis of bulk aqueous solutions at high pressures. *OCEANS'11 MTS/IEEE KONA.* 2011: 1—6. doi: 10.23919/OCEANS.2011.6107194.
119. Golik S. S., Ilyin A. A., Kolesnikov A. V. et al. The influence of laser focusing on the intensity of spectral lines in femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy of liquids. *Technical Physics Letters.* 2013; 39(8): 702—704. doi:10.1134/s106378501308004x.
120. Dong B., Dengxin H., Hao Q. et al. Investigation of a Raman scattering spectral model for seawater containing a composite salt solute. *Optic Express.* 2022; 30 (5): 6713—6725. doi.org/10.1364/OE.450250.
121. Pinto R., Vilarinho R., Carvalho A. P. et al. Raman spectroscopy applied to diatoms (microalgae, Bacillariophyta): Prospective use in the environmental diagnosis of freshwater ecosystems. *Water Research.* 2021; 198: 117102. doi: 10.1016/j.watres.2021.117102.
122. White S. N. Qualitative and quantitative analysis of CO₂ and CH₄ dissolved in water and seawater using laser Raman spectroscopy. *Applied spectroscopy.* 2010; 64(7): 819—827. DOI: 10.1366/000370210791666354.
123. Somekawa T., Fujita M. Raman spectroscopy measurement of CH₄ gas and CH₄ dissolved in water for laser remote sensing in water. *EPJ Web of Conferences.* 2018; 176: 01021. doi:10.1051/epjconf/201817601021.
124. Pozdniakova V. V., Kustikova M. A. Raman spectroscopy for offshore hydrocarbon deposits detection. *2022 International Conference Laser Optics (ICLO).* 2022: 1—1. doi: 10.1109/ICLO54117.2022.9840226.
125. Shiyu C., Guangming Z., Kai W. et al. Raman spectroscopic and microscopic monitoring of on-site and in-situ remediation dynamics in petroleum contaminated soil and groundwater. *Water Research.* 2023; 233: 119777. doi.org/10.1016/j.watres.2023.119777.
126. Hiraga Y., Sasagawa T., Yamamoto S. et al. A precise deconvolution method to derive methane hydrate cage occupancy ratios using Raman spectroscopy. *Chem. Eng. Sci.* 2020; 214: 115361. DOI: 10.1016/j.ces.2019.115361.
127. Tulk C. A., Ripmeester J. A., Klug D. D. The application of Raman spectroscopy to the study of gas hydrates. *Gas hydrates: challenges for the future.* 2000; 912(1): 859—872 doi.org/10.1111/j.1749-6632.2000.tb06840.x.
128. Schicks J. M., Pan M., Giese R. et al. A new high-pressure cell for systematic in situ investigations of micro-scale processes in gas hydrates using confocal micro-Raman spectroscopy. *Rev Sci Instrum* 2020; 91 (11): 115103. doi.org/10.1063/5.0013138.
129. Guillaume D., Teinturier S., Dubessy J. et al. Calibration of methane analysis by Raman spectroscopy in H₂O–NaCl–CH₄ fluid inclusions. *Chemical Geology.* 2003; 194(1—3): 41—49. doi:10.1016/s0009-2541(02)00270-x.
130. Singh J., Muller A. Ambient Hydrocarbon Detection with an Ultra-Low-Loss Cavity Raman Analyzer. *Analytical Chemistry.* 2023; 95 (7): 3703—3711. DOI: 10.1021/acs.analchem.2c04707.
131. Zhevrlakov A. P., Bepalov V. G., Grishkanich A. S. et al. Oil and gas deposits determination by ultraviolet lidar. *Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies XII.* 2015; 9112: 91121F. doi.org/10.1117/12.2049920.

132. Kascheev S. V., Elizarov V. V., Grishkanich A. S. et al. Upgraded raman lidar with ultraspectral resolution. *2014 International Conference Laser Optics, St. Petersburg, Russia*. 2014: 1—1. doi: 10.1109/LO.2014.6886397.
133. Chubchenko I., Popov E., Grigorenko K. et al. Raman Gas Analyzer of Carbon Isotopologues with 50 ppm Level Sensitivity. *2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*. 2021: 1—1. doi: 10.1109/CLEO/Europe-EQEC52157.2021.9541690.
134. Vikin V., Polishchuk A., Chubchenko I. et al. Raman laser spectrometer: Application to 12 C/ 13 C isotope identification in CH₄ and CO₂ greenhouse gases. *Appl. Sci.* 2020; 10(21): 7473. doi.org/10.3390/app10217473.
135. Moore C., Barnard A., Fietzek P. et al. Optical tools for ocean monitoring and research. *Ocean Science*. 2009; 5(4): 661—684. doi:10.5194/os-5-661-2009.
136. Chen S., Wang J., Zhang C. et al. Marine Structural Health Monitoring with Optical Fiber Sensors: A Review. *Sensors*. 2023; 23: 1877. doi.org/10.3390/s23041877.
137. Min R., Liu Z., Pereira L. et al. Optical fiber sensing for marine environment and marine structural health monitoring: A review. *Optics & Laser Technology*. 2021; 140: 107082. doi:10.1016/j.optlas-tec.2021.107082.
138. Chakravartula V., Rakshit S., Dhanalakshmi S. et al. Linear Temperature Distribution Sensor Using FBG in Liquids—Local Heat Transfer Examination Application. *IEEE Sensors Journal*. 2021; 21 (15): 16651—16658. doi: 10.1109/JSEN.2021.3078731.
139. Wynn R. B., Huvenne V. A. I., Le Bas T. P. et al. Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience. *Marine Geology*. 2014; (352):451—468. doi.org/10.1016/j.margeo.2014.03.012.
140. Baggio A., Turani M., Olivero M. et al. Selective distributed optical fiber sensing system based on silicone cladding optical fiber and Rayleigh backscattering reflectometry for the detection of hydrocarbon leakages. *Optics & Laser Technology*. 2023; 161: 109158. doi.org/10.2139/ssrn.4108008.
141. Arief H. A., Wiktorski T., Thomas P. J. A Survey on Distributed Fibre Optic Sensor Data Modelling Techniques and Machine Learning Algorithms for Multiphase Fluid Flow Estimation. *Sensors*. 2021; 21(8): 2801. doi.org/10.3390/s21082801.
142. Totland C., Thomas P. J., Størdal I. F. et al. A Fully Distributed Fibre Optic Sensor for the Detection of Liquid Hydrocarbons. *IEEE Sensors Journal*. 2021; 21(6): 7631—7637 doi: 10.1109/JSEN.2020.3047549.
143. Tanimola F., Hill D. Distributed fibre optic sensors for pipeline protection. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2009; 1(4—5):134—143. doi: 10.1016/j.jngse.2009.08.002.
144. Ampilov Yu. P. Analysis of seismic survey errors when modeling hydrocarbon deposits and forecasting calculation parameters. *European Association of Geoscientists & Engineers*. 2004: 37—00024. doi.org/10.3997/2214-4609.201405518.
145. Mukhamedyarov R. D. The method of video thermal imaging generalization and its geotechnogenic significance. *Vestnik kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A. N. Tupoleva = Bulletin of Kazan State Technical University named after A. N. Tupolev*. 2012; (1):(60—66). (In Russ.).
146. Conmy R. N., Coble P. G., Farr J. et al. Submersible Optical Sensors Exposed to Chemically Dispersed Crude Oil: Wave Tank Simulations for Improved Oil Spill Monitoring. *Environmental Science & Technology*. 2014; 48(3): 1803—1810. doi:10.1021/es404206y.
147. Tsarev V. I., Bukin O. A., Golik S. S. et al. Application of the laser spark spectroscopy method in environmental studies. *Issledovano v Rossii = Researched in Russia*. 2003: 2108—2116 Available online: <http://zhurnal.apc.relarn.ru/articles/2003/174.pdf> (accessed on: 04.04.2023). (In Russ.).

Информация об авторах

Позднякова Виктория Владимировна, аспирант факультета экотехнологий Национального исследовательского университета ИТМО, viktoriya.17@mail.ru.

Кустикова Марина Александровна, кандидат технических наук, доцент факультета экотехнологий Национального исследовательского университета ИТМО, marinakustikova@mail.ru.

Information about authors

Pozdniakova Viktoriia, PhD student of the Ecotechnologies Faculty at the ITMO University, viktori-ya.17@mail.ru.

Kustikova Marina, Ph.D, associate professor, the Ecotechnologies Faculty at the ITMO University, marinakustikova@mail.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 15.05.2023

Принята к печати после доработки 18.07.2023

The article was received on 15.05.2023

The article was accepted after revision on 18.07.2023

Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 556—573.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(72): 556—573.

ГЕОИНФОРМАТИКА

Научная статья

УДК [502.174.3:551.556.3]:[004.922+001.891.573](591.1)

doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-556-573

Оценивание морского ветроэнергетического потенциала на сирийском побережье на основе математического моделирования в среде ГИС

***Хасан Солиман¹, Дарья Андреевна Карпенкова (Украинцева)¹,
Вячеслав Георгиевич Бурлов¹, Анастасия Алексеевна Домостроева²***

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ),
Санкт-Петербург, Россия, hassansoliman2233@gmail.com.

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург,
Россия, adoostroeва@mail.ru.

Аннотация. Настоящее исследование рассматривает оценку возможности создания оффшорных ветровых электростанций у побережья Сирии и подбор наиболее подходящих мест для создания таких ферм на основе использования математических методов и нечеткой логики, которая является одним из методов искусственного интеллекта. Метод реализации предлагаемого подхода основан на аналитической иерархии, нечеткой логике и взвешенном наложении, связанном с пространственной оценкой местоположения в ГИС. На основе предыдущих исследований и местных требований в Сирии был разработан набор соответствующих критериев, включая туристические места, глубину морской воды, скорость ветра, морские пути сообщения, маршруты судов и другие критерии.

Ключевые слова: геоинформационная система (ГИС), нечеткая логика, нечеткий метод анализа иерархии (НМАИ), морские ветровые электростанции.

Для цитирования: Солиман Х., Карпенкова (Украинцева) Д. А., Бурлов В. Г., Домостроева А. А. Оценивание морского ветроэнергетического потенциала на сирийском побережье на основе математического моделирования в среде ГИС // Гидрометеорология и экология. 2023. № 72. С. 556—573. doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-556-573.

Original article

Assessment of offshore wind energy potential on the Syrian coast based on mathematical modeling in a GIS environment

***Hasan Soliman¹, Daria A. Karpenkova (Ukraintseva)¹,
Vyacheslav G. Burlov¹, Anastasiia A. Domostroeva²***

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

Summary. The government in the Syrian Arab Republic seeks to increase reliance on alternative energy as a strategic objective to support the electrical network and has issued several laws that help investors to invest in this field. The current study aims to assess the feasibility of establishing offshore wind farms off the Syrian coast and determine the most appropriate sites for establishing such farms, using mathematical methods and fuzzy logic, which is one of the methods of artificial intelligence that can be applied within the GIS environment. A new methodology has been proposed to accurately assess the potential of offshore wind energy in the Syrian coast, and this methodology has the potential to be applied in other studies. The method of implementing this study is based on analytic hierarchy, fuzzy logic and weighted overlay associated with spatial assessment of location in GIS. Based on previous studies and local requirements in Syria, a set of appropriate criteria has been developed, including tourist places, sea water depth, wind speed, marine communication lines, ship itineraries and other criteria. Layers of these parameters were created in Raster format within GIS, and then converted into fuzzy data and collected by weighted linear overlay. The results of the study showed that most of the Syrian coasts are not suitable for investment in the field of offshore wind energy, due to the low wind speed in some offshore areas and the presence of areas with great depths of water that make it difficult to build turbines. However, the current study was able to identify some suitable areas for offshore wind farms, especially in the northern areas of the Syrian coast adjacent to Lattakia Governorate, these areas produce an energy of 3,1 GW of electrical energy.

Keywords: Geoinformation System (GIS), fuzzy Logic, Fuzzy-Hierarchy Analysis Method (F-AHP), Offshore Wind Farms (OWF).

For citation: Soliman H., Karpenkova (Ukraintseva) D. A., Burlov V. G., Domostroeva A. A. Assessment of offshore wind energy potential on the Syrian coast based on mathematical modeling in a GIS environment. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(72): 556—573 (In Russ). doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-556-573.

Введение

Развитие оффшорной ветроэнергетики в последнее десятилетие набрало обороты по причине ее большей мощности по сравнению с наземной ветровой энергетикой и более высоких скоростей ветра на море. Морские ветровые электростанции (МВЭ), расположенные у береговой линии, ближе к более крупным нагрузкам, избегают необходимости передачи энергии на более дальнее расстояние, где расположены обычные электростанции. Кроме того, они относительно дороги, и их финансирование является «тяжелым бременем» для инвесторов, однако высокая генерирующая мощность делает их привлекательными по сравнению с наземными ветровыми электростанциями [1, 2]. Первые оффшорные ветровые электростанции производились в Дании и Нидерландах мощностью

менее 1 МВт из-за их высокой стоимости и технических трудностей. Великобритания и страны Северной Европы являются пионерами оффшорной ветроэнергетики, их текущая выработка превышает 7 ГВт. Китай и США планируют к 2030 году достичь 30 ГВт и 54 ГВт оффшорной ветроэнергетики соответственно [3, 4].

Морские ветровые установки должны учитывать вопросы устойчивости на ранних этапах планирования. Оценка мест, процесс установки, эксплуатация и связанные с этим воздействия имеют решающее значение для устойчивого развития этой технологии [5, 6]. МВЭ должны быть интегрированы в структуру управления морской территорией, посредством которой любая морская ветряная установка включается в регулируемую систему распределения [7]. Эта схема позволяет выбрать наиболее подходящие места, избегая основных ограничений [8], т.е. воздействия на окружающую среду, морскую деятельность, использование прибрежной зоны и неотъемлемых ценностей общества в отношении прибрежных регионов [9].

В настоящее время не существует рекомендаций по реализации этих ограничений в системе поддержки принятия решений, которая обычно основана на географических информационных системах (ГИС) [10, 11]. Разработка и внедрение моделей на основе ГИС может решить проблемы, связанные с потребностью в морском пространстве. В результате этого негативные воздействия будут сведены к минимуму, а устойчивость и прибыльность морского ветра станут максимальными [12, 13]. Тем не менее, доступная литература не дает прямых оценок исследований, проводимых для ГИС в области морского ветра, а также согласованности этих исследований с текущим состоянием дел. Поэтому существующая научная лакуна не позволяет оценить соответствующий выбор площадок для МВЭ, что обуславливает актуальность данного исследования, ориентированного на использование современных технологий.

Цель данной работы состоит в оценивании возможностей создания МВЭ у побережья Сирии с использованием математических методов и нечеткой логики, которая является одним из методов искусственного интеллекта. Полученные результаты позволили разработать новую модель определения мест размещения ветровых электростанций. Эта гибридная модель критериев ГИС использует количественное представление каждого критерия, уменьшая неопределенность и облегчая использование систем поддержки принятия решений для определения пригодности местоположения. Применение модели продемонстрировано на примере побережья Сирии (рис. 1).

Методика исследования

Управление природными ресурсами требует своевременной и надежной информации, доступной на местном, региональном, национальном и глобальном уровнях. Геоинформатика вместе с дистанционным зондированием, глобальными спутниковыми навигационными системами и сопутствующими технологиями представляет собой мощный инструмент управления природными ресурсами,

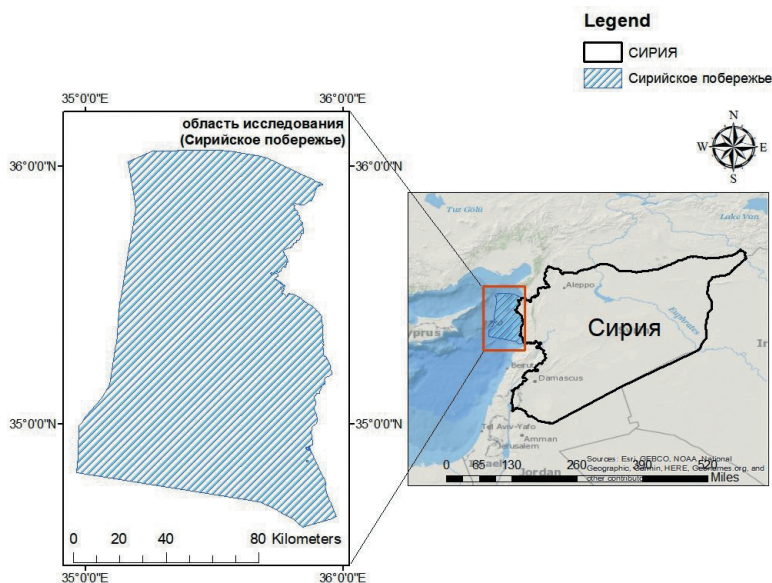


Рис. 1. Карта исследуемой территории сирийского побережья.

Fig. 1. Map of the study area representing the Syrian coast.

защиты окружающей среды и поддержки устойчивого развития. Быстрый рост рынка ветровой и солнечной энергии привел к возникновению множества новых проблем, наиболее важной из которых является управление расположением ферм возобновляемой энергии в соответствии с землепользованием.

Управление возобновляемыми источниками энергии в настоящее время сталкивается с рядом проблем, включая возрастающую сложность задач, постоянные изменения, неточные географические данные и динамические процессы, связанные с экономической ситуацией. В этих условиях интеллектуальные возможности лица, принимающего решение, часто вступают в противоречие с большим объемом необходимой географической информации, что приводит к затруднению принятия соответствующего решения. В качестве действенного способа повышения эффективности управления возобновляемыми источниками энергии следует построить методологию принятия решений на основе математических методов на всех уровнях работы. В этом случае компьютер выступает мысленным помощником лица, принимающего решения. Чтобы дать компьютеру возможности мышления, необходимо реальную административную или экономическую задачу заменить математическими моделями, а интуицию человека — моделью предпочтений [14, 15, 16].

Многокритериальное принятие решений (МКПР) на основе ГИС является наиболее эффективным методом определения пространственного расположения ветровых электростанций [17]. ГИС МКПР — это технология, используемая для принятия решений по пространственным вопросам, которая имеет множество

критериев и широко используется при пространственном планировании. В текущем исследовании ГИС использовалась для отображения, анализа и обработки географических данных с учетом комплекса экономических, социальных и экологических критериев исследуемой территории.

Подход, принятый в текущем исследовании, оценивает все наборы данных, которые влияют на расположение морских ветровых электростанций. Эти наборы содержат следующие критерии:

1) Критерий скорости ветра (k_1), который напрямую связан с производством энергии и финансовой отдачей от инвестиций в области оффшорной ветроэнергетики. Он используется для оценки пространственной пригодности площадок ветровых электростанций, на которых среднегодовая скорость ветра, необходимая для эффективной работы турбин, должна составлять не менее 6 метров в секунду на высоте 100 метров [18, 19].

2) Индекс глубины воды (k_2), имеющий значительное техническое и экономическое значение, поскольку чем больше глубина воды, тем выше стоимость строительства, обслуживания, управления и передачи электроэнергии [20, 21].

3) Критерий охраняемых территорий (k_8), согласно которому морские ветровые электростанции должны располагаться вдали от аэропортов и военных объектов из-за помех, которые они создают для радиолокационных систем.

4) Критерий толщины морских отложений (k_5), который может сделать район непригодным для потенциальных инвестиций в морские ветровые электростанции, поскольку этот критерий значительно увеличивает стоимость создания проекта [22, 23].

5) Критерий удаленности от путей судоходства судов, включенных в глобальные оценки (k_4), которые были получены из карт перевозки грузов Европейской сети морского мониторинга.

6) Критерий удаленности от подводных коммуникационных кабелей (k_9).

Кроме того, следует учитывать социально-экономические параметры, которые включают:

1) близость к национальной электрической сети для преодоления дополнительных затрат, связанных с установкой новых линий электропередачи (K3) [20];

2) удаленность от туристических зон, поскольку это оказывает негативное визуальное и звуковое воздействие на морские туристические зоны (K7);

3) близость к гаваням для снижения затрат на установку и строительство морских ветряных электростанций (K6) [24, 25].

После сбора необходимых данных и сохранения их в базе критерии были разделены на две группы признаков: по ограничениям и факторам.

Ограничения помогают типизировать рассматриваемые альтернативы, позволяют удалить те регионы из набора регионов-кандидатов, которые не удовлетворяют требованиям. Ограничения представляются в виде логической карты. Исключенным из рассмотрения регионам присваивается признак 0, а тем, которые удовлетворяют условиям исследования, присваивается признак 1. Фактор — это критерий, который повышает или снижает степень пригодности конкретной альтернативы к рассматриваемым условиям (табл. 1) [26].

Таблица 1

Факторы, необходимые для размещения оффшорных ветровых электростанций [26]

Factors required for the location of offshore wind farms [26]

Кри-терий	Данные	Тип	Нечеткая функция	Запретный предел	Допусти-мый предел	Единица измерения (расстояние*)
K1	Скорость ветра	$\bar{\mu}$	Возрастание	4	8	м/с
K2	Глубина воды	$\underline{\mu}$	Убывание	500	20	м
K3	Электрическая сеть	$\underline{\mu}$	Убывание	50	30	км*
K5	Толщина отложений	$\underline{\mu}$	Убывание	3	2	м
K6	Порты	$\underline{\mu}$	Убывание	21	7	км*
K8	Охраняемые территории	$\underline{\mu}$	Возрастание	7	21	км*

Для преобразования данных факторов в нечеткие данные, используются нечеткие функции принадлежности, которые устанавливают степень принадлежности каждого элемента со значением в диапазоне от 0 до 1. Фазификацию, представляющую собой преобразование физических переменных в нечеткие множества и соответствующие им функции принадлежности, можно выполнить, используя множество возможных алгебраических формул для таких функций, как гауссовы, синусоидальные, сигмоидальные, непрерывные функции и т.д. Поскольку нечеткий процесс — это процесс разложения входных и/или выходных данных системы на одну или несколько нечетких групп, тригонометрические или трапециевидные функции принадлежности обычно предпочтительнее из-за простоты их математической обработки.

На рис. 2 представлена типичная трапециевидная функция принадлежности, которая будет использоваться в настоящей статье. Каждое нечеткое множество охватывает область входного (или выходного) значения, нанесенного на график

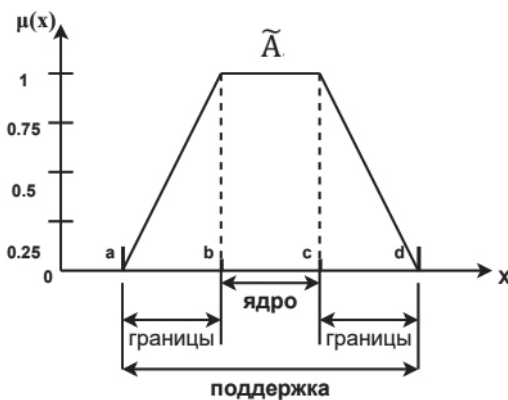


Рис. 2. Трапециевидная функция принадлежности.

Fig. 2. Trapezoidal membership function.

с принадлежностью. Любая данная запись из этой неоднозначной группы интерпретируется и рассчитывается оценка членства [27].

Представим простые и понятные математические уравнения, которые могут быть реализованы на любом языке программирования или в программном обеспечении ГИС, в следующем виде:

$$\bar{\mu}(x_i) = \begin{cases} 0, x_i < a_i \\ \frac{x_i - a_i}{b_i - c_i}, a_i \leq x_i \leq b_i, \\ 1, x_i > b_i \end{cases} \quad (1)$$

$$\underline{\mu}(x_i) = \begin{cases} 1, x_i < d_i \\ \frac{d_i - x_i}{d_i - c_i}, d_i \leq x_i \leq c_i, \\ 0, x_i > c_i \end{cases} \quad (2)$$

где $\bar{\mu}$ — нечеткая функция линейного роста, $\underline{\mu}$ — линейная убывающая нечеткая функция, x_i — индекс оценки пространственной пригодности морской ветряной электростанции, a_i, d_i — нижний порог (контрольная точка) индекса нечеткого множества ветроэлектростанции x_i , b_i, c_i — точки, за пределами которых другие точки полностью подходят к нечеткому множеству.

После подготовки функций принадлежности в соответствии с требуемыми классами критериев, которые варьируются от нуля до единицы, наступает этап придания веса критериям. В настоящем исследовании для определения весов использован нечеткий метод анализа иерархии (НМАИ). Метод анализа иерархий (МАИ) разработан Томасом Саати [28] в 1980 году. МАИ помогает лицам, принимающим решения, глубже изучить детали как объективных, так и субъективных аспектов проблемы. МАИ состоит из трёх основных этапов:

- 1) организация сложных проблем в виде иерархии целей, альтернатив и критериев оценки альтернатив;
- 2) взаимно однозначное сравнение альтернатив на каждом шаге иерархии по каждому критерию на предыдущем уровне;
- 3) построение матрицы принятия решений по нескольким уровням иерархии.

Основная проблема использования МАИ — это неопределенность, предвзятость и расплывчатость мнений экспертов. Особенности рассуждений человека можно учесть с помощью теории нечетких множеств, разработанной Заде [29].

Метод НМАИ в отличие от обычного метода МАИ [30, 31] использует концепции теории нечетких множеств и анализа иерархической структуры для более адекватного решения сложной задачи принятия решений и представляет собой применение МАИ в нечеткой области с использованием нечетких чисел вместо действительных чисел [32]. НМАИ объединяет теорию нечетких чисел с базовым аналитическим иерархическим процессом для решения проблем принятия решений. В НМАИ критерии сравниваются друг с другом попарно через

лингвистические переменные, которые могут быть представлены в виде «троек» чисел [33], как показано в табл. 2.

Таблица 2

Определение масштаба НМАИ
Scale definition F_АНР

Шкала АНР	Шкала (F-АНР)	Определение
1	(1 1 1)	Равное значение
3	(2 3 4)	Умеренная важность
5	(4 5 6)	Сильное значение
7	(6 7 8)	Очень большое значение
9	(9 9 9)	Чрезвычайная важность
2	(1 2 3)	Промежуточные значения
4	(3 4 5)	
6	(5 6 7)	
8	(7 8 9)	

Для НМАИ предпринимаются следующие основные шаги:

Шаг 1. Каждый критерий или альтернатива сравнивается с остальными элементами с помощью лингвистических терминов, как показано в табл. 1, и соответствующие нечеткие треугольные числа присваиваются в соответствии с этими лингвистическими терминами:

$$\tilde{A} = \tilde{d}_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & d_{12}^k & \dots & d_{1n}^k \\ d_{21}^k & 1 & \dots & d_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1}^k & d_{n2}^k & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Шаг 2. Среднее геометрическое FTN «z» [27] может быть оценено с помощью уравнения (4):

$$\tilde{z}_{ij} = \left[\prod_{j=1}^n \tilde{d}_{ij} \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Шаг 3. Относительные веса каждого критерия можно оценить как неоднозначное число, используя следующее уравнение:

$$\tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \oplus \left[\sum_{j=1}^n \tilde{z}_{ij} \right]^{-1} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) : l_{ij} \leq m_{ij} \leq u_{ij}; l_{ij}, m_{ij}, u_{ij} \in [1, 9]. \quad (5)$$

Шаг 4. До сих пор все веса критериев по-прежнему будут нечеткие треугольные числа, поэтому их необходимо дефаззифицировать с помощью метода центра области, предложенного Чоу и Чангом [34]:

$$A_i = \frac{l_i + m_i + u_i}{3}. \quad (6)$$

Шаг 5. Хотя на данном этапе A_i не является нечетким числом, все критерии должны быть нормализованы с помощью уравнения (7):

$$W_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}. \quad (7)$$

В настоящей статье вышеупомянутый пятиэтапный процесс использован для оценки нормализованных весов всех критериев. Чтобы прояснить методологию и увидеть возможности ее применения, рассмотрим реальный пример определения наиболее подходящего местоположения оффшорной ветровой электростанции на территории побережья Сирии.

Результаты исследования

Настоящее исследование проводилось с помощью программы ArcMap 10.6, основного компонента группы ArcGis от ESRI, которая используется для обработки, анализа и отображения геопространственных данных. Все слои данных, влияющих на размещение, установку и эксплуатацию МВЭ, были объединены на основе взвешенной линейной комбинации (ВЛК). Это позволило получить окончательную карту пригодности для морских ветровых электростанций.

Принятый подход позволил оценить все наборы данных, которые влияют на участки морских ветровых электростанций. Собранный набор данных состоит не только из ветровых ресурсов, но также включает социальные, экономические, экологические и технические параметры (туризм, глубина воды, толщина наносов, расстояние от электросети, удаленность от портов, удаленность от аэропортов, подводных кабелей, охраняемых территорий, судоходных путей, удаленность от туристических зон). Следует отметить, что в этом исследовании не оценивались два критерия: нефтяные платформы и связанные с ними трубопроводы, поскольку в особой экономической зоне Сирии нет нефтегазовых платформ и связанных с ними трубопроводов. Исходные данные для проведения настоящего исследования были собраны из источников, основанных на использовании данных дистанционного зондирования (табл. 3).

Таблица 3

Исходные данные и их источники

Data collection and sources

Критерий	Данные	Тип (Ф/О)	Источник
K1	Скорость ветра	Ф	Global Wind Atlas *
K2	Глубина воды	Ф	GEBCO_2022 Grid *
K3	Электрической сети	Ф	Каталог World Bank Data *
K4	Маршруты доставки	О	EMOD net Vessel Density *
K5	Толщина отложений	Ф	World Data Service for Geophysics [35]
K6	Порты	Ф	Данные Open Street Map *
K7	Туристические зоны	О	Данные Open Street Map *

Окончание табл. 3

Критерий	Данные	Тип (Ф/О)	Источник
К8	Охраняемые территории	Ф	Данные Open Street Map *
К9	Подводные телекоммуникационные кабели	О	Карта подводного кабеля *

* — электронный ресурс.

Второй шаг исследования включает преобразование факторов в нечеткие данные. Этот шаг выполняется для облегчения чтения данных, хранящихся в матричной форме, путем замены исходных значений нечеткими значениями. После применения нечеткой логики были сформированы слои, содержащие элементы со значениями от нуля до единицы (рис. 3). В следующей таблице представлены соотношения, которые используются для преобразования данных в категории нечётких множеств (табл. 4).

Таблица 4

Функции нечеткой принадлежности используемых критериев
Fuzzy membership functions of the criteria used

Критерий	Нечеткая функция	Критерий	Нечеткая функция
К1 (м/с)	$\bar{\mu}(x_i) = \begin{cases} 0, x < 4 \\ \frac{x-4}{4}, 4 \leq x \leq 8 \\ 1, x > 8 \end{cases}$	К2 (м)	$\underline{\mu}(x) = \begin{cases} 1, x < 20 \\ \frac{500-x}{480}, 20 \leq x_i \leq 500 \\ 0, x > 500 \end{cases}$
К8 (км)	$\bar{\mu}(x) = \begin{cases} 0, x < 7 \\ \frac{x_i-7}{14}, 7 \leq x \leq 21 \\ 1, x > 21 \end{cases}$	К3 (км)	$\underline{\mu}(x) = \begin{cases} 1, x < 30 \\ \frac{50-x}{20}, 30 \leq x_i \leq 50 \\ 0, x > 50 \end{cases}$
		К5 (км)	$\underline{\mu}(x) = \begin{cases} 1, x < 2,5 \\ \frac{3-x}{0,5}, 2,5 \leq x_i \leq 3 \\ 0, x > 3 \end{cases}$
		К6 (км)	$\underline{\mu}(x) = \begin{cases} 1, x < 1,5 \\ \frac{25-x}{23,5}, 1,5 \leq x_i \leq 25 \\ 0, x > 25 \end{cases}$

Для ограничений был применен логический метод с целью преобразования значения внутри ячеек слоя в значения, принимающие одно из двух значений (0 — для значений, не удовлетворяющих условию, 1 — для значений, удовлетворяющего условию), как показано в табл. 5 и на рис. 4.

Определение ограничений и лимиты
Constraints definition and limitation

Ограничения	0	1
K4	Линии, как показано на рис. 5	другой
K7	Области, как показано на рис. 5	другой
K9	Линии, как показано на рис. 5	другой

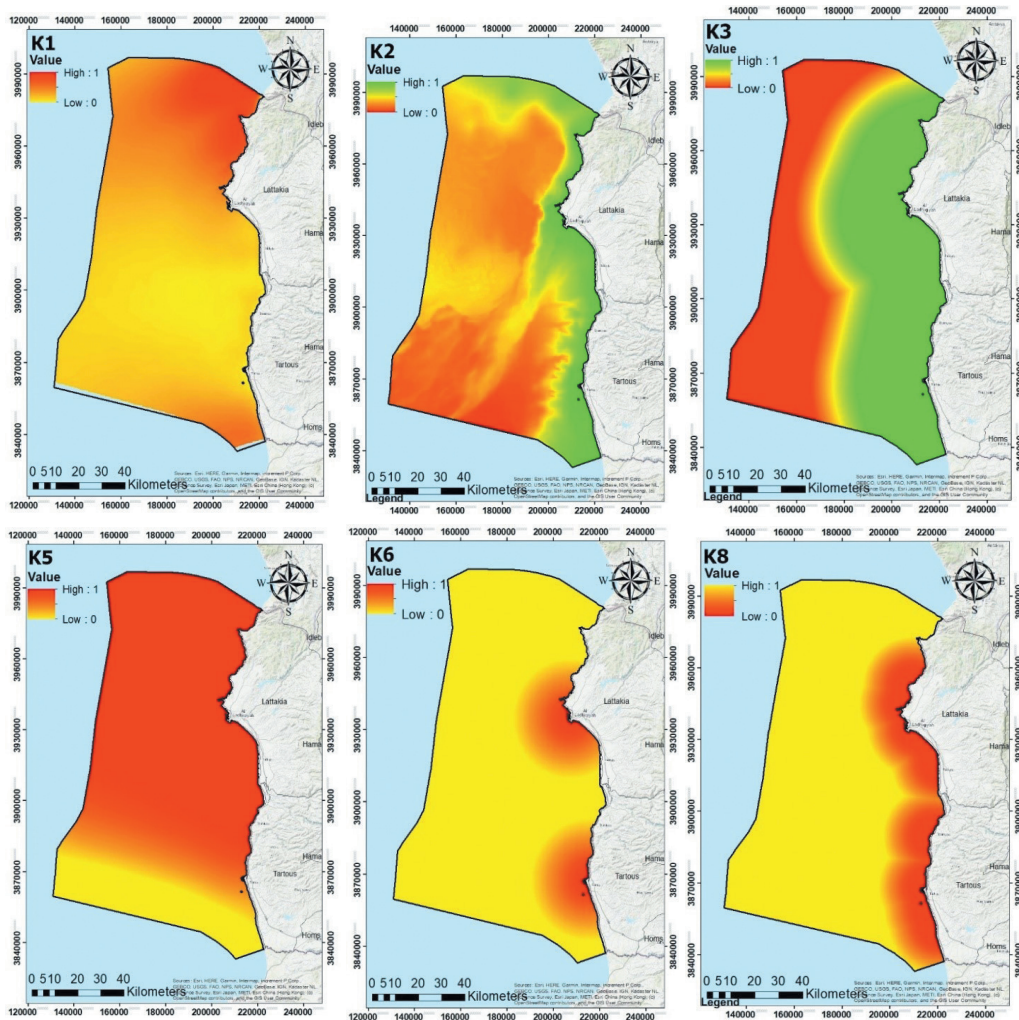


Рис. 3. Слои, полученные в результате применения нечетких функций принадлежности.

Fig. 3. Layers obtained as a result of applying fuzzy membership functions.

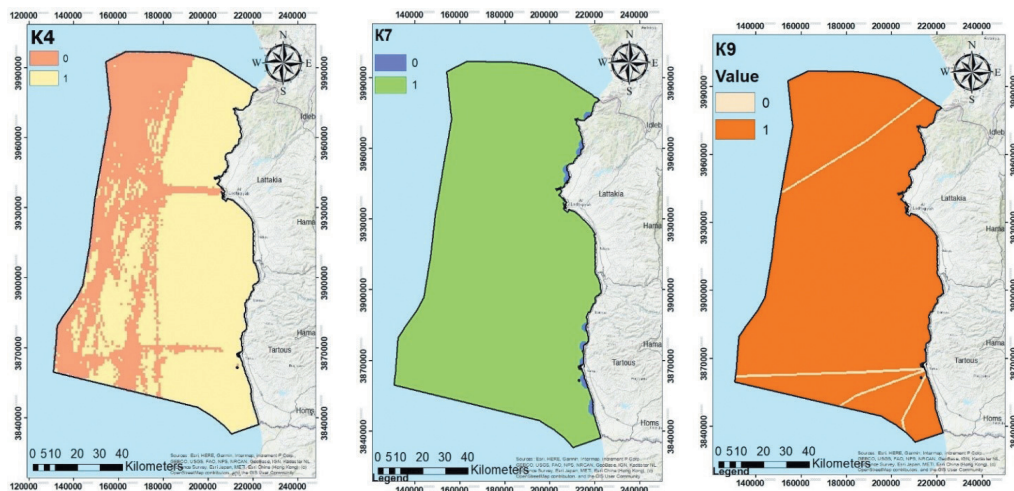


Рис. 4. Карты распределения пригодности оценочных показателей (0 — непригодные, 1 — наиболее подходящие места для развития офшорной ветроэнергетики).

Fig. 4. Assessment indicator suitability distribution maps (0 — unsuitable, 1 — most suitable locations for offshore wind development).

В табл. 6 учитывается важность различных шкал, присвоенных «интенсивности важности» для определения влияния между парами. Например, коэффициенту плотности ветровой энергии был присвоен балл 3 по сравнению с 1/3, присвоенным коэффициенту глубины, так как последний составляет около 1/3 общей стоимости проекта и в соответствии с правилами попарного сравнения (см. табл. 2).

Таблица 6

Нечеткие сравнения по каждому критерию
Fuzzy comparisons for each criterion

	K1	K2	K3	K5	K6	K8
K1	1,1,1	2,3,4	4,5,6	5,6,7	6,7,8	9,9,9
K2	1/4,1/3,1/2	1,1,1	2,3,4	1,2,3	4,5,6	5,6,7
K3	1/6,1/5,1/4	1/4,1/3,1/2	1,1,1	4,5,6	5,6,7	6,7,8
K5	1/7,1/6,1/5	1/3,1/2,1	1/6,1/5,1/4	1,1,1	5,6,7	7,8,9
K6	1/8,1/7,1/6	1/6,1/5,1/4	1/7,1/6,1/5	1/7,1/6,1/5	1,1,1	4,5,6
K8	1/9,1/9,1/9	1/7,1/6,1/5	1/8,1/7,1/6	1/9,1/8,1/7	1/6,1/5,1/4	1,1,1

На последнем этапе нечеткие веса преобразуются в относительные нечеткие веса (A_i) путем получения среднего значения нечетких чисел (l , m и u) для каждого критерия. Затем, используя нечеткие веса, т.е. значения A_i , вычисляется нормализованный вес W_i каждого критерия (табл. 7).

Окончательный относительный вес для каждого критерия

Final relative weight for each criterion

Шсi	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>Ai</i>	<i>Wi</i>
C1	0,3223	0,5564	0,6221	0,4671	0,4468
C2	0,1345	0,2215	0,3262	0,2237	0,2142
C3	0,1287	0,2414	0,2423	0,1756	0,1681
C4	0,0732	0,1124	0,1572	0,1112	0,1065
C5	0,0363	0,0435	0,0642	0,0427	0,0428
C6	0,0254	0,0224	0,0291	0,0284	0,0215

Используя тематические слои критериев и команды программного обеспечения, ГИС (евклидово расстояние, уклон, пространственный анализ, пересечение, стирание и буферы), были получены глобальные тематические растровые слои карты пригодности береговой ветровой электростанции. Карты пригодности были подготовлены, в которых каждое местоположение было масштабировано от 0 до 1; где 0 — наименее подходящие участки, а 1 — наиболее подходящие участки для развития морских ветряных электростанций.

Большинство подходящих мест находится на северо-востоке сирийских территориальных вод (рис. 5), что обусловлено большой скоростью ветра, малой

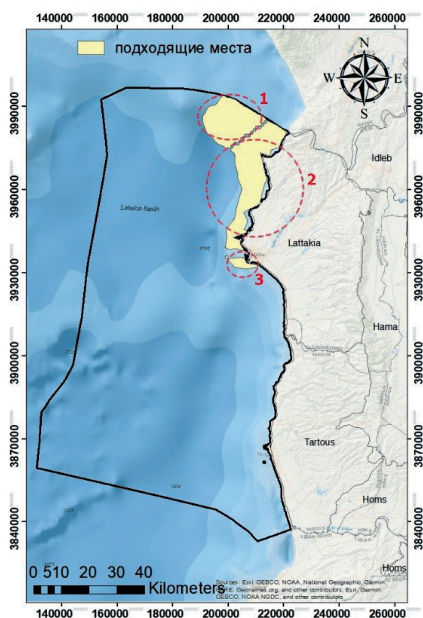


Рис. 5. Окончательная карта пригодности для морской ветроэнергетики в Сирии.

Fig. 5. Final suitability map for offshore wind power in Syria.

глубиной воды и малой мощностью морских отложений. Эти территории обведены на рис. 5 красным цветом. Теоретический ветровой потенциал можно рассчитать с помощью уравнения (8), используя генерирующую мощность ветровой турбины, диаметр ротора и площадь общего количества пикселей для наиболее подходящих областей (табл. 8) [41]:

$$S = R_d^2 \times L_d \times L_c, \quad (8)$$

где S — расстояние между массивами морских ветровых турбин, R_d^2 — диаметр ротора, L_d — фактор расстояния по ветру, L_c — фактор расстояния при боковом ветре.

Таблица 8

Теоретический потенциал ветровой энергии
Theoretical potential of wind energy

	Модель ветряной турбины	Диаметр ротора, м	Мощность, МВт	Площадь, км ²	Количество турбин	Расчетная мощность, МВт
Красный круг 1	WD2,5—103	103	2,5	252,60	476	1190,49
Красный круг 2				388,92	733	1832,96
Красный круг 3				25,46	48	120,009
Всего				666,98	1257	3,14 ГВт

Для уменьшения турбулентных помех между турбинами оптимальное расстояние между ними должно быть в 5—10 раз больше диаметра ротора. Типичный диаметр турбины мощностью 2,5 МВт составляет 103 метра, а технические характеристики турбины соответствуют отчету сирийского производителя ветровых турбин. Таким образом, коэффициент расхождения равен 0,53 квадратных километров. Один квадратный километр морской воды может содержать примерно 5,3 мегаватта установленной мощности. Мощность подходящих регионов оценивается примерно в 3,14 ГВт.

Заключение

В статье решена задача определения наиболее подходящих мест для размещения морских ветровых турбин в сирийских территориальных водах. В исследовании учитывались имеющиеся ветровые ресурсы, существующие виды использования морского пространства и экологические ограничения, а также эксплуатационные потребности ветровой электростанции.

Показано важное значение для экологической устойчивости и экономической жизнеспособности проектов ветровых установок с учетом возможностей разрешения конфликтов между пользователями морского пространства на этапе планирования. Это позволило рационально использовать прибрежное пространство. Была подчеркнута полезность результатов настоящего исследования на основе ГИС для задачи планирования устойчивого морского ветра. Метод представляет собой простой вспомогательный инструмент для лиц, принимающих решения. Заинтересованные стороны могут расставить приоритеты в своей деятельности

с учетом конкретных технических, экологических и социальных, экономических ограничений. Кроме того, метод позволяет достаточно быстро реализовать новые сценарии.

Будущие рекомендации по совершенствованию этого инструмента и процесса принятия решений включают добавление дополнительных модулей для динамического включения и исключения альтернативных решений, различных подходов и агрегирования индивидуальных оценок для получения группового решения. Внедрение НМАИ может помочь в ранжировании местоположений, и упростить систему с точки зрения ее удобства для пользователя и способствовать более широкому участию в процессе принятия решений.

Список литературы

1. Noori M., Kucukvar M., Tatari O. Economic input-output based sustainability analysis of onshore and offshore wind energy systems // *International Journal of Green Energy*. 2015. Vol. 12. P. 939—948. doi: 10.1080/15435075.2014.890103.
2. Waewsak J., Landry M., Gagnon Y. Offshore wind power potential of the Gulf of Thailand // *Renewable Energy*. 2015. Vol. 81. P. 609—626. doi: 10.1016/j.renene.2015.03.069.
3. Argin M., Volkan Y. Offshore wind power potential of the Black Sea region in Turkey // *International Journal of Green Energy*. 2017. Vol. 14. P. 811—818. doi: 10.1080/15435075.2017.1331443.
4. Sun X., Huang D. An explosive growth of wind power in China // *International Journal of Green Energy*. 2014. Vol. 11. P. 849—860. doi: 10.1080/15435075.2013.830261.
5. Christoforaki M., Tsoutsos T. Sustainable siting of an offshore wind park a case in Chania, Crete // *Renew Energy*. 2017. Vol. 109. P. 624—633. doi: 10.1016/j.renene.2017.03.063.
6. Keivanpour S., Ramudhin A., Kadi D. The sustainable worldwide offshore wind energy potential: a systematic review // *Renew Sustain Energy*. 2017. Vol. 6. P. 1—18. doi: 10.1063/1.5009948.
7. Cameron L. R., Veum K. C., Hekkenberg M., et al. Delivering offshore electricity to the EU: spatial planning of offshore renewable energies and electricity grid infrastructures in an integrated EU maritime policy. *European Wind Energy Association*. 2012. 42 p.
8. Künneke R., Mehos D. C., Hillerbrand R., Hemmes K. Understanding values embedded in offshore wind energy systems: toward a purposeful institutional and technological design // *Environmental Science & Policy*. 2015. Vol. 53. P. 118—129. doi: 10.1016/j.envsci.2015.06.013.
9. Diaz H., Fonseca R. B., Guedes S. C. Site selection process for floating offshore wind farms in Madeira Islands // *Advances in renewable energies offshore*. 2019. № 134. P. 729—737.
10. Baban M. J., Parry T. Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK // *Renewable energy*. 2001. Vol. 24. P. 59—71. doi: 10.1016/S0960-1481(00)00169-5.
11. Istomin E. P., Burlov V. G., Abramov V. M., Sokolov A. G. et al. decision support model within environmental economics // *International Multi-disciplinary Scientific GeoConference SGEM*. 2019. P. 139—146.
12. Kim T., Park J. Il., Maeng J. Offshore wind farm site selection study around Jeju Island, South Korea // *Renewable energy*. 2016. Vol. 94. P. 619—628. doi: 10.1016/j.renene.2016.03.083.
13. James R., Costa Ros M. Floating offshore wind: market and technology review // *The Carbon Trust*. United Kingdom. 2015. 66 P.
14. Burlov V. G. The methodological basis for solving the problems of information warfare and security protection // *Proceedings of the 13th International Conference on Cyber Warfare and Security*. 2018. P. 64—74.
15. Abramov V. M., Burlov V. G., Istomin E. P., et al. geo-information and geo-ecological support tools development for environmental economics / *Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA*. 2019. P. 7053—7061.
16. Burlov V. G. The Methodological Basis for the Management of social media / *Proceedings of the 5th European Conference on social media, ECSM 2018*. 2018. P. 22—30.

17. Солиман Х., Бурлов В. Г., Украинцева Д. А. Использование нечеткой логики в среде ГИС для выбора местоположения ветряных электростанций, на примере провинции Хомс, Сирия // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2022. № 11(125). С. 82. doi: 10.23670/IRJ.2022.125.17.
18. Holland G. B., Provenzano J. J. The hydrogen age: empowering a clean-energy future // Gibbs Smith. Layton, Utah, 2007. 76 p.
19. Gorayeb A., Brannstrom C., de Andrade M., de Sousa M. J. Wind power gone bad: Critiquing wind power planning processes in northeastern Brazil // *Energy research & social science*. 2018. Vol. 94. P. 82—88. doi: 10.1016/j.erss.2017.11.027.
20. Vasileiou M., Eva L., Dimitra G. V. GIS-based multi-criteria decision analysis for site selection of hybrid offshore wind and wave energy systems in Greece // *Renewable and sustainable energy reviews*. 2017. V. 73. P. 745—757. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.161.
21. Chaouachi A., Catalin F. C., Mircea A. Multi-criteria selection of offshore wind farms: Case study for the Baltic States // *Energy Policy*. 2017. V.103. P. 179—192. doi: 10.1016/j.enpol.2017.01.018.
22. Byrnes M. Assessing potential environmental impacts of offshore sand and gravel mining // *Final Report to the Commonwealth of Massachusetts, Executive Office of Environmental Affairs, Coastal Zone Management*. 2000. 15 p.
23. Taoufik M., Ahmed F. GIS-based multi-criteria analysis of offshore wind farm development in Morocco // *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 11. P. 100103. doi: 10.1016/j.ecmx.2021.100103.
24. Huang J., Huang X., Song N., et al. Evaluation of the Spatial Suitability of Offshore Wind Farm—A Case Study of the Sea Area of Liaoning Province // *Sustainability*. 2022. №14(1). P. 449. doi: 10.3390/su14010449.
25. Cavazzi S., Dutton A. G. An Offshore Wind Energy Geographic Information System (OWE-GIS) for assessment of the UK's offshore wind energy potential // *Renewable Energy*. 2016. Vol. 87. P. 212—228. doi: 10.1016/j.renene.2015.09.021.
26. Eastman J., Ronald H. J., James T. Multi-criteria and multi-objective decision making for land allocation using GIS // *Multicriteria analysis for land-use management*. Springer, Dordrecht. 1998. Vol. 9. P. 227—251. doi: 10.1007/978-94-015-9058-7_13.
27. Buckley J. J. Fuzzy Hierarchical Analysis // *Fuzzy Sets and Systems*. 1985. Vol. 17. P. 233—247.
28. Saaty, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process // *Interfaces*. 1994. № 24(6). P. 19—43. doi: 10.1016/0377-2217(90)90057-I.
29. Zadeh L. A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility // *Information and Control*. 1965. Vol. 8. P. 3—28. doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
30. Ruoning X., Xiaoyan Z. Extensions of the analytic hierarchy process in fuzzy environment // *Fuzzy Sets Syst*. 1992. № 52 (3). P. 251—257. doi: 10.1016/0165-0114(92)90236-W.
31. Cheng C. H. Evaluating naval tactical missile systems by fuzzy AHP based on the grade value of membership function // *European journal of operational research*. 1997. № 96(2). P. 343—350. doi: 10.1016/S0377-2217(96)00026-4.
32. Petkovic J., Sevarac Z., Jaksic M. L., Marinkovic S. Application of fuzzy AHP method for choosing a technology within service company // *Technics technologies education management-TTEM*. 2012. № 7(1). P. 332—341.
33. Kilinc O., Onal S A. Fuzzy AHP approach for supplier selection in a washing machine company // *Expert system with Applications*. 2011. № 38(8). P. 9656—9664. doi: 10.1016/j.eswa.2011.01.159.
34. Chou S. W., Chang Y. C. The implementation factors that influence the ERP (enterprise resource planning) benefits // *Decision support systems*. 2008. № 46(1). P. 149—157. doi: 10.1016/j.dss.2008.06.003.
35. Straume E.O., Gaina C., Medvedev S., et al. Updated total sediment thickness in the world's oceans. *Geochem Geophys* 2019; 20(4). P. 56—72. doi: 10.1029/2018GC008115.

References

1. Noori M., Kucukvar M., Tatari O. Economic input-output based sustainability analysis of onshore and offshore wind energy systems. *International Journal of Green Energy*. 2015;(12):939—948. doi: 10.1080/15435075.2014.890103.
2. Waewsak J., Landry M., Gagnon Y. Offshore wind power potential of the Gulf of Thailand. *Renewable Energy*. 2015;(81):609—626. doi: 10.1016/j.renene.2015.03.069.

3. Argin M., Volkan Y. Offshore wind power potential of the Black Sea region in Turkey. *International Journal of Green Energy*. 2017;(14):811—818. doi: 10.1080/15435075.2017.1331443.
4. Sun X., Huang D. An explosive growth of wind power in China. *International Journal of Green Energy*. 2014;(11):849—860. doi: 10.1080/15435075.2013.830261.
5. Christoforaki M., Tsoutsos T. Sustainable siting of an offshore wind park a case in Chania, Crete. *Renew Energy*. 2017;(109): 624—633. doi: 10.1016/j.renene.2017.03.063.
6. Keivanpour S., Ramudhin A., Kadi D. The sustainable worldwide offshore wind energy potential: a systematic review. *Renew Sustain Energy*. 2017;(6):1—18. doi: 10.1063/1.5009948.
7. Cameron L. R., Veum K. C., Hekkenberg M., et al. Delivering offshore electricity to the EU: spatial planning of offshore renewable energies and electricity grid infrastructures in an integrated EU maritime policy. European Wind Energy Association. 2012: 42 p.
8. Künneke R., Mehos D. C., Hillerbrand R., Hemmes K. Understanding values embedded in offshore wind energy systems: toward a purposeful institutional and technological design. *Environmental Science & Policy*. 2015; (53):118—129. doi: 10.1016/j.envsci.2015.06.013.
9. Diaz H., Fonseca R. B., Guedes S. C. Site selection process for floating offshore wind farms in Madeira Islands. *Advances in renewable energies offshore*, 2019;(134): 729—737.
10. Baban M. J., Parry T. Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK. *Renewable energy*. 2001;(24):59—71. doi: 10.1016/S0960-1481(00)00169-5.
11. Istomin E. P., Burlov V. G., Abramov V. M., Sokolov A. G. et al. Decision support model within environmental economics. *International Multi-disciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 2019: 139—146.
12. Kim T., Park J. Il., Maeng J. Offshore wind farm site selection study around Jeju Island, South Korea. *Renewable energy*. 2016;(94):619—628. doi: 10.1016/j.renene.2016.03.083.
13. James R., Costa Ros M. Floating offshore wind: market and technology review. *The Carbon Trust. United Kingdom*. 2015: 66 p.
14. Burlov V. G. The methodological basis for solving the problems of information warfare and security protection. *Proceedings of the 13th International Conference on Cyber Warfare and Security*. 2018: 64—74.
15. Abramov V. M., Burlov V. G., Istomin E. P., et al. Geo-information and geo-ecological support tools development for environmental economics. *Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA*, 2019:7053—7061.
16. Burlov V. G. The Methodological Basis for the Management of social media. *Proceedings of the 5th European Conference on social media, ECSM*. 2018. 2018: 22—30.
17. Soliman H., Burlov V. G., Ukrainitseva D. A. Using fuzzy logic in a GIS environment to select the location of wind farms, in the territory of the province of Homs, Syria. *International research journal*. 2022;11(125):82. doi: 10.23670/IRJ.2022.125.17. (In Russ.).
18. Holland G. B., Provenzano J. J. *The hydrogen age: empowering a clean-energy future*. Gibbs Smith. Layton, Utah. 2007: 76 p.
19. Gorayeb A., Brannstrom C., de Andrade M., de Sousa M. J. Wind power gone bad: Critiquing wind power planning processes in northeastern Brazil. *Energy research & social science*. 2018;(94):82—88. doi: 10.1016/j.erss.2017.11.027.
20. Vasileiou M., Eva L., Dimitra G. V. GIS-based multi-criteria decision analysis for site selection of hybrid offshore wind and wave energy systems in Greece. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2017;(73):745—757. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.161.
21. Chaouachi A., Catalin F. C., Mircea A. Multi-criteria selection of offshore wind farms: Case study for the Baltic States. *Energy Policy*. 2017;(103):179—192. doi: 10.1016/j.enpol.2017.01.018.
22. Byrnes M. Assessing potential environmental impacts of offshore sand and gravel mining. *Final Report to the Commonwealth of Massachusetts, Executive Office of Environmental Affairs, Coastal Zone Management*. 2000: 15 p.
23. Taoufik M., Ahmed F. GIS-based multi-criteria analysis of offshore wind farm development in Morocco. *Energy Conversion and Management*. 2021;(11):100103. doi: 10.1016/j.ecmx.2021.100103.
24. Huang J., Huang X., Song N., et al. Evaluation of the Spatial Suitability of Offshore Wind Farm—A Case Study of the Sea Area of Liaoning Province. *Sustainability*. 2022;14(1):449. doi: 10.3390/su14010449.
25. Cavazzi S., Dutton A. G. *An Offshore Wind Energy Geographic Information System (OWE-GIS) for assessment of the UK's offshore wind energy potential*. 2016: 212—228. doi: 10.1016/j.renene.2015.09.021.

26. Eastman J., Ronald H. J., James T. Multi-criteria and multi-objective decision making for land allocation using GIS. *Multicriteria analysis for land-use management*. Springer. Dordrecht. 1998;(9):227—251. doi: 10.1007/978-94-015-9058-7_13.
27. Buckley J. J. Fuzzy Hierarchical Analysis. *Fuzzy Sets and Systems*. 1985:233—247.
28. Saaty, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *Interfaces*. 1994:19—43. doi: 10.1016/0377-2217(90)90057-I.
29. Zadeh L. A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Information and Control*. 1965;(8):3—28. doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
30. Ruoning X., Xiaoyan Z. Extensions of the analytic hierarchy process in fuzzy environment. *Fuzzy Sets Syst*. 1992;52 (3):251—257. doi: 10.1016/0165-0114(92)90236-W.
31. Cheng C. H. Evaluating naval tactical missile systems by fuzzy AHP based on the grade value of membership function. *European journal of operational research*. 1997;96(2):343—350. doi: 10.1016/S0377-2217(96)00026-4.
32. Petkovic J., Sevarac Z., Jaksic M. L., Marinkovic S. Application of fuzzy AHP method for choosing a technology within service company. *Technics technologies education management-TTEM*. 2012;7(1): 332—341.
33. Kilincci O., Onal S A. Fuzzy AHP approach for supplier selection in a washing machine company. *Expert system with Applications*. 2011;38(8):9656—9664. doi: 10.1016/j.eswa.2011.01.159.
34. Chou S. W., Chang Y. C. The implementation factors that influence the ERP (enterprise resource planning) benefits. *Decision support systems*. 2008;46(1):149—157. doi: 10.1016/j.dss.2008.06.003.
35. Straume E.O., Gaina C., Medvedev S., et al. Updated total sediment thickness in the world's oceans. *Geochem Geophys* 2019;20(4):56—72. doi: 10.1029/2018GC008115.

Информация об авторах

Вячеслав Георгиевич Бурлов, доктор технических наук, профессор, Российский государственный гидрометеорологический университет, burlovvg@mail.ru.

Хасан Солиман, аспирант Российского государственного гидрометеорологического университета, hassansoliman2233@gmail.com.

Дарья Андреевна Карпенкова (Украинцева), студент, Российский государственный гидрометеорологический университет, ukrainceva2000@yandex.ru.

Анастасия Алексеевна Домостроева, аспирант Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, adomostroeva@mail.ru.

Information about authors

Vyacheslav Georgievich Burlov, Grand PhD (Tech. Sci), Professor, Russian State Hydrometeorological University, burlovvg@mail.ru.

Hasan Soliman, student PhD, Russian State Hydrometeorological University, hassansoliman2233@gmail.com.

Daria Andreevna Karpenkova (Ukrainceva), Student, Russian State Hydrometeorological University, ukrainceva2000@yandex.ru.

Anastasiia Alekseevna Domostroeva, post-graduate, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, adomostroeva@mail.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 22.03.2023

Принята к печати после доработки 09.08.2023

The article was received on 22.03.2023

The article was accepted after revision on 09.08.2023

УДК 910.4(091)(092)

**Иван Фёдорович Крузенштерн (1770—1846):
мореплаватель и ученый**

Эльвира Рамилевна Еникеева, Яна Владимировна Бубнова

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

Аннотация. Данная статья приурочена к 220-летию первого русского кругосветного путешествия на кораблях «Надежда» и «Нева» под командованием И. Ф. Крузенштерна и Ю. Ф. Лисянского. Приводятся сведения из биографии российского адмирала Ивана Федоровича Крузенштерна, раскрывается его роль в организации и проведении знаменитого кругосветного плавания 1803—1806 гг.

Ключевые слова: кругосветное путешествие, Курильская островная гряда, Аляска, Камчатка, Сахалин, Тихий океан.

Введение

В 2023 году исполняется 220 лет с начала первого русского кругосветного путешествия, проходившего под командованием Ивана Федоровича Крузенштерна и Юрия Федоровича Лисянского. Во время плавания было сделано множество открытий и наблюдений, которые повлияли на развитие не только российской, но и мировой науки. Неудивительно, что имя И. Ф. Крузенштерна осталось навсегда в истории. Хотя руководили плаванием и И. Ф. Крузенштерн, и Ю. Ф. Лисянский, настоящая статья посвящена только Ивану Федоровичу Крузенштерну, так как именно он был инициатором совершенного в 1803—1806 гг. путешествия. Роль Ю. Ф. Лисянского в описываемом путешествии является предметом отдельного исследования.

В данной статье авторы приводят подробные сведения из биографии И. Ф. Крузенштерна, которые дают возможность проследить путь его становления как отважного капитана, возглавившего кругосветное путешествие, и одного из самых образованных людей своего времени. О мореплавателе написано достаточное количество исследований, в которых в основном говорится о кругосветной экспедиции без изучения раннего этапа жизни Ивана Федоровича Крузенштерна, хотя его детские и юношеские годы объясняют, как сформировался сильный характер инициатора и руководителя первого русского кругосветного путешествия. В качестве примера мы можем привести исследование В. М. Пасецкого «Иван Федорович Крузенштерн», в котором рассматривается жизнь и деятельность Крузенштерна как исследователя, «раздвинувшего пределы науки» [1]. Другим примером может служить очерк Е. Л. Штейнберга «И. Ф. Крузенштерн,

Ю. Ф. Лисянский», в котором биография Крузенштерна подробно освещается только с начала учебы в кадетском корпусе [2]. Таким образом, несмотря на обилие исследований, тема до конца не изучена.

Страницы биографии И. Ф. Крузенштерна

Иван Фёдорович Крузенштерн — российский мореплаватель и адмирал — родился 19 ноября 1770 года. При рождении ему дали имя Адам Иоганн. Он был сыном судьи Иоганна Фридриха фон Крузенштерна, происходившего из обрусевших остзейских дворян [3], и Христины Фредерики, урожденной фон Толь. Род Крузенштернов не был богат, даже каменный особняк, в котором жила семья Иоганна и Христины, был построен на деньги из приданого последней [4].

Будущий адмирал родился в родовом имении Хагудис недалеко от эстонского города Рапла. До двенадцати лет Адам Иоганн учился в церковной школе в Ревеле (сейчас Таллинн), после чего поступил в Морской кадетский корпус в Кронштадте [5]. В детстве Адам Иоганн был ребенком крайне слабого здоровья, в кадетском корпусе его считали «застенчивым и неуклюжим». Повзрослев, он порадовал всех своей великолепной атлетической формой [6]. Во время учебы в Морском кадетском корпусе он сменил имя и стал Иваном Фёдоровичем. Есть несколько версий. Говорят, отчество он позаимствовал у закадычного друга, Юрия Федоровича Лисянского, с которым они, уже став взрослыми, совершат кругосветное плавание. С Лисянским Крузенштерн сблизился с пятилетнего учебного плавания на корпусном судне [7]. По другой версии, это русифицированный вариант второго имени отца Крузенштерна.

Стоит отметить, что склонность к учению у И. Ф. Крузенштерна была с детских лет. Он уже в школьные годы говорил на нескольких иностранных языках (английском, французском, немецком), которые считал «ключом в большой мир», а после окончания Морского корпуса самостоятельно выучил латынь, по его мнению, «важную для научных изысканий» [6]. Русский язык будущий адмирал изучал в Кронштадте.

В 1788 году началась война со шведами, и восемнадцатилетний мичман был вынужден сразу же принять боевое крещение [3]. В Русско-шведскую войну 1788—1790 гг. он служил на 74-пушечном корабле «Мстислав» под командованием Григория Ивановича Муловского, который когда-то хотел возглавить Первую русскую кругосветную экспедицию, задуманную еще Екатериной II. Будущий адмирал принимал участие в знаменитом Гогландском сражении, затем — в Эландском сражении, а в 1790 году, в морских боях при Ревеле, Красной Горке и в Выборгской бухте. В 19 лет он был произведен в лейтенанты [8].

13 августа 1790 года война со Швецией закончилась. Три последующих года И. Ф. Крузенштерн и Ю. Ф. Лисянский несли службу на Балтийском флоте. В 1793 году в числе лучших молодых флотских офицеров они были отправлены на стажировку в Англию [4], где в течение шести лет И. Ф. Крузенштерн набирался опыта у лучших моряков мира, успел побывать в Северной Америке, Индии, Китае, познакомиться со многими выдающимися личностями. Существует

легенда, что при обороне форта Святого Лаврентия его корабль «Thetis» потерпел крушение и по предложению самого Джорджа Вашингтона Крузенштерн некоторое время служил на американском флоте [9]. Крузенштерн и Лисянский были зачислены на суда эскадры контрадмирала Джорджа Мэррея и отправились в Северную Америку. И. Ф. Крузенштерн шел на фрегате «Тетис», а Ю. Ф. Лисянский — на «Луазо» [7].

В 1799 году в Россию вернулся опытный капитан И. Ф. Крузенштерн, который сразу предложил императору провести исследовательскую кругосветную экспедицию. Он на деле хотел доказать, что транспортировка пушнины и других ценностей с берегов Русской Америки в Россию по морю намного быстрее и дешевле, чем по суше через Сибирь. К сожалению, Павла I проект не заинтересовал. [6]. Через три года его сын Александр I принял решение о реализации плана кругосветного путешествия [10, 11]. Финансовую поддержку путешествия оказала Российско-Американская компания, пайщиком в которой стал Александр I [10, 11].

В 1811 году Крузенштерн был назначен на пост инспектора классов Морского кадетского корпуса [3]. Он оказывал помощь в подготовке последующих кругосветных путешествий: экспедициям О. Е. Коцебу в 1815—1818 году, Ф. Беллинсгаузена — М. П. Лазарева в 1819—1821 гг. и М. Н. Станюковича — Ф. П. Литке в 1826—1829 гг.

В 1827 году Крузенштерн стал директором Морского кадетского корпуса. Благодаря ему в структуре Морского кадетского корпуса появились офицерские классы, положившие начало Военно-морской Академии. Крузенштерну же Морской кадетский корпус обязан своим музеем. Незадолго до смерти, в 1845 году, прославленный адмирал стал одним из основателей Императорского Русского географического общества [3].

Умер Иван Федорович Крузенштерн 24 августа 1846 года в своем имени Асе в возрасте 75 лет и был похоронен в Домском соборе Таллина. Его дело продолжил сын, Павел Иванович, а потом и внук, Павел Павлович. Они оба стали известными путешественниками, занимались исследованиями северо-восточных берегов Азии, Каролинских и иных островов Печерского края, а также обского Севера.

Кругосветная экспедиция 1803—1806 гг.

Экспедиция, вошедшая в историю отечественного мореплавания как первое русское кругосветное путешествие, состояла всего из двух кораблей «Надежда» и «Нева» [11]. И. Ф. Крузенштерн командовал более вместительной (450 тонн) «Надеждой», Ю. Ф. Лисянский — «Невой» (370 тонн) [7]. Главной целью экспедиции было изучение возможностей транспортного сообщения между Европейской Россией и Русской Америкой.

Адмиралтейство настаивало на том, чтобы принять в состав команд иностранных матросов, но Крузенштерн и Лисянский сумели отстоять соотечественников. И. Ф. Крузенштерн вспоминал: «Мне советовали принять несколько и

иностранных матросов, но я, зная преимущественные свойства российских, коих даже и английским предпочитаю, совету сему последовать не согласился» [3]. Единственными иностранцами, участвовавшими в плаванье, были ученые, приглашенные из-за границы: швейцарский астроном Горнер, немецкие естествоиспытатели и медики Тилезиус, Либанд, Лангсдорф. Из русских ученых в экспедицию был включен только ботаник Бринкин [7].

Известно, что Крузенштерн был очень гуманным капитаном. По воспоминаниям современников, никто из жителей открытых в той экспедиции земель не был ущемлен в своих правах, а на кораблях, которыми командовал И. Ф. Крузенштерн, не допускались физические наказания. Иван Федорович любил собак. В экспедициях его сопровождал верный спаниель, который стал любимцем команды. У моряков даже появился ритуал: почесать за ухом у спаниеля, чтобы плавание прошло удачно. Ходили слухи, что дикари, никогда не видевшие животных с такими длинными ушами, в ужасе разбежались, увидев лучшего друга капитана [4].

Плавание началось 7 августа 1803 года. Отплытие состоялось из Кронштадта. Люди приходили поглазеть на диковинное зрелище, но не верили в успех предприятия [7]. Сначала корабли дошли до Копенгагена, после этого через Англию на Канарские острова. Затем путь пролегал через Атлантический океан в Бразилию. 3 марта 1804 года они обогнули мыс Горн и добрались до острова Пасхи, а также Маркизских островов, после чего корабли достигли Сандвичевых островов. Далее по маршруту шла первая «российская» точка — Петропавловск-Камчатский. Оттуда экспедиция шла в Японию, потом на Сахалин, побывала на островах Ситка и Кадьяк, после чего корабли двинулись в Китай. В виду того, что важнейшей целью экспедиции было изучение транспортного сообщения по морю, они изучали экономику и политику Китая. В феврале 1806 года путешественники покинули Китай, собрав огромный по объему материал по теме внешней торговли Поднебесной. Далее маршрут проходил через Южно-Китайское море, мимо Индонезии, через Индийский океан, мыс Доброй Надежды, а уже оттуда — в Европу [7].

По пути обратно корабли миновали остров Святой Елены, мыс Доброй Надежды, Азорские острова.

Важной деталью является то, что маршрут двух кораблей не совпадал полностью: суда разделились на Гавайских островах. «Нева» отправилась на остров Кадьяк, где им пришлось провести 14 месяцев, приняв участие в русско-глинхитской войне, а «Надежда» — на Камчатку и Японию.

Сразу же по прибытии на Камчатку Крузенштерн выгрузил взятый в Японии груз соли и риса. «Надежда» вернулась к Сахалину для обстоятельного описания этого острова через две недели. Корабль Крузенштерна вновь посетил Курильскую гряду и через пролив Надежды вышел к мысу Терпения на Сахалине. Наконец, обследование восточного побережья было завершено, и «Надежда» вышла в Амурский лиман, обогнув северный край острова [7]. Крузенштерн планировал затем пройти к устью Амура, но это ему не удалось, так как чем ближе они подходили к берегу, тем меньше становилась глубина. Мореплаватель не стал рисковать и повернул назад. Предполагают, что из-за этого Крузенштерн посчитал, что Сахалин — это полуостров, который соединяется с материком. Потребовалось сорок

три года, чтобы данное утверждение опроверг русский мореплаватель Геннадий Иванович Невельской, открыв устье Амура и Татарский пролив, который полностью отделяет остров Сахалин от восточноазиатского побережья [7]. Затем Крузенштерн вернулся на Камчатку для небольшого ремонта судна.

В начале апреля 1806 года экспедиция приблизилась к побережью Южной Африки, и несколько дней спустя корабли потеряли друг друга из виду из-за густого тумана.

В августе 1806 года «Нева», а затем — «Надежда» возвратились в Россию через 3 года и 12 дней после начала плавания.

Во время кругосветного путешествия русские корабли впервые в истории пересекли экватор. Как гласит легенда, они отпраздновали это событие, согласно традиции, с участием Нептуна. Это происходило так: матрос, изображавший повелителя морей, спросил у Крузенштерна, для чего он прибыл сюда со своими кораблями, ведь ранее российский флаг в этих местах не видели. На что Крузенштерн ответил: «Для славы науки и Отечества нашего!» [15].

Следует отметить, что научным исследованиям во время экспедиции уделялось значительное внимание. Именно во время кругосветного плавания впервые в истории были проведены профессиональные метеорологические исследования, сохранившие свое научное значение и в наши дни [10]. Без Крузенштерна не было бы современной метеорологии и океанологии. Нынешняя метеорология во многом опирается на наблюдения за изменением Мирового океана. Сейчас погоду предсказывают 4 тысячи специальных буйков. Они работают в толще океанической воды, всплывают, чтобы передать данные на спутник, и снова возвращаются к подводным исследованиям. Океанологическая экспедиция Крузенштерна на парусных шлюпах «Нева» и «Надежда» измеряла температуру глубинных слоев моря на уровне 400 метров. Первые русские океанологи изучали течения, их направления и силу. Велись и магнитные наблюдения. Мореплаватели следили за приливами и отливами, давлением атмосферы [2].

Во время всего путешествия проводилось изучение течений, их направления и силы. Были значительно исправлены географические карты; проводились глубоководные исследования Мирового океана (измерение температуры на разных глубинах, определение солёности и удельного веса воды, скорости течений и т.п.). Командой было нанесено на карту западное побережье Японии, южная часть и восточный берег Сахалина, исследована часть Курильской островной гряды; установлен новый путь к русским владениям на Камчатке и Аляске. Крузенштерн не только открыл и провел съемки многих островов, описал часть северо-западного побережья Тихого океана, составил первый атлас этого океана, но и стал одним из основоположников океанологических исследований. Экспедиция собрала огромнейшие ботанические, зоологические, этнографические коллекции, провела огромное число астрономических наблюдений. Матросы старались помочь научным изысканиям, ловили обезьян, попугаев, даже принесли на борт «Надежды» крокодила [7]. В итоге все основные задачи кругосветной экспедиции были выполнены. 19 августа 1806 года кругосветное плавание закончилось в Кронштадте.

Император Александр I наградил И. Ф. Крузенштерна и его подчиненных. Все офицеры получили следующие чины, командиры — ордена св. Владимира 3 степени и по 3000 руб., лейтенанты — по 1000, а мичманы — по 800 рублей пожизненного пенсионера. Нижние чины уволены в отставку и награждены пенсионом от 50 до 75 рублей. По высочайшему повелению была выбита особая медаль для всех участников этого первого кругосветного путешествия [5, 9]. За научные же заслуги И. Ф. Крузенштерна в 1806 году избрали почетным членом Академии наук.

По возвращении Крузенштерн получил бессрочный отпуск и продолжил исследовательскую деятельность. Он занялся созданием атласов с приложением гидрографических записок под заглавием: «Собрание сочинений служащих разбором и изъяснением Атласа Южного моря» и приступил к подробному описанию плавания, систематизировал результаты своих исследований и наблюдений. Его карты поражают детализацией и точностью. Следует отметить, что он подписался как «Капитан Крузенштерн», а не по имени-отчеству [12, 13, 14]. Иллюстративный материал для «Атласа к путешествию вокруг света», изданный отдельным томом, был создан при Морской типографии [13].

Заключение

На основании проведенного исследования можно прийти к выводу, что первое российское кругосветное плавание положило начало и создало великолепный фундамент для новой отрасли географической науки — океанографии; написанные по материалам экспедиции работы по гидрографии и картографии Мирового океана оказали огромное влияние на современников и на становление всемирного землеведения [1]. Многие из исследований И. Ф. Крузенштерн проводил лично.

Результатами исследований экспедиции, которые внесли значительный вклад не только в географию, но и в ряд других наук, стали:

— географические открытия в бассейне Тихого океана [15], в том числе описания острова Кадьяк в заливе Аляска и открытие острова Крузова, а также ранее неизвестных островов: острова Лисянского, четырех островов Ловушки, рифа Крузенштерна и рифа Нева [16]; открытие Северного залива;

— открытие Экваториального (Межпассатного) противотечения в Атлантике и Тихом океане [16];

— исправление и дополнение географических карт, в том числе нанесение на карту западного побережья Японии, южной части и восточного берега Сахалина и удаление с карт некоторых островов, которых в реальности не существует;

— изучение экономики, политики и культуры других стран, сбор обширного материала о племенах Маркизских и Гавайских островов, Аляски, Кадьяка, японцев и южных китайцев [7];

— выяснение причины свечения моря — явления биологического происхождения, при котором поверхностные слои моря или океана наполняются способными к биолюминесценции микроорганизмами [16];

— проведение первых в истории профессиональных метеорологических исследований, сохранившие свое научное значение и в наши дни [10];

— проведение измерения температуры воды на глубинах до 400 метров и определения её удельного веса, прозрачности, цвета;

— изучение течений, их направлений и силы, сбор данных о приливах и отливах в различных районах Мирового океана. Русским исследователям удалось исправить ошибки в описаниях западноевропейских путешественников XVIII века, а также открыть неизвестные на тот момент морские течения, в том числе экваториальные противотечения в Атлантическом и Тихом океанах [7, 16].

В заключение отметим, что память о великом русском мореплавателе хранят и географические карты — в его честь названы пролив в северной части Курильских островов, проход между островом Цусима и островами Ики и Окиносима в Корейском проливе, острова в Беринговом проливе и архипелаге Туамоту, гора на Новой Земле. А еще его имя носит барк «Крузенштерн» — учебное парусное судно, ледокол, и самолет авиакомпании «Аэрофлот».

В Санкт-Петербурге на набережной Невы в 1870 году установлен памятник знаменитому адмиралу Ивану Федоровичу Крузенштерну. С этим памятником у курсантов Морского корпуса связано множество традиций. Так, курсанты перед выпуском надевают тельняшку на памятник, считая, что так им открывается путь в море.

Список литературы

1. Пасецкий В.М. Иван Фёдорович Крузенштерн. М.: Наука, 1974. 176 с.
2. РИА Новости. Кругосветный вояж Крузенштерна: география, экономика, политика, туризм. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ria.ru/20101119/222899670.html> (дата обращения: 02.03.2023).
3. Крузенштерн Э. Иван Крузенштерн. Мореплаватель, обогнувший Землю / Пер. с нем. О. Калиновской. М.: Paulsen, 2020. 304 с.
4. Seppelt E. Adam Johann von Krusenstern: Ein Porträt über den ersten russischen Weltumsegler Anfang des 19. Jahrhunderts: [нем.]. Rostock: BS — Verlag — Rostock, 2009. 138 p.
5. Bernhardt Theodor von. Der Weltumsegler Admiral v. Krusenstern // Vermischte Schriften. — Berlin: Verlag von G. Reimer, 1879. Bd. 1. p. 1—56.
6. Главный исторический портал страны. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://histrf.ru/read/articles/dvadsat-piat-intieriesnykh-faktov-iz-zhizni-i-f-kruzienshtierna> (дата обращения: 01.03.2023)
7. Штейнберг Е. Л. И. Ф. Крузенштерн, Ю. Ф. Лисянский. М.: Географиз, 1950. 40 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://elib.rgo.ru/handle/123456789/236043> (дата обращения 02.03.2023).
8. Невский В. В. Первое путешествие россиян вокруг света / Под ред. А.Д. Добровольского. М.: Географиз, 1951. 271 с.
9. Иванян Э. А. Энциклопедия российско-американских отношений. XVIII—XX века. М.: Международные отношения, 2001. 696 с.
10. Герман К. История и статистическое описание российского флота // Статистический журнал. 1806. Т. I, № 2. С. 72.
11. Санкт-Петербург: 300+300 биографий / Под ред. Г. Гопиенко. Биографический словарь. М. (СПб): Маркграф (ОАО «Иван Фёдоров»), 2004. С. 318.
12. Крузенштерн И. Ф. Атлас Южного моря, сочиненный контр-адмиралом Крузенштерном [Атлас]: в 2 ч. Ч. 2. Северное полушарие / И. Ф. Крузенштерн. СПб, 1826. 61 с.

13. Крузенштерн И. Ф. Атлас к путешествию вокруг света капитана Крузенштерна [Изоматериал]. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://elib.rgo.ru/handle/123456789/51503> (дата обращения: 05.03.2023).
14. Крузенштерн И. Ф. Атлас к путешествию вокруг света капитана Крузенштерна [Карты]. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://elib.rgo.ru/handle/123456789/51502> (дата обращения: 05.03.2023)
15. Ратманов М. И. Первая русская кругосветная экспедиция (1803—1806) в дневниках Макара Ратманова / Под ред. М. Н. Луньковский. СПб: Крива, 2015. 568 с.
16. Магидович И. П., Магидович В. И. Первые русские кругосветные плавания // Очерки по истории географических открытий. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Просвещение, 1985. Т. 4: Географические открытия и исследования нового времени (XIX — начало XX в.). С. 15—19.

References

1. Pasetky V. M. *Ivan Fedorovich Krusenstern*. M.: Nauka, 1974: 176 p. (In Russ).
2. RIA News. *Krugosvetnyy voyazh Krusensterna: geografiya, ekonomika, politika, turizm*. = *The circumnavigation voyage of Krusenstern: geography, economics, politics, tourism*. RIA Novosti. Elektronical resource: <https://ria.ru/20101119/222899670.html> (accessed 02.03.2023). (In Russ).
3. Krusenstern E. *Ivan Krusenstern. Moreplavatel, obognuvshiy Zemliu = Ivan Krusenstern. The navigator who circumnavigated the Earth*. / Transl. from germ. O. Kalinovskaya. M.: Paulsen, 2020: 304 p. (In Russ).
4. Seppelt E. *Adam Johann von Krusenstern: Ein Porträt über den ersten russischen Weltumsegler Anfang des 19. Jahrhunderts*: (In German). — Rostock : BS — Verlag-Rostock, 2009: 138 p.
5. Bernhardi Theodor von. *Der Weltumsegler Admiral v. Krusenstern // Vermischte Schriften*: Berlin: Verlag von G. Reimer, 1879. Bd. 1: 1–56 p. (In German).
6. *Glavniy istoricheskiy portal strany*. = *The main historical country portal*. Elektronical resource: <https://histrf.ru/read/articles/dvadsat-piat-intieriesnykh-faktov-iz-zhizni-i-f-kruzienshtierna> (accessed 01.03.2023). (In Russ).
7. Shteinberg E. I. *F. Krusenstern, U. F. Lisyansky / E. L. Shteinberg*; In edition by A. I. Solov'ev. M.: Geographgiz, 1950: 40 p. : pic., maps. Elektronical resource: <https://elib.rgo.ru/handle/123456789/236043> (accessed 02.03.2023). (In Russ).
8. Nevskiy V. V. *Pervoe puteshestvie rossian vokrug sveta*. = *The first journey of Russians around the World*. / In edition by d.g.s. A. D. Dobrovolcky. M.: Geographgiz, 1951: 271 p. (In Russ).
9. *Ivanyan E. A. Enciklopedia rossiysko-amerikanskih otnosheniy. XVIII-XX veka*. = *Encyclopedia of Russian-American Relations. XVIII-XX. M.: International relations*. 2001: 696 p. (In Russ).
10. German K. The history and statistic description of the Russian fleet. *Istoria I statisticheskoe opisaniye rossiyskogo flota // Statistic journal*. — 1806. — T. I, № 2:72 p. (In Russ).
11. *Saint-Petersburg: 300+300 biographies = Sankt-Peterburg: 300+300 biographiy* / In edition by G. Gopienko. -biographical dictionary. M. (SPb.): Marcgraph (OAO «Ivan Fedorov»), 2004: 318 p.
12. Krusenstern I. F. *Atlas Yuzhnogo morya, sochinenniy kontr-admiralom Krusensternom [Atlas]: v 2 ch. Ch. 2. Severnoye polusharie*. = *Atlas of the South Sea composed by Rear Admiral Krusenstern [Atlas]: in 2 p. Part 2. Nothern Hemisphere*. Saint-Petersburg: 1826: 61 p. (In Russ).
13. Krusenstern I. F. *Atlas k puteshestviu vokrug sveta kapitana Krusensterna [Isomaterial] = The atlas to travel around the world for the captain Krusenstern [Isomaterial]*. Elektronical resource: <https://elib.rgo.ru/handle/123456789/51503> (accessed 05.03.2023). (In Russ).
14. Krusenstern I. F. *Atlas k puteshestviu vokrug sveta kapitana Krusensterna [Karty] = The atlas to travel around the world for the captain Krusenstern [Maps]*. Elektronical resource: <https://elib.rgo.ru/handle/123456789/51502> (accessed 05.03.2023). (In Russ).
15. Ratmanov M. I. *Pervaya russkaya krugosvetnaya ekspeditcy (1803—1806) v dnevnika Makara Ratmanova = The first Russian circumnavigation expedition (1803—1806) in Makar Ratmanov's diaries*. / Main editor M. N. Lun'kovsky. SPb : Kriga, 2015: 568 p. (In Russ).
16. Magidovich I. P., Magidovich V. I. Chapter 1. The first Russians circumnavigations. Pervye russkie krugosvetnye plavaniya. // *Essays on the history of geographical discoveries*. — The 3-th, changed and

aug. — М. : Prosveshchenie, 1985. — Т. 4: Geographical discoveries and research of modern times (XIX — beginning of the XX c.). P. 15—19. (In Russ).

Сведения об авторах

Эльвира Рамилевна Еникеева, студентка Российского государственного гидрометеорологического университета, elvira_yenikeyeva@mail.ru

Яна Владимировна Бубнова, старший преподаватель кафедры социально-гуманитарных наук Российского государственного гидрометеорологического университета, bubayana1979@mail.ru.

Information about the authors

Elvira Ramilevna Yenikeyeva, 3rd year student Russian State Hydrometeorological University, elvira_yenikeyeva@mail.ru

Yana Vladimirovna Bubnova, Senior Lecturer of the Department of Social and Humanitarian Sciences of the Russian State Hydrometeorological University, bubayana1979@mail.ru.

Статья поступила 25.03.2023

Принята к печати после доработки 21.07.2023

The article was received on 25.03.2023

The article was accepted after revision on 21.07.2023

К 75-летию Валерия Николаевича Малинина

«Зарплата профессора — милостыня от правительства»
«Всему хорошему во мне как преподавателю я обязан
плохим студентам»

В. Минин

В августе 2023 года исполнилось 75 лет главному редактору журнала «Гидрометеорология и экология», доктору географических наук, профессору, академику РАН Валерию Николаевичу Малинину. Научно-педагогические заслуги В. Н. Малинина хорошо известны. Он автор десяти монографий и более 250 статей. В течение многих лет он был руководителем грантов Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), Министерства образования и науки РФ, Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга, хоздоговорных



В. Н. Малинин в телестудии перед эфиром

проектов ведущих отраслевых институтов. Кроме того, В. Н. Малинин является руководителем ведущей научно-педагогической школы Санкт-Петербурга «Взаимодействие океана и атмосферы и изменения климата». Признанием его заслуг стало присуждение в 2016 году звания лауреата премии Правительства Санкт-Петербурга имени М. И. Будыко в области географии, наук об атмосфере и гидросфере за выдающиеся достижения в науке и технике.

Много внимания и усилий Валерий Николаевич уделяет учебной работе и подготовке специалистов высшей квалификации. Им подготовлено девять учебников и учебных пособий, в том числе на вьетнамском языке. Фундаментальный учебник «Гидросфера Земли», являющийся по сути энциклопедией о природной воде, удостоен диплома на конкурсе «300-летию города — 300 лучших учебников». Он был председателем диссертационного совета по океанологии и гидрологии, под его руководством в последние годы защищено семь диссертаций.

Валерий Николаевич — член редколлегии журнала «Ученые записки РГГМУ» (с 2020 года «Гидрометеорология и экология») с момента издания в 2005 году его первого номера. В апреле 2015 года он единогласно избран на Ученом совете главным редактором. Несомненная заслуга Валерия Николаевича — высокий уровень научно-теоретического журнала «Ученые записки РГГМУ». Благодаря его научному авторитету, организаторским и редакторским способностям, журнал имел высокий рейтинг. Так, по данным научной библиотеки elibrary.ru, по числу просмотров за год он является лидером в городе среди журналов родственного профиля, входящих в Перечень ВАК. Высокая популярность журнала напрямую связана с его возросшим научным уровнем, который обусловлен тем, что авторы статей являются докторами и кандидатами наук, российскими и зарубежными учеными с мировым именем, в том числе академиками и членами-корреспондентами РАН.

В 2019 году стало очевидно, что для дальнейшего развития журнала необходимо его реформирование, которое включает переименование журнала; реформатирование редколлегии и редсовета журнала с привлечением ученых, в том числе зарубежных, имеющих высокие показатели публикационной активности; улучшение сайта журнала в соответствии с международными требованиями; проведение политики открытого доступа и выполнение ряда организационных мероприятий. Несмотря на объективные трудности, главный редактор обеспечивает дальнейшее поступательное развитие журнала. Так, в системе Science index по направлению «Геофизика» журнал находится на 17 месте, а по направлению «Экология» — на 11 месте. Позади остались многие известные журналы, в том числе входящие в базу Scopus.

Стоит также отметить, что В.Н. Малинин занимает активную жизненную позицию, уделяя много времени общественной деятельности. В течение многих лет он был заместителем председателя общественной организации «Профессорское Собрание Санкт-Петербурга» и внес большой вклад в аналитическую разработку и реализацию программных документов развития отечественной науки. В настоящее время он является модератором секции «Науки о Земле» Российского профессорского собрания.

Как истинный профессор Валерий Николаевич имеет широкий круг интересов, в том числе любовь к художественному слову. В качестве эксперта он является частым гостем различных телевизионных каналов и СМИ, где выступает с развернутыми комментариями по актуальным проблемам современной науки, а за пределами научного мира известен под псевдонимом В. Минин как автор афоризмов и других литературных произведений.

Искренне желаем Вам крепкого здоровья, творческой активности, успехов в продвижении журнала и отстаивании научных идей в интересах России.

Члены редколлегии журнала

К 85-летию Георгия Георгиевича Щукина



В августе 2023 г. отметил свое 85-летие ведущий российский ученый в области дистанционного зондирования и радиометеорологии Георгий Георгиевич Щукин, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, заслуженный деятель науки Российской Федерации и Кабардино-Балкарской республики, профессор Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского.

После окончания в 1961 г. радиотехнического факультета Ленинградского института точной механики и оптики в течение 50 лет работал в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (м.н.с, с.н.с, зав. отделом радиометеорологических исследований, зам. директора ГГО, директор филиала ГГО Научно-исследовательского центра дистанционного зондирования атмосферы).

Г. Г. Щукин внес крупный вклад в развитие радиометеорологии. При его непосредственном участии была создана сеть штормоповещения об опасных явлениях погоды, связанных с облаками (ливень, гроза, град, смерч) на базе метеорологических радиолокаторов МРЛ-2 и МРЛ-5 для обеспечения оперативной информацией различных отраслей народного хозяйства и, прежде всего, — метеобеспечения авиации. Г. Г. Щукин является основателем и руководителем нового научного направления — комплексного пассивно-активного радиолокационного зондирования окружающей среды (методов активной радиолокации и радиотеплолокации). Данный метод получил широкое применение в работах по контролю активных воздействий на метеорологические процессы, проведенных на Полевой экспериментальной базе (ПЭБ) в Ленинградской области, которая была организована под его руководством и непосредственном участии для обеспечения проведения активных воздействий на облака с целью регулирования грозовой

(молниевой) активности и контроля их результатов. Под руководством Г. Г. Щукина проведена серия работ в области активных воздействий на облака с целью создания благоприятных погодных условий в различных регионах России и за рубежом. Наиболее ответственными были работы в дни празднования 300-летия г. Санкт-Петербурга. За успешное их проведение Указом Президента РФ был награжден медалью «В память 300-летия Санкт-Петербурга». Под научно-методическим руководством и непосредственном участии Г. Г. Щукина с 2006 г. ведутся работы в области метеорологического обеспечения пусков ракет космического назначения (РКН) на космодромах Байконур и Восточный.

Г. Г. Щукин успешно сочетает научную деятельность с подготовкой научно-педагогических кадров. Является руководителем научной школы «Дистанционное зондирование атмосферы» (ВНШ-45 МО РФ). Им подготовлено 10 докторов и 23 кандидата наук, опубликовано более 500 научных работ, включая 10 монографий. Он председатель Северо-Западного отделения Научного совета РАН по комплексной проблеме «Распространение радиоволн» и председатель секции «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы». Является членом 3-х докторских диссертационных советов и 4 редколлегий научных журналов.

Г. Г. Щукин более 25 лет успешно сотрудничает с Российским государственным гидрометеорологическим университетом. Он много лет проработал профессором на кафедре экспериментальной физики атмосферы, а будучи директором филиала ГГО Научно-исследовательского центра дистанционного зондирования атмосферы обеспечивал прохождение учебной практики студентами РГГМУ в поселке Воейково. Он являлся председателем государственных аттестационных комиссий РГГМУ по приему выпускных работ студентом метеорологического факультета, а в настоящее время является членом Диссертационного совета Д 1.6.18 по присуждению кандидатских и докторских степеней в области метеорологии и активным членом редколлегии научно-теоретического журнала «Гидрометеорология и экология».

За успехи в научно-производственной деятельности Г. Г. Щукин награжден орденом «Знак Почета», медалью «Ветеран труда», знаком «Почетный работник Гидрометслужбы России», ему присвоено почетное звание «Заслуженный метеоролог РФ». Он лауреат научной премии губернатора Ленинградской области и Санкт-Петербургского научного центра РАН за заслуги в области дистанционного зондирования атмосферы и радиолокации.

От всей души поздравляем проф. Г. Г. Щукина со славным юбилеем. Желаем Вам, дорогой Георгий Георгиевич, крепкого здоровья, творческого долголетия, больших успехов в развитии научного потенциала нашей Родины, в том числе в подготовке ученых высшей квалификации.

*Редколлегия,
коллеги и ученики*

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 72

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Технический редактор М.В. Иванова

Подписано в печать 02.10.2023. Выход в свет 12.10.2023. Формат 70×100 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,275. Тираж 50 экз. Заказ № 1446. Цена свободная.
Адрес издателя, редакции и типографии: РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет
