

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 75

Научно-теоретический журнал

Издается с октября 2005 года
Выходит 4 раза в год

ISSN 2713-3001

Санкт-Петербург
РГГМУ
2024

УДК 001(051.2)«540.1»
ББК 72я5

Гидрометеорология и экология. № 75. Научно-теоретический журнал. Санкт-Петербург : РГТМУ, 2024. 152 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 РГТМУ — *председатель совета*

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

Леонтьев Д. В., канд. юрид. наук, проректор по развитию РГТМУ, 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 РГТМУ (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 РГТМУ; **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.; **Шапрон Б.**, PhD, ведущий ученый Института морских исследований IFREMER (Франция); **Щукин Г. Г.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Якушев Д. И.**, д-р техн. наук, проф. СПбУ МВД РФ.

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

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

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГТМУ), 2024

© Авторы публикаций, 2024

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

№ 75

A theoretical research journal

Published since October, 2005
4 issues a year

ISSN 2713-3001

St. Petersburg
RSHU
2024

UDC 001(051.2)«540.1»
LBC 72я5

Hydrometeorology and Ecology. No. 75. St. Petersburg : RSHU Publishers, 2024. 152 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; **Proshutinski A. Iu.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, USA; **Repina I. A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Rumyantsev V. A.**, Grand PhD in Geography, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences; **Ryabchenko V. A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Smyshlyaev S. P.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Timofeev Iu. M.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Shapron B.**, PhD, leading scientist of French Research Institute for Exploitation of the Sea IFREMER (France); **Shchukin G. G.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Vilfand R. M.**, Grand PhD in Engineering, Professor; **Vuglinsky V. S.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Zinoviev A. T.**, Grand PhD in Engineering Sciences; **Yakushev D. I.**, Grand PhD in Engineering, Professor; SPU MI.

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

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

Certificate III № 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, has category K2 and the environment is indexed in the CrossRef and RSCI systems and is included in the "Russian Science Citation Index" (RSCI) database, placed on the National Electronic Library platform (<http://elibrary.ru>). Full-text versions of published articles as pdf-files are posted on the Internet for free access on the Journal's website <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/> immediately after its publication, afterwards being available on the National electronic library website (<http://elibrary.ru>).

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

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

© Russian State Hydrometeorological University (RSHU), 2024
© Authors of publications, 2024

Содержание

Геофизика

- Б. Г. Шерстюков, А. Б. Шерстюков.* Космос и тектоника Земли как регуляторы выхода эндогенного тепла в океан 207
- К. Н. Пустовалов, П. М. Нагорский, М. В. Оглезнева, А. А. Сат, С. В. Смирнов.* Сравнительный анализ изменчивости невозмущённого электрического поля в горных и степных ландшафтах на юге Сибири по данным экспедиционных измерений. 234

Метеорология

- К. А. Диденко, Б. А. Бикбулатов, Т. С. Ермакова, А. В. Коваль.* Исследование волновых процессов во время сложных внезапных стратосферных потеплений 251
- Р. Ю. Игнатов, А. В. Частухин, А. М. Петрунин.* Применение прогностической модели атмосферы при проведении работ по активным воздействиям на облака 269

Океанология

- Д. Х. Мартина-Васкес, С. М. Гордеева, В. Н. Малинин.* Изменчивость индекса апвеллинга в области Перуанского течения. 280

Экология. Обзор

- В. В. Дмитриев, В. Ю. Третьяков, Д. С. Зырянова, А. А. Овсеян, С. Ю. Почепко, А. В. Немчинова, М. О. Каспин.* Оценка экологического статуса водоемов на основе построения композитных индексов: методика, результаты, перспективы 293

Экология

- Ю. С. Даценко, В. В. Пуклаков.* Многолетние изменения балансов химических веществ в Можайском водохранилище 310
- Г. Т. Фруммин, Е. С. Негодина.* Обоснование показателей качества воды по содержанию металлов в Онежском озере 318

Гидрология. В порядке дискуссии

- М. А. Науменко, В. В. Гузиватый.* Связаны ли параметры устойчивой плотностной стратификации с температурой поверхности Ладожского озера? 328

Хроника

- Всероссийская научно-практическая конференция «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития». . . 345
- Памяти Артура Николаевича Чилингарова 349

Contents

Geophysics

- B. G. Sherstyukov, A. B. Sherstiukov.* Space and tectonics of the Earth as regulators of the release of Earth internal heat into the World Ocean 207
- K. N. Pustovalov, P. M. Nagorskiy, M. V. Oglezneva, A. A. Sat, S. V. Smirnov.* Variability of the undisturbed electric field and the factors influencing it in mountain and steppe landscapes in southern Siberia based on the expedition study 234

Meteorology

- K. A. Didenko, B. A. Bikbulatov, T. S. Ermakova, A. V. Koval.* Investigation of wave processes during complex sudden stratospheric warmings. 251
- R. Yu. Ignatov, A. V. Chastukhin, A. M. Petrunin.* Application of a predictive atmospheric model during work on active influences on clouds 269

Oceanology

- J. J. Martina-Vasquez, S. M. Gordeeva, V. N. Malinin.* Variability of the upwelling index in the Peruvian Current region 280

Ecology. Review

- V. V. Dmitriev, V. Yu. Tretiakov, D. S. Zyryanova, A. A. Ovsepyan, S. Yu. Pochevko, A. V. Nemchinova, M. O. Kaspin.* Assessment of the ecological status of reservoirs based on the construction of composite indices: methodology, results, prospects Article title 293

Ecology

- Yu. S. Datsenko, V. V. Puklakov.* Long-term changes of chemical balances in the Mozhask reservoir. 310
- G. T. Frumin, E. S. Negodina.* Justification of water quality indicators for metal content in Lake Onega 318

Hydrology. Discussion

- M. A. Naumenko, V. V. Guzivaty.* Are the parameters of stable density stratification related to the surface temperature of Lake Ladoga? 328

- Chronicle** 345

Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 207—233.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(75):207—233.

ГЕОФИЗИКА

Научная статья
УДК 551.463.6:551.2:551.583
doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-207-233

Космос и тектоника Земли как регуляторы выхода эндогенного тепла в океан

Борис Георгиевич Шерстюков, Артем Борисович Шерстюков

Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации-Мировой центр данных,
г. Обнинск, Российская Федерация, boris_sher@mail.ru

Аннотация. Выполнен корреляционный анализ изменений температуры воды вблизи океанского дна с динамическими возмущениями Земли, возникающими в результате неравномерного бароцентрического вращения Солнечной системы. Обнаружена связь выхода эндогенного тепла Земли в Мировой океан преимущественно вблизи границ литосферных плит, горячих точек и островов вулканического происхождения. Активизация выхода эндогенного тепла в океан регулируется небесной механикой. Солнечная радиация не является единственным источником тепла в климатической системе.

Ключевые слова: изменения климата, океан, климатическая система, температура, эндогенное тепло, вулканы, землетрясения.

Для цитирования: Шерстюков Б. Г., Шерстюков А. Б. Космос и тектоника Земли как регуляторы выхода эндогенного тепла в океан // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 207—233. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-207-233.

GEOPHYSICS

Original article

Space and tectonics of the Earth as regulators of the release of Earth internal heat into the World Ocean

Boris G. Sherstyukov, Artem B. Sherstiukov

All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information–World Data Center,
Obninsk, Russian Federation, boris_sher@mail.ru

Summary. The modern hypothesis about the cause of global climate warming does not take into account that active processes with heat release occur in the mantle of the Earth, capable of participating in the thermal balance of the climate system. With the activation of volcanic activity, the output of internal heat from the mantle to the surface of the earth's crust increases. Most volcanoes are located in the world's

oceans, tracking them is difficult, but necessary. A hypothesis is proposed about the activation of the release of the internal heat of the planet Earth into the World Ocean as a result of disturbances of the upper layer of the Earth's mantle (Low Velocity Zone) with the participation of the Earth in the barycentric rotation of the Solar System. The total moment of inertia of the barycentric rotation of the Sun and four large planets (Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune) is proposed as an index of Earth disturbances. Heat outputs from the Earth's mantle into the ocean were analyzed by changes in water temperature at the ocean floor in nodes of the $1 \times 1^\circ$ geographical grid of the World Ocean for 1960—2022.

The correlation coefficients between the proposed planetary barycentric rotation index and changes in water temperature near the ocean floor in the nodes of the geographical grid of the World Ocean are calculated. For nodes with significant correlation coefficients, the locations of temperature changes under the influence of disturbances from barycentric rotation were recorded on the map. It was found that with increased external influence, the outputs of the Earth's endogenous heat into the World Ocean increased mainly near the boundaries of lithospheric plates in spreading and subduction zones, near hot spots and near islands of volcanic origin. Activation of the release of endogenous heat into the ocean is regulated by celestial mechanics through the mechanism of activation of volcanic activity. In the Pacific Ocean, under the control of the cosmic factor, the outputs of internal heat into the ocean are found along the entire ring of fire in the west, north and east of the Pacific Ocean. In the Atlantic Ocean, the most extensive area of close connections between the water temperature at the ocean floor and the barycentric rotation index turned out to be the area that begins in the Drake Strait and continues into the Weddell Sea at the junction of the Pacific, South American and Antarctic lithospheric plates. In the Indian Ocean, areas with endogenous heat outputs have been found on the border of the African and Indo-Australian plates, on the border of the Indo-Australian and Eurasian plates and in other places near islands of volcanic origin.

The outputs of endogenous heat into the climate system (into the ocean) are modulated by cyclic cosmic disturbances of the forced movement of the Earth following the movement of the Sun around the barycenter of the Solar System. In the problem of global climate change, it should be borne in mind that solar radiation is not the only source of heat in the climate system. Additional heat is supplied to the climate system from the Earth's mantle under the control of a cyclic space factor. Endogenous heat contributes to the thermal balance of the planet.

The anthropogenic greenhouse hypothesis about the cause of modern global climate warming has a serious competitor operating within the framework of the fundamental laws of the Solar system.

Keywords: climate change, ocean, climate system, temperature, endogenous heat, volcanoes, earthquakes.

For citation: Sherstyukov B. G., Sherstiukov A. B. Space and tectonics of the Earth as regulators of the release of Earth internal heat into the World Ocean. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydro-meteorology and Ecology*. 2024;(75):207—233. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-207-233.

Введение

Океан является важнейшим компонентом климатической системы и важнейшим внешним источником энергии для климата атмосферы. Теплоёмкость и тепловая инерционность океана многократно превосходят теплоёмкость и инерционность атмосферы, поэтому в системе океан–атмосфера океан является определяющим в поддержании долгопериодных колебаний климата. Но вопрос о причинах многолетних колебаний и изменений климата как океана, так и атмосферы остается нерешенным.

Исследования причин колебания климата имеют давнюю историю. В подавляющем большинстве случаев считается аксиомой, что Солнце — это единственный источник тепла на Земле. При таком подходе поиски причин изменений глобального климата проводятся в области исследования изменения глобального радиационного баланса тропосферы за счет изменения количества приходящей и уходящей солнечной радиации или за счет перераспределения тепла и влаги

между атмосферой и другими составляющими климатической системы. Однако при любых подходах наблюдаемые изменения и циклические колебания внутри климатической системы не удается объяснить в рамках свойств самой климатической системы. В связи с этим неоспоримым является признание воздействия на глобальный климат некоторого внешнего фактора за пределами климатической системы. Осталось найти этот фактор.

Внешнее воздействие на климат могут оказывать космический фактор, антропогенный фактор или оба фактора вместе. Климатическая система оказалась слишком сложна и недостаточно изучена для уверенного ответа на вопрос о причинах изменения климата. Предполагаемые механизмы воздействия на климат космических факторов пока не получили всеобщего признания. Альтернативой этому стала гипотеза об антропогенном парниковом эффекте, который якобы привел к глобальному потеплению. Единственным аргументом в пользу признания антропогенного фактора, как главного фактора всех бед современного глобального потепления, явились выводы «большинства ученых» об этом, полученные на основе модельных оценок [1].

Доминирование в научных публикациях выводов об антропогенном факторе глобального потепления [1] нельзя приводить в качестве доказательства антропогенной гипотезы, так как все подобные выводы получены на однотипных полумпирических моделях, которые для доказательств не предназначены, поскольку построены без достаточных научных обоснований. Эти модели содержат эмпирические настроечные коэффициенты, через них антропогенный парниковый эффект косвенно априори закладывался в модели при их построении. Настроечные коэффициенты научного обоснования не имеют, а значит, и результаты работы таких моделей научно не обоснованы. Других «доказательств» вины человека в проблемах климата нет. Заявления о «большинстве ученых» ясности не добавляет. Многократное повторение недоказанного предположения нельзя считать доказательством. Несостоятельность выводов об антропогенной причине глобального потепления рассматривалась в работах [2—15].

Спорной также является аксиома, заложенная в модели о том, что Солнце — единственный источник тепла на Земле. Общепризнанная астрономическая теория климата М. Миланковича [16] объясняет природу циклических появлений ледниковых периодов изменениями эксцентриситета орбиты и альбедо Земли. В этой теории Солнце рассматривалось как единственный источник энергии. В этом ее основной недостаток, так как она не описывает механизм выхода из ледниковых периодов [17]. Лед, покрывающий Землю в ледниковом периоде, отражает приходящую солнечную энергию в космос и способствует еще большему охлаждению климата и усилению оледенения. Солнечная радиация не способна вывести землю из такого состояния [18]. Много позднее стало известно, что в недрах Земли происходят активные процессы с выделением тепла и с выходами его на поверхность земной коры. При большом альбедо Земли во время ледникового периода Земля могла выйти из состояния оледенения только за счет эндогенного тепла. Эндогенное тепло и в наше время может служить дополнительной энергией для изменения климата.

Следует отметить, что, кроме выводов упомянутого «большинства ученых» об антропогенной природе глобального потепления, не меньшее количество публикаций посвящено описанию исследований внешних факторов космического происхождения, способных повлиять на глобальный климат. Эти работы можно разделить на две большие группы. К одной группе относятся исследования, связанные с изменением солнечной активности в разных ее проявлениях и через разные механизмы влияния на климат. Ко второй группе относятся исследования связей климата с небесной механикой в соответствии с общими законами Солнечной системы.

Направление исследований второй группы представляется наиболее перспективным, так как небесная механика, возможно, является первичной по отношению ко всем циклическим процессам в Солнечной системе, в том числе к циклам солнечной активности и к циклам в климатической системе Земли. Такое предположение не является бесспорным, но опровержений его тоже нет.

Многофакторное космическое влияние накладывается на сложнейшую климатическую систему с многочисленными внутренними прямыми и обратными нелинейными связями. Возникает два главных вопроса: какой выбрать показатель внешнего фактора и в каких параметрах климатической системы следует искать его первичный отклик? Необходимо найти первичные локальные возмущения на Земле, которые должны распространяться в климатической системе по ее внутренним законам и будут проявляться в самых разных взаимозависимых параметрах климата. Кроме того, нужно учитывать инерционность многих процессов на Земле, ответственных за климат, и возможные задержки проявления отклика изменений в климате на внешнее воздействие.

Самой общей и самой устойчивой в веках особенностью космических изменений является небесная механика, а самой общей особенностью небесной механики является барицентрическое вращение Солнечной системы (вращение Солнца и планет вокруг их общего центра масс). При этом Солнце совершает движение в космическом пространстве по траектории похожей на кардиоиду. Данное движение неравномерное, его скорость на разных отрезках времени определяется скоростью смены конфигурации планет в результате их орбитальных вращений. Земля — маленькая планета, она не влияет на барицентр, но орбита Земли привязана к Солнцу, поэтому Земля вместе со всей своей орбитой вовлечена в это дополнительное неравномерное движение в космическом пространстве и испытывает на себе воздействие сил барицентрического вращения. Но в системе координат, привязанных к Земле, этих сил не существует, сама геоцентрическая система координат участвует во вращении вокруг общего центра масс Солнца и планет. Математические модели, построенные в геоцентрических координатах, упускают фактор барицентрического воздействия небесной механики на Землю.

В работе [2] было показано, что неравномерное барицентрическое вращение создает дополнительный вращательный момент осевого вращения Земли и сопровождается изменениями в переносе тепла на поверхности океана по траекториям основных океанических течений. Там же было высказано предположение о том, что барицентрическое вращение Солнечной системы создает дополнительный

вращательный момент не только в осевом вращении Земли и в системе океанических течений, но и в жидком слое мантии Земли — астеносфере, скрытой под земной корой.

Силы барицентрического вращения приложены ко всем оболочкам Земли и астеносфера не является исключением. Предполагается, что в результате таких воздействий на раскаленную астеносферу в ней могут модулироваться возмущения с выходом тепловой энергии на поверхность земной коры.

В недрах Земли сосредоточена огромная тепловая энергия, которая в очень явном виде иногда вырывается в виде вулканов на континентах. Еще больше извержений вулканов происходит на дне Мирового океана. В настоящей работе ставилась задача проверки гипотезы о циклической активизации выхода эндогенного тепла в океан под воздействием циклических возмущений Земли при барицентрическом вращении Солнечной системы. Слежение за выделением эндогенного тепла осуществлялось по температуре воды вблизи океанского дна в узлах географической сетки Мирового океана. Влияние космического фактора на климат океана проверялось через механизм выделения в океан эндогенного тепла.

Целью настоящей статьи является поиск районов с поступлением эндогенного тепла в Мировой океан вследствие квазициклических возмущений астеносферы при неравномерном барицентрическом вращении Солнца и Земли вместе с ним.

Состояние вопроса

Наиболее важными процессами выделения тепла в недрах Земли являются процесс гравитационного разделения Земли на несколько оболочек, распад радиоактивных элементов, приливное взаимодействие Земли и Луны и др. Существование внутреннего источника тепла приводит к повышению температуры земной коры с глубиной. Многолетние измерения теплового потока из Земли показывают, что в среднем значения теплового потока на суше и на океанском дне составляют 50—52 мВт/м² [19]. Однако пространственное распределение потока очень неоднородно и изменяется во времени.

В [19] показано, что срединно-океанические хребты с рифтовыми долинами и с островами вулканического происхождения имеют аномально высокие значения теплового потока — 400—600 мВт/м², достигающие местами значений до 1500 мВт/м², например, в Калифорнийском рифте. Центральная часть Исландии обладает тепловым потоком от 140 мВт/м² до 430 мВт/м². Именно в таких зонах и происходит вынос тепла путем выхода гидротерм из мантии Земли или путем извержения вулканов из области магматических очагов в верхней мантии на глубинах до 150 км.

Уже много известно о подобии в изменениях климата и активизации вулканической деятельности. По данным [20], тенденция глобального потепления наблюдается одновременно с тенденцией усиления вулканической деятельности как на территории суши, так и в значительной степени на территории морского дна.

Выбросы вулканического пепла при извержениях экранируют и временно ослабляют приток солнечного тепла, вызывая кратковременное похолодание климата, но через 2—3 года пепел осаждается, а тенденция потепления восстанавливается.

Усиление вулканизма стало характерным для такого огромного региона, как Тихоокеанский бассейн. В работах А. А. Маракушева и В. Л. Сывороткина активизация вулканической деятельности в планетарном масштабе объясняется усилением водородной дегазации жидкого ядра планеты. По мнению Сывороткина [21], глубинная дегазация — это базовый геологический процесс, определяющий эволюцию планеты. Водород выделяется при кристаллизации твёрдого ядра из жидкого и накапливается в верхней его части на границе с мантией на глубине около 2900 км. Отсюда он просачивается к поверхности Земли по постоянно существующим и действующим каналам дегазации, главными из которых являются рифтовые структуры на вершинах срединно-океанических хребтов. По мнению Маракушева [22], флюиды, восходящие из ядра планеты, являются водородными. Водород, отделяющийся от флюидов в огромном масштабе, достигает стратосферы.

В дополнение к выделениям эндогенного тепла, способным влиять на климат Земли при усилении тектонической активности, в работе [23] сделан вывод о том, что усиление водородной дегазации ядра Земли имеет также другие механизмы воздействия на климат. Согласно одному из них, дегазация приводит к разрушению ледового покрова полярных морей и к деградации озонового слоя. Открытые воды океана создают отепляющее воздействие на атмосферу полярных морей. В работе [24] показано, что усиление планетарного процесса водородной дегазации порождает комплекс физико-химических эффектов, выделяющих тепло в климатическую систему.

В частности, в настоящей работе выполнен поиск температурных изменений в океане, связанных непосредственно только с тепловыми эндогенными выбросами вблизи океанского дна в результате возмущений в земных недрах, возникающих при барицентрическом вращении Солнечной системы с переменной скоростью. Силы барицентрического вращения воздействуют на все оболочки Земли, поэтому возмущения в недрах Земли неизбежны. Вопрос заключается только в количественной стороне эффекта. При этом необходимо ответить на три вопроса:

— Проявляется ли выделение эндогенного тепла в изменениях температуры воды вблизи океанского дна?

— В каких регионах Земли этот эффект наиболее заметен?

— Связана ли активизация выделения эндогенного тепла в океан с силами барицентрического вращения Солнечной системы?

Как известно, литосфера Земли разделена на гигантские плиты, которые движутся относительно друг друга и взаимодействуют друг с другом. На границах плит в местах многочисленных разломов в земной коре, в поясах сжатия океанских рифтовых зон наиболее выражена вулканическая активность, обусловленная глубинными процессами внутри планеты. Контуры плит определяются по зонам наиболее частых землетрясений и вулканических извержений [25].

Обработка временных рядов о количестве вулканических извержений за 200 лет в разных частях Тихого океана показала [26], что в районах Индонезии,

Курил, Японии, Филиппин, Камчатки, Северной и Южной Америки, Аляски, Алеутских, Марианских и Гавайских островов отмечается тенденция роста примерно в 2 раза числа действующих вулканов, которым свойственно повышение активности за 200 лет. Большинство вулканов находятся на дне Мирового океана, площадь которого больше территории суши почти в 2,5 раза. Б. Хизен и П. Д. Фокс [27] показали, что широкая средняя часть срединно-океанических хребтов характеризуется тепловым потоком со значениями выше среднего и что имеются узкие зоны очень высоких значений теплового потока.

Помимо экстремальных значений потоков, связанных с отдельными хребтами, существует аномальная геотермальная зона громадной протяжённости вдоль западной окраины Тихого океана, которая является следствием единых по механизму и характеру геодинамических процессов, охватывающих всю зону северного, западного и юго-западного сопряжений Тихого океана и расположенных по периферии континентов [28].

Изучение активных частей срединной зоны в районе Исландии дали возможность выделить [29] особый тип «рифтовых водородных терм», в газовом составе которых в значительной степени присутствует водород мантийного происхождения с температурами до 300 °С. Там же сообщается, что в отдельных очагах разгрузки обнаружен вынос тепла до 108 ккал/с с кипением и с образованием газопаро-водяных струй.

Подобные горячие выходы обнаружены также американской экспедицией в восточной части Тихого океана [30], где был зафиксирован гидротермальный источник с температурой воды 360 ± 20 °С с голубоватым фонтаном мутной воды, изливавшейся из конусов донных отложений.

По мнению авторов [20], происходящее в настоящее время развитие вулканизма на большей части дна океана и вызывающее нарастание теплосодержания его водной массы является основной причиной увеличения температуры морской поверхности. К аналогичным выводам пришли авторы работы [31], которые показали, что определяющими факторами наблюдаемых климатических аномалий, вплоть до стихийных бедствий, являются громадные выбросы аномального тепла и парниковых газов вследствие усиления сейсмической активности, которые начались в последней четверти XX в.

В работе [32] при исследовании изменений региональных среднегодовых температур с 1830 г. по 2010 г. сделан вывод о связи изменений температуры с эндогенной активностью Земли и внутренним энергетическим обменом. Основным механизмом эндогенной активности Земли, по мнению этих же авторов, является механизм дополнительных циклических взаимодействий оболочек Земли и их вынужденной относительной раскачки из-за гравитационного воздействия больших планет. При этом смещения жидкого ядра, мантии и других оболочек Земли, их циклические изменения с периодами космических воздействий порождают вариации магнитного поля Земли, внутреннего теплового потока и других физических полей с теми же самыми периодами. По мнению авторов работ [33, 34], силы взаимодействия оболочек Земли значительны и могут служить в качестве основного энергетического источника всех

геодинамических и геофизических процессов и обеспечивать их временные вариации.

По результатам исследования, авторы [35] пришли к выводу о том, что дополнительным поставщиком тепла в атмосферу является сейсмичность плюс синхронные выбросы парниковых газов эндогенного происхождения, которые также несут с собой геотермальную энергию. Землетрясения сопровождаются появлением сдвигов и разломов в земной коре, через которые тепло из недр выносятся парами воды, газами, термальными водами, распространяющимися по трещинам и мелким нарушениям осадочного чехла. Этим обуславливается высокая скорость и значительные площади распространения геотермальных и климатических аномалий [35]. Выбросы геотермальной энергии в связи с землетрясениями происходят не одномоментно, как в случае с вулканизмом, а длительно в течение 2—3-х лет. Эти потоки аномального тепла постепенно распространяются на другие регионы, приводя к росту среднегодовых температур по всей планете. По оценкам указанных авторов, геотермальные выбросы после землетрясений на 2—3 порядка выше, чем вызванные вулканизмом.

Итак, случаи выхода эндогенного тепла в океан зафиксированы и доказаны. Но океан является важнейшей компонентой климатической системы. Из этого следует, что климатическая система получает дополнительное тепло из земных недр и, следовательно, Солнце не единственный источник тепла в климатической системе. В связи с этим необходимо описать локальные особенности выходов тепла в разных частях Мирового океана, оценить масштабы территорий океанского дна на планете, на которых земные недра отдают свое тепло в климатическую систему. Самой главной является задача выявления причин активизации выхода эндогенного тепла в климатическую систему.

Исходные данные и методы анализа

В работе использовались данные о среднегодовой температуре воды на стандартных горизонтах океана от 5 м до океанского дна (в пределе на 42-х горизонтах от 5 м до 5350 м). Архив этих данных с наименованием EN.4.2.1 [36] с поправками G10 Гурецки и Резегетти [37] был получен авторами статьи с сайта <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/en4/download-en4-2-1.html> и предназначен для некоммерческого использования. Архив среднемесячных данных о температуре воды использовался с 1960 г. по 2022 г. Более ранние данные менее надежные, поэтому не вошли в работу.

По сообщениям авторов архива, он основан на данных профилей температуры океана под поверхностью, полученных из четырех архивов. Большая часть данных была получена из базы данных Мирового океана [38], включая все обновления базы, которые были доступны на тот момент. С 1990 г. данные дополняются профилями, собранными в рамках проекта «Профиль глобальной температуры и солености» [39]. Использовались так же данные Argo, т. е. программы Глобальной системы наблюдений за океаном. Данные Argo были собраны и предоставлены в свободный доступ Международным проектом Argo и национальными

инициативами, которые вносят в него вклад [40]. Дополнительные арктические данные были собраны авторами архива в рамках проекта по Арктическим синоптическим наблюдениям в масштабах всего бассейна и тоже включены в архив данных EN.4.2.1.

На этапе создания архива все данные были подвергнуты серии процедур контроля качества. Они включали три новые проверки, введенные в эту версию набора данных. В первом из них сверялась глубина в месте расположения каждого профиля с данными о глубине в наборе данных о рельефе. Вторая проверка была на соответствие последовательного увеличения глубины по каждому профилю. Ошибочные уровни отбрасывались. Третья проверка — сравнение последовательности в профилях солености.

Объективные анализы температуры за месяц рассчитывались авторами архива на основе данных об океане с учетом контроля качества. В результате были вычислены многолетние ряды среднемесячной температуры воды Мирового океана в узлах географической сетки через 1° по широте и долготе на 42-х стандартных уровнях по вертикали.

Используя указанные среднемесячные данные о температуре, авторами статьи был получен массив среднегодовых значений в тех же узлах через 1° широты и долготы за 1960—2022 гг., который далее использовался в настоящей работе после проведения дополнительного контроля качества данных.

Проверка данных была выполнена на предельно допустимые отклонения каждого значения от многолетней нормы для соответствующего места и горизонта. Допустимыми значениями температуры T_i считались значения в интервале: $T_{\text{cp}} + 4\sigma > T_i > T_{\text{cp}} - 4\sigma$, где T_i — текущее значение температуры, T_{cp} — среднее многолетнее значение температуры, σ — среднеквадратическое отклонение температуры.

Значения T_{cp} и σ вычислялись по исходным данным за 1960—2022 гг. в каждом географическом узле на каждом горизонте. Исходные значения T_i , выходящие за установленные пределы, исключались из дальнейшей работы (i — номер года). Интервал разброса $\pm 4\sigma$ заведомо включает все корректные значения ряда с распределением близким к нормальному, а значения, выходящие за этот интервал, считались ошибочными.

Проверка на предельно допустимые отклонения проводилась в три этапа. На первом этапе при вычислении нормы и среднеквадратического отклонения использовались все исходные значения на соответствующем горизонте, в число которых попадали ошибочные значения, если они были. Эти скрытые ошибочные исходные значения на первом этапе искажали истинные значения T_{cp} и σ , поэтому интервал допустимых значений на первом этапе был не совсем корректным. Наибольшая погрешность в сторону завышения появлялась в значении σ , в результате интервал допустимых значений оказывался неоправданно расширенным. Самые грубые ошибки при этом удавалось отбросить, но более мелкие ошибки оставались в архиве.

На втором этапе проверки новые значения нормы и среднеквадратического отклонения вычислялись по оставшимся значениям, после исключения грубых ошибок на первом этапе. Все значения T_i повторно были проверены на соответствие

установленному интервалу по новым нормам и среднеквадратическим отклонениям второго этапа. Выявленные новые ошибки также были отброшены.

Затем аналогично был выполнен третий этап проверки. С каждым новым этапом чувствительность метода к ошибкам повышалась, а в исходных рядах оставалось все меньше ошибочных значений. Анализ результатов контроля показал, что проверка была выполнена не напрасно, т.к. исчезли значения, резко отличающиеся от закономерностей общей статистической структуры.

Даже после трехэтапного контроля некоторые мелкие ошибки могли остаться в архиве. Для ослабления их роли полученные после контроля вертикальные профили температуры воды были сглажены скользящим осреднением по 5 горизонтам. Далее в работе использовались проконтролированные сглаженные значения температуры воды Мирового океана на 42 горизонтах.

Нормы и размах колебаний температуры сильно отличаются на разных горизонтах. Для их сопоставимости по вертикали и для более наглядного графического представления многолетних изменений температуры на разных горизонтах в дальнейшей работе использовались стандартизированные значения:

$$\tilde{T}_i = \frac{T_i - T_{\text{ср}}}{\sigma}.$$

При стандартизации норма и среднеквадратическое отклонение температуры на горизонтах за 1960—2022 гг. вычислялись по данным, прошедшим трехэтапный контроль, описанный выше.

Рабочая гипотеза исследования строилась на предположении связи интенсивности выхода в океан эндогенного тепла Земли с динамическими возмущениями планеты Земля в результате неравномерного барицентрического вращения Солнечной системы. Количественной оценкой изменений в Солнечной системе служили значения суммарного момента инерции орбитального вращения планет-гигантов и Солнца вокруг оси, проходящей через центр масс Солнечной системы (барицентр). Предполагалось, что при неравномерном барицентрическом вращении всей Солнечной системы на Земле срабатывает триггерный механизм активизации подводных вулканов и геотермальных выбросов в океан в результате возмущений мантии Земли силами Ньютона, действующими на все оболочки Земли. Выше отмечалось, что подобное предположение уже подтвердилось на примере появления дополнительного вращательного момента в осевом вращении самой Земли и в активизации переноса тепла на поверхности океана основными океаническими течениями, составляющими Большой океанический конвейер течений Брокера [41].

Суммарный момент инерции J барицентрического вращения планет i массой m_i , находящихся на расстоянии r_i от оси вращения вычислялся как:

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2,$$

где m — масса планеты; r — векторное расстояние от планеты до центра масс Солнечной системы с учётом барицентрической долготы орбитального вращения

планеты, характеризующей в каждый момент направление вектора момента инерции. Момент инерции каждой i -ой планеты — это векторная величина $j_i = \{x_i; y_i\}$, где x_i и y_i — составляющие момента инерции на плоскости.

Суммарный момент инерции вращения планет можно записать в виде:

$$J = \left\{ \sum_{i=1}^n x_i; \sum_{i=1}^n y_i \right\},$$

где n — число планет.

Составляющие вектора момента инерции вращения каждой планеты определяются как:

$$x_i = -m_i r_i^2 \sin\left(\frac{\pi}{180} d_i\right), \quad y_i = -m_i r_i^2 \cos\left(\frac{\pi}{180} d_i\right), \quad (1)$$

где m_i — масса планеты; r_i — расстояние от барицентра до планеты; d_i — барицентрическая долгота планеты, которая определяет направление действия момента инерции.

Ранее [42] уже вычислялся подобный индекс, т. е. момент инерции барицентрического вращения Солнечной системы, но орбиты планет принимались круговыми. В настоящей работе была учтена эллиптичность планетных орбит.

Суммарные составляющие вектора момента вращения планет-гигантов за год:

$$X = \sum_{k=1}^{365} \sum_{i=1}^n x_i, \quad Y = \sum_{k=1}^{365} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (2)$$

где k — номера суток внутри года от 1 до 365.

Скалярная величина суммарного за год момента вращения планет-гигантов:

$$J = \sqrt{X^2 + Y^2}. \quad (3)$$

Астрономические данные для вычисления индекса получены из Института прикладной астрономии Российской академии наук [43]. Расстояния до планет были выражены в километрах, а массы планет — в килограммах. Суммарные скалярные значения момента вращения больших планет (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) вычислены по формулам (1) — (3) за 1801—2050 гг.

Планеты земной группы практически не влияют на момент инерции вращения Солнечной системы, а четыре большие планеты дают основные вклады, сопоставимые между собой. Это означает, что планеты Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун при движениях по своим орбитам придают Солнцу неравномерное движение по некоторой траектории в космическом пространстве. Каждая отдельная планета придаёт Солнцу движение, при котором центр Солнца смещается относительно общего центра масс на величину меньше радиуса Солнца, но сочетание нескольких планет в одном секторе барицентрических долгот может привести к смещению Солнца на величину больше двух радиусов Солнца.

На рис. 1 приведены вычисленные годовые значения суммарного момента инерции J вращения больших планет относительно центра масс Солнечной системы за 1801—2049 гг. По сути J — это индекс барицентрического вращения.

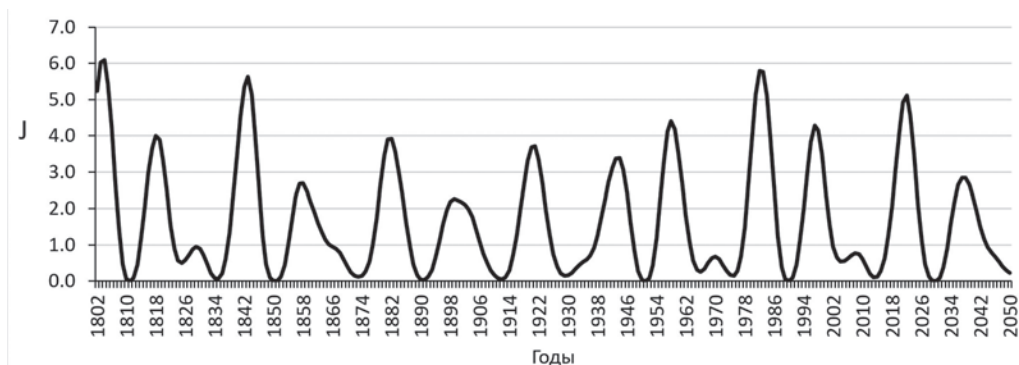


Рис. 1. Суммарный момент инерции вращения больших планет относительно центра масс Солнечной системы [$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot 10^{52}$].

Fig. 1. The total rotational moment of inertia of large planets with respect to the center of mass of the solar system [$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot 10^{52}$].

Индекс барицентрического вращения является мерой возникающих на Земле динамических возмущений при движении Солнца вокруг барицентра. Траектория этого движения в космическом пространстве похожа на кардиоиду. Земля вместе со всей своей орбитой привязана к Солнцу и увлекается им в движение по кардиоиде. Это движение неравномерное, квазициклическое.

Исследование связи выхода эндогенного тепла с возмущениями от неравномерного барицентрического вращения Солнечной системы выполнено методом асинхронного корреляционного анализа изменений температуры воды на нижнем стандартном горизонте океана в узлах географической сетки с индексом барицентрического вращения. Анализировались асинхронные связи в предположении возможного запаздывания отклика выделения эндогенного тепла на внешние возмущения.

Результаты исследований

По данным о температуре воды вблизи океанского дна выполнена проверка наличия связи выходов мантийного тепла с изменениями индекса J . С этой целью по данным за 1960—2022 гг. в каждом узле географической сетки из данных о среднегодовой температуре T воды океана на стандартных горизонтах выбирался ряд данных только на самом нижнем горизонте в этом узле. Полученные ряды температуры вблизи океанского дна в каждом узле за 1960—2022 гг. использовались при вычислении коэффициентов корреляции между изменениями среднегодовой температуры у океанского дна и среднегодовыми значениями индекса барицентрического вращения J Солнечной системы. Ряд индекса J использовался за 1801—2050 гг. Коэффициенты корреляции вычислялись при сдвигах индекса J на интервал времени от 0 до 14 лет с шагом 1 год. Сдвиг имитировал возможное запаздывание отклика температуры океана на изменения индекса J .

Так как запаздывание отклика заведомо неизвестно, то его предстояло определить. Районы возможного выхода эндогенного тепла тоже неизвестны, поэтому их поиск выполнен по данным во всех узлах сетки $1 \times 1^\circ$ географических широт и долгот Мирового океана.

В каждом узле по максимальному из всех асинхронных коэффициентов корреляции определялся наилучший (максимальный по модулю) коэффициент и сдвиг (количество лет запаздывания), который принимался за время запаздывания отклика изменений температуры на изменения индекса J . Ряд индекса J начинался с 1801 года, поэтому его сдвиг до 14 лет при вычислениях асинхронных коэффициентов не приводил к уменьшению числа членов ряда, участвующих в вычислениях.

На рис. 2 приводятся узлы тесных связей со значимыми (при доверительной вероятности $p > 95\%$) коэффициентами корреляции r между температурой воды на нижнем горизонте (ближайший придонный горизонт) и индексом J . При этом кружками разного цвета показаны те узлы географической сетки, в которых вычисленные коэффициенты корреляций между T и J при наилучших сдвигах

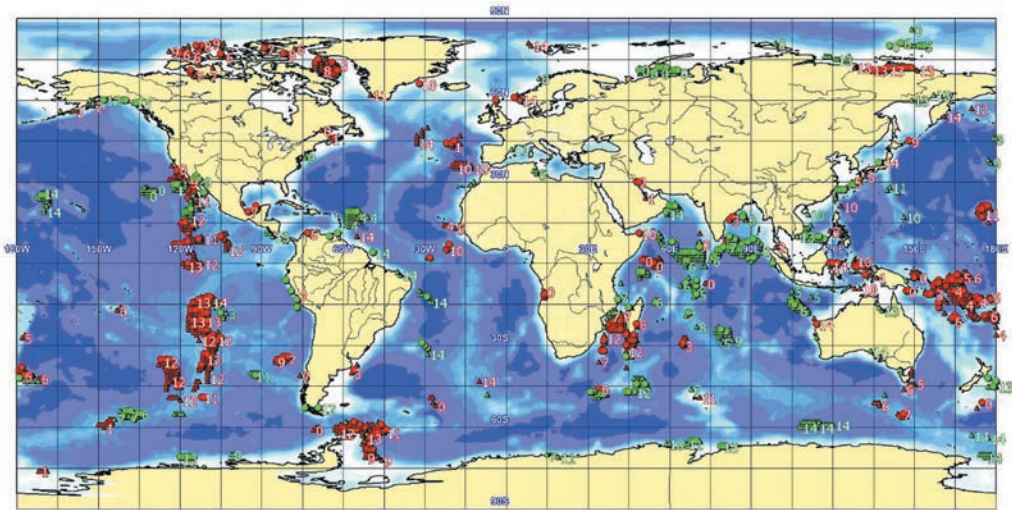


Рис. 2. Узлы тесных связей со значимыми (доверительная вероятность $p > 95\%$) коэффициентами корреляции r между температурой воды на нижнем горизонте (ближайший придонный горизонт) и индексом J .

Обозначения: кружки красные ($r > 0,65$), треугольники красные ($r > 0,60$), кружки зеленые ($r < -0,65$), треугольники зеленые ($r < -0,60$).

Fig. 2. Nodes of close connections with significant (confidence probability $> 95\%$) correlation coefficients r between the water temperature at the lower horizon (the nearest bottom horizon) and the index J .

Symbols: red circles ($r > 0,65$), red triangles ($r > 0,60$), green circles ($r < -0,65$), green triangles ($r < -0,60$).

оказались $r > 0,65$ или $r < -0,65$, а треугольниками разного цвета показаны узлы, в которых коэффициенты корреляций между T и J при наилучших сдвигах оказались $r > 0,60$ или $r < -0,60$.

Кружки и треугольники на карте показывают районы тесных связей изменений температуры воды вблизи океанского дна с небесной механикой. Красные кружки и треугольники соответствуют узлам с положительными связями, а зеленые — с отрицательными связями. Цифрами вблизи узлов обнаруженных связей показано время запаздывания отклика изменений температуры (количество лет) в этом районе на изменения индекса J .

Все узлы со значимыми коэффициентами корреляции нанесены на карту. Узлы тесных связей на карте рис. 2 распределились по океанам неслучайно. Их положение соответствует районам активной вулканической деятельности. Такими районами, как известно, являются обширные протяженные области вблизи границ литосферных плит и в районах горячих точек на плитах [19].

Литосферная плита — это огромный по площади целостный блок земной коры, отделенный от других подобных блоков зонами разломов с активными сейсмическими и тектоническими явлениями. На границах между литосферными плитами происходят различные явления: плиты могут раздвигаться, сдвигаться с погружением одной плиты под другую или могут скользить одна относительно другой. Границы плит являются зонами максимальной сейсмической и вулканической активности. При раздвижении океанических литосферных плит образуются открытые трещины в земной коре, по которым происходит поднятие ее базальтовых магм на поверхность морского дна с выносом эндогенного тепла в океан. В Мировом океане оказалось 1549 узлов с тесными связями изменений температуры с индексом J (рис. 2). Каждый узел характеризует участок в океане площадью около 12 тыс км², тогда общая площадь районов, в которых температура воды у океанского дна изменяется когерентно с изменениями индекса J барицентрического вращения Солнечной системы составляет около 18,6 млн км². Учитывая, что общая площадь всего Мирового океана около 360 млн км², получаем, что эндогенное тепло Земли выходит в океан на пяти процентах площади Мирового океана.

По данным, представленным на карте, видно, что изменения температуры вблизи океанского дна происходят с некоторым запаздыванием после изменений индекса J . Запаздывание в разных районах чаще бывает 3—6 лет или 12—14 лет, а знак связи может быть как положительным, так и отрицательным, но во всех отмеченных узлах корреляции были значимые.

Различия в знаке обнаруженных связей в разных районах Мирового океана объясняются различными свойствами литосферных границ и другими геодинамическими условиями. Границы плит могут быть дивергентными (спрединг) и конвергентными (субдукция). В обоих случаях на этих границах создаются условия для выхода раскаленной магмы в океан или для разогрева верхнего слоя земной коры при интрузивных процессах, когда магма поднимается к поверхности земной коры, разогревает ее верхний слой и отдает тепло океану, но не выходит в океан.

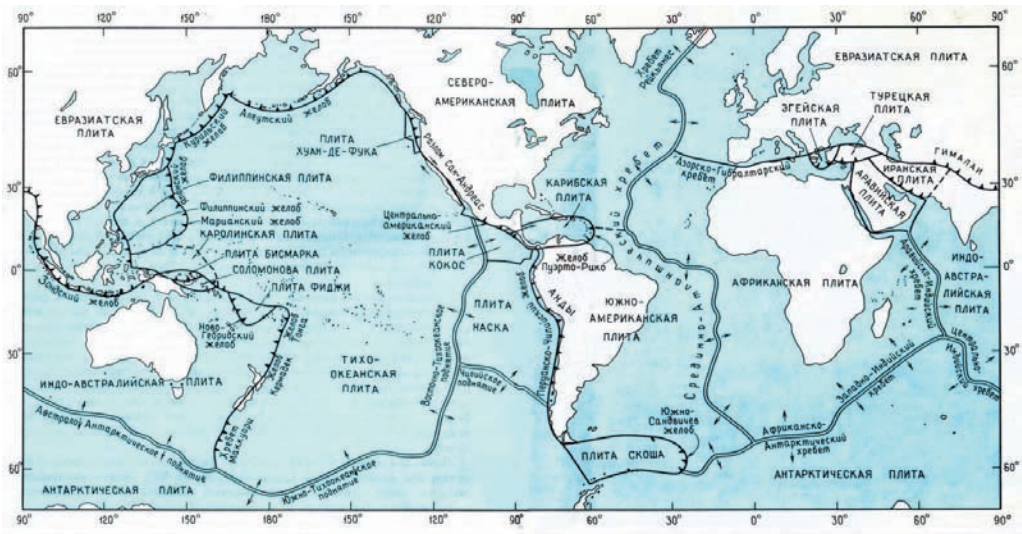


Рис. 3. Границы литосферных плит по В. Е. Хайн и М. Г. Ломизе [44].

Fig. 3. Boundaries of lithospheric plates according to V. Khain and M. Lomize [44].

Литосферу принято делить на семь крупных и несколько малых тектонически обособленных плит. Границы между ними проводят по областям наиболее частых землетрясений. На рис. 3 показаны границы основных литосферных плит.

Места проявления современного вулканизма образуют три глобальных вулканических пояса: Тихоокеанский, Атлантический и Средиземноморско-Индонезийский.

Рассмотрим подробнее Тихоокеанский пояс. На рис. 4 на фоне рельефа океанского дна Тихого океана показано распределение узлов тесных связей изменений температуры придонного слоя воды с изменениями индекса J баричесентрического вращения Солнечной системы.

На карте рис. 4 отчетливо прослеживается связь расположения выявленных узлов с рельефом океанского дна. Сравнение расположения отмеченных на рис. 4 узлов с границами литосферных плит на карте (рис. 3) в Тихом океане показывает их почти полное совпадение. Наличие тесных связей многолетних изменений температуры воды у океанского дна с индексом космического воздействия в местах активной вулканической деятельности на границах литосферных плит подтверждает исходную гипотезу о возможном вкладе эндогенного тепла Земли в температуру воды вблизи океанского дна и показывает, что выходы этого тепла в океан модулируются циклическими космическими воздействиями в результате баричесентрического вращения Солнечной системы.

Обширной областью Тихого океана тесных связей между изменениями температуры воды и индексом J космического воздействия оказалась акватория вокруг островов Меланезии (о. Новая Гвинея, Соломоновы острова и острова Новой

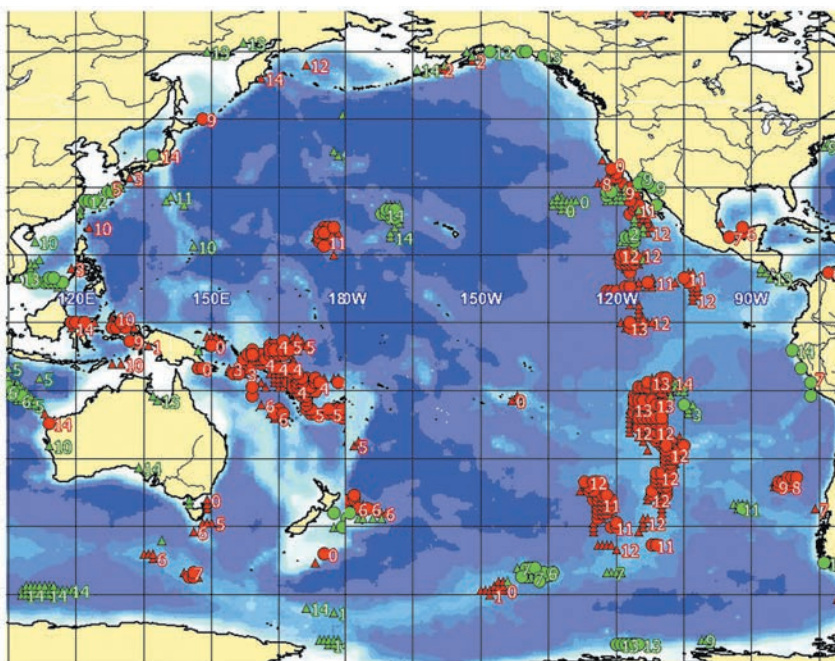


Рис. 4. Узлы тесных связей со значимыми ($p > 95\%$) коэффициентами корреляции r между температурой воды на нижнем горизонте (ближайший ко дну горизонт) и индексом J . Тихий океан.

Обозначения: кружки красные ($r > 0,65$), треугольники красные ($r > 0,60$), кружки зеленые ($r < -0,65$), треугольники зеленые ($r < -0,60$).

Fig. 4. Nodes of close connections with significant ($p > 95\%$) correlation coefficients r between the water temperature at the lower horizon (the nearest bottom horizon) and the index J . Pacific ocean.

Symbols: red circles ($r > 0,65$), red triangles ($r > 0,60$), green circles ($r < -0,65$), green triangles ($r < -0,60$).

Гебриды). Это место на границе Тихоокеанской и Индо-Австралийской плит. Коэффициенты корреляции здесь положительные.

Наиболее высокие коэффициенты корреляции между изменениями температуры и индекса J достигали значений $r = 0,88$. На рис. 5 показаны графики изменения аномалий температуры на глубине 3563 м и индекса J в одном из географических узлов с координатами 15° ю.ш. 172° в.д. вблизи островов Меланезии. В этом узле наилучший коэффициент корреляции оказался $r = 0,72$ при запаздывании температурных изменений относительно изменений индекса J на 4 года. Данный узел географической сетки является одним из множества других, отмеченных на рис. 4 подобных узлов в этой части океана с аналогичными изменениями температуры воды вблизи океанского дна. График изменения индекса J на рис. 4 приведен со сдвигом на 4 года для визуального сравнения колебаний температуры

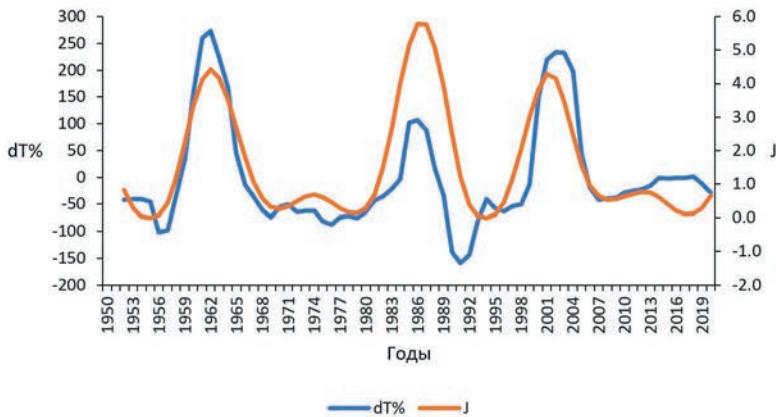


Рис. 5. Аномалии температуры воды dT (в % от среднеквадратического отклонения) у океанского дна вблизи островов Меланезии и индекс барицентрического вращения J ($\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot 10^{52}$) со сдвигом на 4 года. Узел 15° ю.ш., 172° в.д. Горизонт 3563 м.

Fig. 5. Anomalies of water temperature dT (in % of the standard deviation) at the ocean bottom near the islands of Melanesia and the barycentric rotation index J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot 10^{52}$) with a shift of 4 years. Node 15° S, 172° E Horizon 3563 m.

с изменениями внешнего воздействия. Шкала горизонтальной оси соответствует шкале времени для температуры. Нетрудно видеть хорошее соответствие изменений температуры воды у океанского дна с произошедшими на 4 года раньше аналогичными изменениями индекса J .

Северо-западнее Меланезии обнаружили узлы с положительными связями в районе Молуккских островов. Они лежат на границе между Филиппинской и Индокитайской плитами. Запаздывание температурных изменений здесь составляет 9—10 лет. А между Евроазиатской и Филиппинской плитами вытянулась серия узлов с отрицательными связями температуры у морского дна с индексом J . Вдоль Японского и Курило-Камчатского желобов в северо-западной части Тихого океана положительные связи обнаружены при запаздывании температуры на 9—14 лет.

В восточной части Тихого океана также оказалось большое количество узлов географической сетки, в которых выявлена тесная связь изменений температуры воды у океанского дна с изменениями индекса J . Вблизи Аляски связи отрицательные с запаздыванием 12—14 лет. В Тихом океане вблизи Калифорнии происходят сложные тектонические процессы, поэтому связи оказались разного знака западнее и восточнее полуострова Калифорния. На западной стороне связи положительные с запаздыванием 9—12 лет, а в Калифорнийском заливе связи оказались отрицательные с запаздыванием 9 лет.

Далее на юг все узлы тесных связей лежат на Восточно-Тихоокеанском хребте между Тихоокеанской плитой и плитой Кокос, а также между Тихоокеанской плитой и плитой Наска. Везде запаздывание 11—13 лет. На стыке Тихоокеанской и Антарктической плит обнаружилось еще два района тесных связей.

Все перечисленные районы составляют известное «огненное кольцо» Тихого океана, вдоль которого чаще всего происходят землетрясения и извержения вулканов. Общее сравнение положений выделенных узлов на карте рис. 4 с границами плит, показанными на рис. 3, не оставляет сомнений в том, что в Тихом океане изменения температуры воды вблизи океанского дна, связанные космическим индексом J , происходят преимущественно на границах литосферных плит в зонах спрединга и субдукции, т.е. в районах активной вулканической и сейсмической деятельности. Пример по Тихому океану подтверждает гипотезу о влиянии эндогенного тепла Земли на температуру воды у океанского дна.

Еще три области выхода эндогенного тепла в океан в связи с космическими воздействиями обнаружили на самой Тихоокеанской плите вдали от ее границ. Одна из них лежит на Гавайском хребте (запаздывание 14 лет, отрицательная связь), вторая — у Срединно-Тихоокеанских гор (запаздывание 11 лет, положительная связь), а третья вблизи острова Таити (положительная связь, запаздывание 0, рис. 4). Перечисленные районы находятся вблизи известных горячих точек с выходами тепла от расположенных под ними плюмов. Известно, например, что под о. Гавайи действует горячая мантийная струя, которая пробивает астеносферу и литосферу [45].

Полученные результаты подтверждают гипотезу о связи выходов мантийного тепла с барицентрическим вращением Солнечной системы в тех районах, в которых сложились благоприятные условия для этого, т.е. на границах литосферных плит. Иначе говоря, активизация вулканов и выходы эндогенного тепла в океан в какой-то мере регулируется внешними силами, возникающими при неравномерном барицентрическом вращении Солнечной системы. Этот вывод может иметь прогностическое значение.

На примере данных в районе Гавайских островов в узле с координатами 13° с.ш., 177° з.д. анализировалось распространение эндогенного тепла по вертикали. Оказалось, что изменения температуры на нижнем горизонте 5051 м оказывают влияние на температуру вышележащих горизонтов в слое около 2 км. Выше связь теряется. При этом важно отметить, что рассматриваемые изменения температуры возникают именно у океанского дна, а не приходят сверху. Далее действуют горизонтальные и вертикальные течения океана, которые могут выносить эндогенное тепло на поверхность в районах, удаленных от узла первоначальной фиксации выхода тепла из земной коры в океан. Описание горизонтального и вертикального переноса эндогенного тепла в Мировом океане является отдельной большой задачей.

Аналогичные результаты по выявлению узлов выхода эндогенного тепла получены по акватории Атлантического океана (рис. 6). Наиболее обширным районом тесных связей температуры воды у океанского дна с индексом барицентрического вращения оказалась область, которая начинается в проливе Дрейка и продолжается в море Уэдделла на стыке Тихоокеанской, Южно-Американской и Антарктической литосферных плит. Связи положительные, запаздывание температурного отклика составляет в этих районах 9—13 лет.

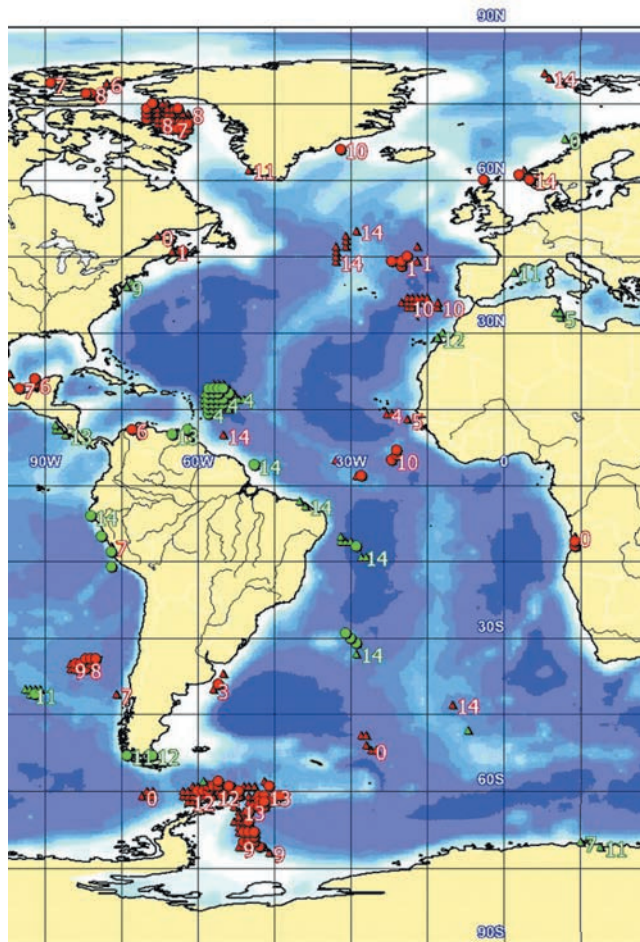


Рис. 6. Узлы тесных связей со значимыми ($p > 95\%$) коэффициентами корреляции r между температурой воды на нижнем горизонте (ближайший ко дну горизонт) и индексом J . Атлантический океан.

Обозначения: кружки красные ($r > 0,65$), треугольники красные ($r > 0,60$), кружки зеленые ($r < -0,65$), треугольники зеленые ($r < -0,60$).

Fig. 6. Nodes of close connections with significant ($p > 95\%$) correlation coefficients r between the water temperature at the lower horizon (the nearest bottom horizon) and the index J . Atlantic Ocean.

Symbols: red circles ($r > 0,65$), red triangles ($r > 0,60$), green circles ($r < -0,65$), green triangles ($r < -0,60$).

Обширная область отрицательных связей обнаружилась в районе океанического жёлоба около островной дуги Малых Антильских островов и около побережья Южной Америки. Запаздывание 3—4 года. Желоб расположен в месте

соприкосновения Южно-Американской плиты с Сандвичевой плитой, рассматриваемой вместе с плитой Скоша. Район вдоль этой островной дуги к юго-востоку от Пуэрто-Рико до побережья Южной Америки известен своей вулканической активностью.

В высоких широтах Северного полушария обнаружилась обширная область положительных связей с запаздыванием 6—8 лет в море Баффина вблизи Гренландии. На широте 40° с.ш. срединно-океанический хребет образует Азорское вулканическое плато, с многочисленными надводными и подводными действующими вулканами. В этом районе находится тройное сочленение рифтовых зон с ответвлением от Северо-Атлантического хребта, которое протягивается в сторону Гибралтарского пролива. Здесь обнаружено три небольших района тесных положительных связей с разным временем запаздывания: 1, 10 и 14 лет. Это районы вблизи Азорских островов, островов Мадейра и Канарских островов. Еще южнее связи обнаружены вблизи островов Зеленого мыса. Все перечисленные районы сохраняют вулканическую активность, а сами острова имеют вулканическое происхождение [46].

В районе экватора обнаружено два района тесных положительных связей на Срединно-Атлантическом хребте и один у побережья Африки. Две небольшие области отрицательных связей обнаружены на плато Риу-Гранди и на острове Триндади с запаздыванием 14 лет. Триндади — это небольшой остров в цепи подводных вулканов Атлантического океана. На Южно-Атлантическом хребте тесные связи обнаружены только вблизи острова Гоф. Острова-вулканы на этом хребте встречаются сравнительно редко, возможно, поэтому там больше не обнаружено тесных связей глубинной температуры с индексом барицентрического вращения Солнечной системы.

В Средиземноморско-Индонезийском вулканическом поясе наиболее обширные области тесных связей оказались в Индийском океане (рис. 7).

В Индийском океане узлы с выходами эндогенного тепла обнаружены на границе Африканской и Индо-Австралийской плит, на границе Индо-Австралийской и Евроазиатской плит и в других местах вблизи островов вулканического происхождения.

Отрицательные связи с запаздыванием 5—6 лет обнаружили на севере заливов Заманского и Бенгальского, южнее залива на хребте Карсберг, а также вблизи Мальдивских, Андаманских и Никобарских островов. Еще южнее узлы с тесными отрицательными связями с запаздыванием 7—9 лет оказались на Центрально-Индийском хребте. А в проливе Мозамбикский, в Мозамбикской котловине связи оказались положительными с запаздыванием 6—7 лет. Еще южнее — вблизи островов принца Эдуарда и островов Крозе — связи отрицательные с запаздыванием 12—13 лет.

В Западно-Австралийской котловине отрицательные связи обнаружены в узлах вблизи Кокосовых островов и острова Рождества. В Средиземном море выявлено два района, в которых эндогенное тепло циклически подогревает воду в связи с динамическими возмущениями Земли силами барицентрического вращения Солнечной системы.

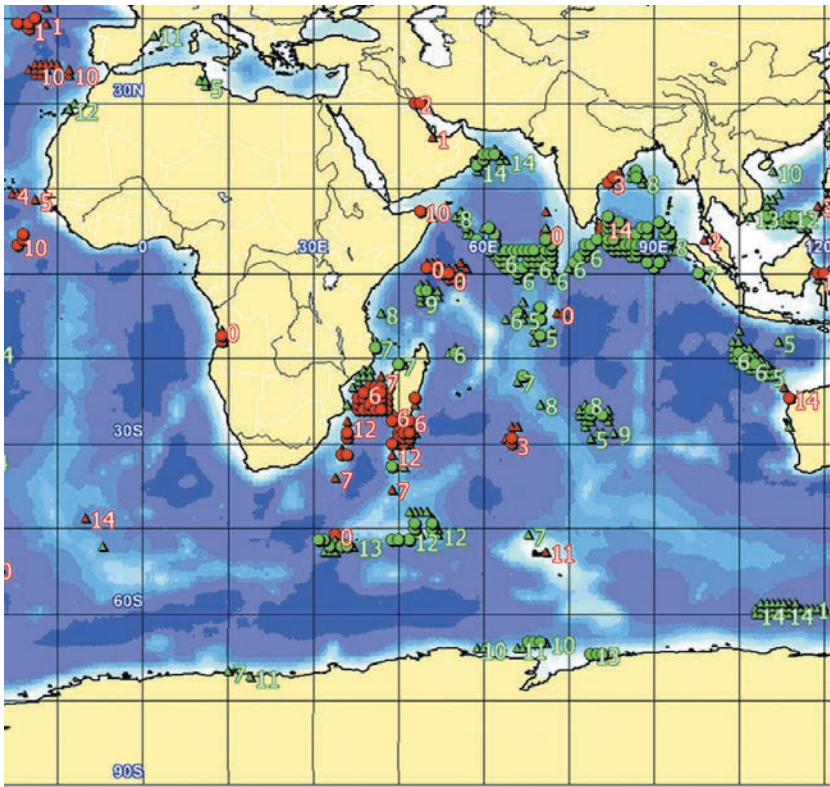


Рис. 7. Узлы тесных связей со значимыми ($p > 95\%$) коэффициентами корреляции r между температурой воды на нижнем горизонте (ближайший ко дну горизонт) и индексом J . Индийский океан.

Обозначения: кружки красные ($r > 0,65$), треугольники красные ($r > 0,60$), кружки зеленые ($r < -0,65$), треугольники зеленые ($r < -0,60$).

Fig. 7. Nodes of close connections with significant ($p > 95\%$) correlation coefficients r between the water temperature at the lower horizon (the nearest bottom horizon) and the index J . Indian Ocean.

Symbols: red circles ($r > 0,65$), red triangles ($r > 0,60$), green circles ($r < -0,65$), green triangles ($r < -0,60$).

Обнаруженные связи подтвердили, что в результате барицентрического вращения Солнечной системы могут возникать циклические выходы эндогенных тепловых потоков в океан, приводящие к изменениям температуры воды вблизи дна океана преимущественно на границах литосферных плит. Из этого следует вывод о том, что излучение Солнца не единственный источник тепла на Земле, эндогенное тепло также вносит вклад в тепловой баланс планеты. Еще предстоит получить количественную оценку этого вклада, но уже известно, что выход мантийного тепла в океан и его цикличность модулируется небесной механикой.

Заключение

На все три вопроса, поставленных в вводной части статьи, получены положительные ответы.

Подтверждены накопленные ранее сведения о возможности выхода аномально высоких значений потоков *эндогенного* тепла на поверхность земной коры на дне океана в местах расположения океанических хребтов с рифтовыми долинами и с островами вулканического происхождения.

Выходы эндогенного тепла в климатическую систему (в океан) модулируются циклическими космическими возмущениями вынужденного движения Земли вслед за движением Солнца вокруг барицентра Солнечной системы. В Мировом океане выходы мантийного тепла на границах литосферных плит и в горячих точках оказались в тесной зависимости от воздействий на Землю сил, возникающих при неравномерном барицентрическом вращении Солнечной системы.

Наличие указанной зависимости подтверждает исходную гипотезу о заметном вкладе эндогенного тепла Земли в температуру воды у океанского дна. Это означает, что Солнце не единственный источник тепла в климатической системе. Эндогенное тепло вносит свой вклад в изменения температуры океана, но еще предстоит количественно оценить вклад небесной механики в эти изменения и вклад выявленных изменений температуры вод океана в колебания глобального климата.

Наибольшее количество узлов с выходами эндогенного тепла оказалось в Тихом океане во всей полосе Тихоокеанского вулканического «огненного кольца» и в Средиземноморско-Индонезийском вулканическом поясе. Это районы с условиями рельефа океанического дна наиболее благоприятными для выхода мантийного тепла на поверхность.

У антропогенной парниковой гипотезы о причине современного глобального потепления климата появился серьезный конкурент, действующий в рамках фундаментальных законов Солнечной системы.

Список литературы

1. 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. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge. UK and New York. NY. USA. 3056. doi: 10.1017/9781009325844.
2. Шерстюков Б. Г. Колебательная система климата, резонансы, дальние связи, прогнозы. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2021. 222 с.
3. 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.
4. Малинин В. Н., Вайновский П. А. Влагообмен между океаном и атмосферой во внутритропической зоне конвергенции // Гидрометеорология и экология. 2021. Вып. 63. С. 255—278. doi:10.33933/2713-3001-2021-63-255-278.
5. Малинин В. Н., Вайновский П. А. Тренды компонент влагообмена в системе «океан—атмосфера» в условиях глобального потепления по данным архива Reanalysis-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 3. С. 9—25. doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-9-25.

6. Малинин В. Н., Вайновский П. А. О межгодовой изменчивости наиболее интенсивных очагов источников и стока CO_2 в океане на основе данных наблюдений // Гидрометеорология и экология. 2022. № 66. С. 51—69. doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-51-70.
7. Кондратьев К. Я. Изменения глобального климата: нерешенные проблемы // Метеорология и гидрология. 2004. № 6. С. 118—127.
8. Демирчян К. С., Кондратьев К. Я., Демирчян К. К. Глобальное потепление и «политика» его предотвращения // Биосфера. 2010. Т. 2. № 4. С. 488—502.
9. Жеребцов Г. А., Коваленко В. А., Молодых С. И., Рубцова О. А. Закономерности климатических изменений в XX в. и основные физические процессы, ответственные за эти изменения // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2011. Т. 4, № 1. С. 87—108.
10. Лисицын А. П., Политова Н. В., Шевченко В. П. XXI Международная научная конференция (школа) «Геология морей и океанов» // Океанология. 2016. Т. 56, № 6. С. 972—974.
11. Нигматуллин Р. И. Климат и океан. Отчет о заседании Президиума Российской академии наук 10.03.2015. Информация с портала «Научная Россия». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://scientificrussia.ru/articles/globaljпое-poholodanie>. Дата обращения: 01.12.2022.
12. Котляков В. М. О причинах и следствиях современных изменений климата // Солнечно-Земная физика. 2012. Вып. 21. С. 110—114.
13. Монин А. С., Сонечкин Д. М. Колебания климата по данным наблюдений. Тройной солнечный и другие циклы. М.: Наука, 2005. 190 с.
14. Логинов В. Ф. Космические факторы климатических изменений. Минск, 2020. 168 с.
15. Федоров В. М., Алтунин И. В., Фролов Д. М. Влияние диоксида углерода антропогенного генезиса на термический режим атмосферы и его изменения // Жизнь Земли. 2022. Вып. 44(4). С. 402—414.
16. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М. Л.: ГОНТИ ТТЛ, 1939. 207 с.
17. Бялко А. В. Палеоклимат: дополнения к теории Миланковича // Природа. 2009. №12. С. 18—28.
18. Budyko M. I. Effect of solar radiation variation on climate of Earth // Tellus : journal. 1969. Vol. 21, № 5. P. 611—619.
19. Короновский Н. В. Общая геология: учебник / Н. В. Короновский. — М.: КДУ, 2006. 528 с.
20. Клиге Р. К., Школьный Д. И. Изменение режима поверхностных вод гидросферы // Сложные системы. № 3 (20). 2016. С.4—17.
21. Сывороткин В. Л. Дегазационная концепция глобальных катастроф: основные положения, новые результаты // Вопросы географии. 2019. Сб. 149. Современное землеведение. С. 36—70.
22. Маракушев А. А. Природа сильного потепления в меловой период эволюции Земли // Вестник РАН. 2010. Т. 80. № 3. С. 270—272.
23. Сывороткин В. Л. Глубинная дегазация в полярных регионах планеты и климатические изменения // Актуальные проблемы нефти и газа. Вып. 4(23). 2018. С.1—5.
24. Сывороткин В. Л. Глубинная дегазация земли как фактор температурного воздействия на атмосферу // Нефтяная провинция. 2022. № 1(29). С. 33—48. DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2022.1.33-48>.
25. Шароглазова Г. А. Тектоника литосферных плит в очагах крупнейших землетрясений и результаты геодезических измерений // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. № 2. 2023. С. 84—91. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-34-2-84-91.
26. Гамбурцев А. Г., Гамбурцева Н. Г. Извержения вулканов // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 2. М.: Наука. 1998. С. 140—142.
27. Хизен Б., Фокс П. Д. Срединно-океанический хребет // Океанографическая энциклопедия. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. С. 495—505.
28. Деменцкая Р. М. Кора и мантия Земли. М.: Недра, 1975. 255 с.
29. Иванов В. В., Кононов В. И. Проблемы генезиса терм регионов активного вулканизма // Известия АН СССР. Сер. Геол. 1977. № 11. С. 35—43.
30. Spiess F. N., Macdonald K. C., Atwater T. et al. East Pacific Rise. Hot Springs and Geophysical Experiments // Science. 1980. Vol. 207, N. 4438. P. 231—242.

31. Осика Д. Г., Алишаев М. Г., Пономарёва Н. Л., Отинова А. Ю. О роли сейсмичности и вулканизма в парадоксах современного климата // Вестник Дагестанского научного центра. 2011. № 43. С. 27–32.
32. Смольков Г. Я., Базаржапов А. Д., Петрухин В. Ф., Щепкина В. Л. Геофизические последствия гравитационного воздействия на Землю // Солнечно-земная физика. 2013. Вып. 23. С. 129–135.
33. Баркин Ю. В., Клиге Р. К. Объяснение эндогенной активности планет и спутников и её цикличности // Известия РАЕН. Секция наук о Земле. 2002. № 9. С. 45–97.
34. Баркин Ю. В., Клиге Р. К. Гравитационные воздействия гелиокосмических факторов на эндогенную активность Земли // Современные глобальные изменения природной среды. Т. 3: Факторы глобальных изменений. М.: Научный мир, 2012. С. 46–61.
35. Осика Д. Г., Отинова А. Ю., Пономарёва Н. Л. О природе глобального потепления и естественных причинах формирования климатических аномалий и катастроф // Аридные экосистемы, 2013, т. 19, № 4 (57), с. 104–112.
36. Good S. A., Martin M. J. and. Rayner N. A. Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates // Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013. EN4. P. 6704–6716. doi:10.1002/2013JC009067.
37. Gouretski V., Reseghetti F. On depth and temperature biases in bathythermograph data: development of a new correction scheme based on analysis of a global ocean database. Deep-Sea Research I. 2010. 57(6). doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2010.03.011.
38. Boyer T. P., Antonov J. I., Baranova O. K., et al. World Ocean Database 2013. Sydney Levitus, Ed.; Alexey Mishonov, Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS. 72, 209 pp. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD13>. Дата обращения: 31.05.2023.
39. GTSP; U.S. National Oceanographic Data Center: Global Temperature–Salinity Profile Programme. June 2006. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Oceanographic Data Center, Silver Spring, Maryland, 20910]. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nodc.noaa.gov/GTSP/>. Дата обращения: 31.05.2023.
40. Wong, A. P. S., et al. (2020). Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats, *Frontiers in Marine Science*, 2020. 7(700). doi: <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>
41. Broecker W. S. The great ocean conveyor // *Oceanography*. 1991. Vol. 4(2). P. 79–89. doi: 10.5670/oceanog.1991.07.
42. Шерстюков Б. Г. Динамическая синхронизация колебаний климата океана с барицентрическим движением Солнца // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2021. №3. 380–391. <https://doi.org/10.31857/S2587556621030146>.
43. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной астрономии Российской академии наук. Санкт-Петербург. Онлайн-служба эфемерид [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://iaaras.ru/dept/ephemeris/online/>. Дата обращения: 31.01.2024.
44. Хайн В. Е., Ломизе М. Г. Геотектоника с основами геодинамики, М. КДУ, 2005. 560 с.
45. Мохнач М. Ф., Прокофьева Т. И. Геология. Книга 2. Геодинамика. Учебник. СПб.: изд. РГГМУ, 2011. 280 с.
46. Герасимов И. П. Вопросы, которые ставит геоморфология Азорских островов // Геоморфология. 1978. №1. С.3–15.

References

1. 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 University Press. Cambridge University Press, Cambridge. UK and New York. NY. USA. 3056. doi: 10.1017/9781009325844.
2. Sherstyukov B. G. *Kolebatel'naya sistema klimata, rezonansy, dal'niye svyazi, prognozy = Vibrational climate system, resonances, long-distance communications, forecasts*. Obninsk: RIHMI-WDC, 2021:222 p. (In Russ.).

3. Sherstyukov B. G. Global warming and its possible causes. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2023; (70):(7—37). (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-70-7-37.
4. Malinin V. N., Vainovsky P. A. Moisture exchange between the ocean and the atmosphere in the intratropical convergence zone. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2021;(63): (255—278). (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-255-278.
5. Malinin V. N., Vainovsky P. A. Trends in moisture exchange components in the “ocean-atmosphere” system under global warming according to the Reanalysis-2 archive. *Sovremennyye problemy distantzionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2021; 18(3): (9—25). (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-9-25.
6. Malinin V. N., Vainovsky P. A. On the interannual variability of the most intense sources and sinks of CO₂ in the ocean based on observational data. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2022; (66): (51—70). (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-51-70.
7. Kondratiev K. Ya. Global climate change: unsolved problems. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2004;(6):(118—127). (In Russ.).
8. Demirchyan K. S., Kondratiev K. Ya., Demirchyan K. K. Global warming and the “policy” of its prevention. *Mezhdistsiplinarnyy i nauchnyy i prikladnoy zhurnal «Biosfera» = Interdisciplinary and scientific and applied journal “Biosphere”*. 2010;2(4):(488—502). (In Russ.).
9. Zherebtsov G. A., Kovalenko V. A., Molodykh S. I., Rubtsova O. A. Patterns of climate change in the 20th century. and the main physical processes responsible for these changes. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle» = Izvestia of the Irkutsk State University. Earth Sciences series*. 2011;4(1):(87—108). (In Russ.).
10. Lisitsyn A. P., Politova N. V., Shevchenko V. P. XXI International scientific conference (school) “Geology of the seas and oceans”. *Okeanologiya = Oceanology*. 2016;56(6):(972—974). (In Russ.).
11. Nigmatullin R. I. Climate and ocean. Otchet o zasedanii Prezidiuma Rossiyskoy akademii nauk 10.03.2015. *Portal «Nauchnaya Rossiya» = Portal “Scientific Russia”*. Available at: <https://scientificrussia.ru/articles/globaljnoe-poholodanie> (accessed 1.12.2022). (In Russ.).
12. Kotlyakov V. M. On the causes and consequences of modern climate change. *Solnechno-Zemnaya fizika = Solar-Terrestrial Physics*. 2012;(21):(110—114). (In Russ.).
13. Monin A. S., Sonechkin D. M. *Kolebaniya klimata po dannym nablyudeniy. Troynoy solnechnyy i drugiy tsikly = Climate fluctuations according to observations. Triple solar and other cycles*. Moscow: Nauka, 2005: 190 p. (In Russ.).
14. Loginov V. F. *Kosmicheskiye faktory klimaticheskikh izmeneniy = Cosmic factors of climate change*. Minsk, 2020: 168 p. (In Russ.).
15. Fedorov V. M., Altunin I. V., Frolov D. M. Influence of anthropogenic carbon dioxide on the thermal regime of the atmosphere and its changes. *Zhizn' Zemli = Life of the Earth*. 2022;44(4):(402—414). (In Russ.).
16. Milankovic M. *Matematicheskaya klimatologiya i astronomicheskaya teoriya kolebaniy klimata = Mathematical climatology and astronomical theory of climate fluctuations*. Moscow- Leningrad.: GONTI TTL, 1939: 207 p. (In Russ.).
17. Byalko A. V. Relaxation theory of climate. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Advances in the physical sciences*. 2012;182(1): (111—116). doi: 10.3367/UFNr.0182.201201h.0111. (In Russ.)
18. Budyko M. I. Effect of solar radiation variation on climate of Earth // *Tellus: journal*. 1969;(21):(5):(611—619).
19. Koronovsky N. V. *Obshchaya geologiya: uchebnik = General geology: textbook*. M.: KDU, 2006. 528 p. (In Russ.).
20. Kliege R. K., Shkolny D. I. Changes in the regime of surface waters of the hydrosphere. *Slozhnyye sistem = Complex systems*. 2016;3(20):(4—17). (In Russ.).
21. Syvorotkin V. L. Degassing concept of global disasters: basic provisions, new results. *Voprosy geografii = Questions of geography*. 2019;(149):(36—70). (In Russ.).
22. Marakushev A. A. The nature of strong warming during the Cretaceous period of Earth’s evolution. *Vestnik RAN = Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2010;(80):(3):(270—272). (In Russ.).
23. Syvorotkin V. L. Deep degassing in the polar regions of the planet and climate change. *Aktual'nyye problemy nefi i gaza = Current problems of oil and gas*. 2018;4(23):(1—5). (In Russ.).

24. Syvorotkin V. L. Deep degassing of the earth as a factor of temperature impact on the atmosphere. *Neftyanaya provintsiya = Oil Province*. 2022;1(29):(33—48). DOI:<https://doi.org/10.25689/NP.2022.1.33-48>. (In Russ.).
25. Sharoglazova G. A. Tectonics of lithospheric plates in the foci of major earthquakes and the results of geodetic measurements. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Polotsk State University*. Series F. 2023;(2):(84—91). (In Russ.). DOI: 10.52928/2070-1683-2023-34-2-84-91.
26. Gamburtsev A. G., Gamburtseva N. G. Volcanic eruptions. *Atlas vremennykh variatsiy prirodnykh, antropogennykh i sotsial'nykh protsessov T. 2 = Atlas of temporal variations in natural, anthropogenic and social processes. V.2*. M.: Nature, 1998;(140—142). (In Russ.).
27. Heesen B., Fox P. D. Mid-ocean ridge In the book. *Okeanograficheskaya entsiklopediya = Oceanographic Encyclopedia*. L.: Gidrometeoizdat, 1974: (495—505). (In Russ.).
28. Demenitskaya R. M. *Kora i mantiya Zemli = Earth's crust and mantle*. M.: Nedra, 1975: 255 p. (In Russ.).
29. Ivanov V. V., Kononov V. I. Problems of the genesis of thermal baths in regions of active volcanism. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Geol. = Izvestia. Academy of Sciences of the USSR. Ser. Geol.* 1977;(11):(35—43). (In Russ.).
30. Spiess F. N., Macdonald K. C., Atwater T., Ballard R., et al. East Pacific Rise. Hot Springs and Geophysical Experiments. *Science*. 1980: 207: 4438:(231—242).
31. Osika D. G., Alishaev M. G., Ponomareva N.L., Otinova A.Yu. On the role of seismicity and volcanism in the paradoxes of modern climate. *Vestnik Dagestanskogo nauchnogo tsentra = Bulletin of the Dagestan Scientific Center*. 2011;43:(27—32). (In Russ.).
32. Smolkov G. Ya., Bazarzhapov A. D., Petrukhin V. F., Shchepkina V. L. Geophysical consequences of gravitational influence on the Earth. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-terrestrial physics*. 2013;(23): (129—135). (In Russ.).
33. Barkin Yu. V., Kliege R. K. Explanation of the endogenous activity of planets and satellites and its cyclicity. *Izvestiya RAYEN. Sektsiya nauk o Zemle = Proceedings of the Russian Academy of Natural Sciences. Section of Geosciences*. 2002;(9):(45—97). (In Russ.).
34. Barkin Yu. V., Kliege R. K. Gravitational influences of heliocosmic factors on the endogenous activity of the Earth. Modern global changes in the natural environment. T. 3: Factors of global change. M.: *Nauchnyy mir = Scientific world*. 2012: (46—61). (In Russ.).
35. Osika D. G., Otinova A. Yu., Ponomareva N. L. On the nature of global warming and the natural causes of the formation of climate anomalies and disasters. *Aridnyye ekosistemy = Arid ecosystems*. 2013;4 (57):(104—112). (In Russ.).
36. Good S. A., Martin M. J., Rayner N. A. EN4: quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates, *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013; EN4. (6704—6716). doi:10.1002/2013JC009067.
37. Gouretski V., Reseghetti F. On depth and temperature biases in bathythermograph data: development of a new correction scheme based on analysis of a global ocean database. *Deep-Sea Research I*, 2010;(57):(6). doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2010.03.011>.
38. Boyer T. P., Antonov J. I., Baranova O. K., et al. *World Ocean Database 2013*. Sydney Levitus, Ed.; Alexey Mishonov, Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 72, 209 pp. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD13>. Дата обращения: 31.05.2023.
39. GTSPP; U.S. National Oceanographic Data Center: Global Temperature–Salinity Profile Programme. June 2006. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Oceanographic Data Center, Silver Spring, Maryland, 20910]. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nodc.noaa.gov/GTSPP/>. Дата обращения: 31.05.2023.
40. Wong A. P. S., et al. (2020), Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats, *Frontiers in Marine Science*, 7(700), doi: <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>
41. Broecker W. S. The great ocean conveyor // *Oceanography*. 1991; 4(2):(79—89). doi: 10.5670/oceanog.1991.07.
42. Sherstyukov B. G. Dynamic synchronization of ocean climate fluctuations with barycentric motion of the Sun. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographic series*. 2021;85(3):(380—391). doi: 10.31857/S2587556621030146. (In Russ.).

43. *Federal'noye gosudarstvennoye byudzhethnoye uchrezhdeniye nauki Institut prikladnoy astronomii Rossiyskoy akademii nauk. Sankt-Peterburg. Onlayn-sluzhba efemerid =Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences. Saint Petersburg. Online ephemeris service. Available at: <https://iaaras.ru/dept/ephemeris/online/>. Accessed on: 31.01.2024.*
44. Hain V. E., Lomize M. G. *Geotektonika s osnovami geodinamiki = Geotectonics with the basics of geodynamics*. M.: KDU:2005: 560 p. (In Russ.).
45. Mokhnach M. F., Prokofieva T. I. *Geologiya. Kniga 2. Geodinamika. Uchebnik = Geology. Book 2. Geodynamics. Textbook*. Saint Petersburg: RGGMU, 2011: 280 p. (In Russ.).
46. Gerasimov I. P. Questions posed by the geomorphology of the Azores. *Geomorfologiya = Geomorphology*. 1978;(1):(3—15). (In Russ.).

Информация об авторах

Борис Георгиевич Шерстюков, доктор географических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, Лаборатория исследования последствий изменения климата, заведующий лабораторией, boris_sher@mail.ru.

Артём Борисович Шерстюков, кандидат географических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, Лаборатория исследования последствий изменения климата, старший научный сотрудник, artem@meteo.ru.

Information about authors

Boris Georgievich Sherstyukov, Doctor of Geographical Sciences, Senior Researcher, Federal State Budgetary Institution “All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Center, Laboratory for researching the consequences of climate change, Head laboratory, boris_sher@mail.ru.

Artem Borisovich Sherstiukov, Candidate of Geographical Sciences, Federal State Budgetary Institution “All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Center, Laboratory for researching the consequences of climate change, senior researcher, artem@meteo.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 14.03.2024

Принята к печати после доработки 14.05.2024

The article was received on 14.03.2024

The article was accepted after revision on 14.05.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 234—250.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(75):234—250.

Научная статья
УДК [551.594:911.5](571)
doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-234-250

**Сравнительный анализ
изменчивости невозмущённого электрического поля
в горных и степных ландшафтах на юге Сибири
по данным экспедиционных измерений**

**Константин Николаевич Пустовалов^{1, 2},
Пётр Михайлович Нагорский¹, Мария Викторовна Оглезнева¹,
Артыш Алашович Сат¹, Сергей Васильевич Смирнов^{1, 2}**

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия, const.pv@yandex.ru

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

Аннотация. По данным экспедиционных измерений на юге Сибири (Хакасия, Тыва, Бурятия, Республика Алтай и Алтайский край) проведён анализ изменчивости электрического поля в приземном слое в электрически невозмущённых атмосферных условиях (условия «хорошей погоды»). Полученные оценки показали увеличение средних значений градиента потенциала при повышении абсолютной высоты местности, а также влияние на них форм рельефа и локальных условий окружающей среды. Проведён сравнительный анализ изменчивости градиента потенциала электрического поля в степных и горных ландшафтах в целом за весь период, а также его суточных вариаций. Отмечена высокая корреляция суточной изменчивости градиента потенциала в различных частях Южной Сибири. Выделены два вида суточного хода градиента потенциала на территории исследования.

Ключевые слова: атмосферное электричество, атмосферное электрическое поле, градиент потенциала, условия «хорошей погоды», кривая Карнеги, Сибирь.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН, проект FWRG-2021-0001 (номер госрегистрации 121031300154-1).

Для цитирования: Пустовалов К. Н., Нагорский П. М., Оглезнева М. В., Сат А. А., Смирнов С. В. Сравнительный анализ изменчивости невозмущённого электрического поля в горных и степных ландшафтах на юге Сибири по данным экспедиционных измерений // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 234—250. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-234-250.

Original article

Variability of the undisturbed electric field and the factors influencing it in mountain and steppe landscapes in southern Siberia based on the expedition study

*Konstantin N. Pustovalov^{1,2}, Petr M. Nagorskiy¹,
Mariya V. Oglezneva¹, Artysh A. Sat¹,
Sergei V. Smirnov^{1,2}*

¹ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of SB RAS, Tomsk, Russia, const.pv@yandex.ru

² National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Summary. To study the functioning of the GEC, monitoring and analysis of the variability of atmospheric-electrical quantities in different regions of the Earth is necessary. The organization of regular observation points in the Asian part of Russia is complicated by their inaccessibility. Unfortunately, due to the rare observation network, the variability of atmospheric-electrical quantities in this region remains insufficiently studied today. In this regard, expeditionary observations remain the main way to study them. Instrumental measurements of potential gradient were carried out at different altitude above sea level and on different forms of landscapes. For measurements at each of the observation sites, open homogeneous areas with a landscape characteristic of the area, not subject to anthropogenic impact, were selected. Observations at each site ranged from 2 to 9 days. Potential gradient was measured using a portable electric field mill EFS-2/50 (NTCR, Russia). The field mill was preliminarily calibrated using a calibration stand (plate capacitor) and brought to the readings of electric field mill CS110 (Campbell Scientific, USA) operating in the monitoring mode at the geophysical observatory of IMCES SB RAS. Also, we measured main meteorological quantities, and monitored cloud cover and atmospheric phenomena. As a result, the main statistical characteristics of potential gradient variability at observation points under conditions of an electrically undisturbed atmosphere were obtained. At expedition observation points, the main potential gradient maximum is observed after noon (01—05 PM), and the main minimum is observed after midnight (00—02 AM). In addition, in the pre-dawn hours (03—04 AM) and during dawn (05—07 AM) secondary maximums and minimums are observed, respectively. There is good agreement in the diurnal cycle of potential gradient in electrically undisturbed atmospheric conditions at expedition observation points 2, 4, 5, 6, 8 and 10 (correlation coefficient is 0,5–0,9). It is noted that with an increase in the absolute height of the terrain, there is an increase in the average (median) potential gradient values. This dependence is clearly evident both on the territory of the Republic of Tyva, the Republic of Buryatia, as well as the Republic of Altai and Altai Krai. Also, the shape of the terrain can influence on potential gradient values. There is an excess of potential gradient on convex forms of terrain, and its decrease near base of convex forms and on concave forms of terrain compared to a flat surface. Finally, we can note another important factor that influences the potential gradient in electrically undisturbed atmospheric conditions — local environmental conditions (air humidity, aerosol, background radiation and other factors).

Keywords: atmospheric electricity, atmospheric electric field, potential gradient, fair-weather condition, Carnegie curve, Siberia.

Acknowledgments: This research is supported by the Russian Science Foundation (Russia), project No.22-27-00482, <https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00482>.

For citation: Pustovalov K., Nagorskiy P., Oglezneva M., Sat A., Smirnov S. Variability of the undisturbed electric field and the factors influencing it in mountain and steppe landscapes in southern Siberia based on the expedition study. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(75):234—250. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-234-250.

Введение

Измерения основных атмосферно-электрических величин в приземном слое дают информацию как о состоянии и изменчивости атмосферного электрического поля *in situ*, так и о функционировании всей глобальной электрической цепи (ГЭЦ) [1—3]. Средняя суточная вариация электрического поля (унитарная вариация), которая соответствует универсальному времени и не зависит от места измерения, представляет собой глобальный ежедневный вклад электрической активности в районах нарушенной погоды [4]. При этом вклад региональных и локальных факторов может существенно влиять на изменчивость атмосферно-электрических величин [5—10]. Поскольку электрическое состояние атмосферы может сильно меняться из-за различных природных и антропогенных факторов, то для изучения функционирования ГЭЦ необходим мониторинг и анализ изменчивости атмосферно-электрических величин в различных регионах Земли [11].

Изменчивость атмосферно-электрических величин в азиатской части России на сегодняшний день остаётся слабо изученной. На огромной территории Сибири и Дальнего Востока регулярные наблюдения за параметрами атмосферного электричества проводятся всего в 5 пунктах сети Росгидромет (г. Иркутск, г. Южно-Сахалинск, г. Диксон, г. Тикси и ст. Мыс Баранова) [12] и нескольких пунктах наблюдений НИИ РАН (г. Томск [13]; г. Якутск, г. Нерюнгри, г. Тикси, полигон Ойбенкель [14, 15]; с. Паратунка [16]). При этом пункты наблюдений расположены главным образом на равнинных территориях и побережьях морей. Кроме того, большинство из них находится вблизи населённых пунктов, влияние которых неизбежно сказывается на измеряемых величинах. Эпизодические наблюдения за атмосферным электрическим полем также проводятся ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» для наблюдений за вулканами [17].

Наименее изученными остаются горные районы континентальных частей Сибири и Дальнего Востока, имеющие сложный рельеф и геологическое строение, а также включающие различные природные зоны и типы ландшафтов. Организация пунктов регулярных наблюдений на этих территориях сопряжена с рядом трудностей из-за их труднодоступности и малонаселённости. В связи с этим основным способом их изучения остаются экспедиционные наблюдения.

Целью данной работы является оценка средних значений и типичной изменчивости атмосферного электрического поля в условиях «хорошей погоды» на типичных ландшафтах Южной Сибири по данным экспедиционных измерений, а также их сравнительный анализ.

Исходные материалы и методика исследований

Исследование основано на данных измерений градиента потенциала электрического поля ($\nabla\varphi = d\varphi/dz = -E_z$, где φ и E_z — потенциал и вертикальная компонента напряжённости электрического поля) в пунктах измерений в Южной Сибири. Экспедиционные работы проводились в июле—августе 2020 г., 2022 г. и 2023 г. в 10 пунктах наблюдений (ПН), расположенных на разных высотах и в различных



Рис. 1. Расположение пунктов наблюдений, представленных в табл. 1.

Fig. 1. Location of the observation sites presented in table. 1.

формах рельефа и ландшафтах (рис. 1, табл. 1) на территории Бурятии, Хакасии, Алтая и Тывы.

Таблица 1

Описание пунктов наблюдений
Description of observation sites

№ ПН	Район наблюдений	Широта, ° с. ш.	Долгота, ° в. д.	Абсолютная высота, м	Периоды наблюдений
1	Урочище Красная Сопка (Хакасия)	54,69	90,00	540	11–14.08.2022 г.
2	Урочище Шоль (Тыва)	51,49	94,40	910	1–6.08.2022 г.
3	Урочище Баян-Тала (Тыва)	51,09	93,53	1030	19–22.07.2022 г.
4	Массив Монгун-Тайга (Тыва)	50,35	89,95	2490	24–29.07.2022 г.
5	Тункинская котловина (Бурятия)	51,77	102,58	770	17–18.08.2020 г.
6	Тункинские гольцы (Бурятия)	51,95	102,44	1440	12–13.08.2020 г.
7	Мондинская котловина (Бурятия)	51,70	100,87	1380	10–11.08.2020 г.
8	Чуйская котловина (Респ. Алтай)	49,84	88,54	1930	9–16.07.2023 г.
9	Долина Катуня (Респ. Алтай)	50,98	86,27	550	18–23.07.2023 г.
10	Кулундинская равнина (Алтайский край)	53,17	79,55	130	12–20.08.2023 г.

ПН-1 (табл. 1) был размещен в урочище Красная сопка в Июско-Ширинской степи на водоразделе озёр Белё и Тус (Республика Хакасия, Ширинский район). ПН-2 находился в урочище Шоль в центре Центрально-Тувинской котловины (Республика Тыва, Тандинский кожуун), представленном полупустынным ландшафтом. ПН-3 был размещён в урочище Баян-Тала — степи, вблизи северного склона хр. Восточный Танну-Ола (Республика Тыва, Чеди-Хольский кожуун).

ПН-4 располагался на высокогорном плато, представленном горной тундрой и альпийскими лугами, вблизи горного массива Монгун-Тайга и оз. Хиндиктиг-Холь (Республика Тыва, Монгун-Тайгинский кожуун). ПН-5—ПН-7 были установлены в юго-западной части Байкальской рифтовой зоны (Республика Бурятия, Тункинский район), которая представляет собой серию котловин (с запада на восток: Мондинская, Хойтогольская, Туранская, Тункинская, Торская, Быстринская котловины), ограниченную с юга и севера хребтами Хамар-Дабан и Тункинские гольцы, соответственно. При этом ПН-5 находился в центральной части Тункинской котловины, ПН-6 — на отроге хребта Тункинские гольцы (южный склон), а ПН-7 — в западной части Мондинской котловины в верхнем течении р. Иркут. Местонахождение ПН-8 было определено центральной частью Чуйской котловины, представляющей собой полупустыню (Республика Алтай, Кош-Агачский район). ПН-9 находился на террасе на правом берегу р. Катунь в центре узкой V-образной горной долины (Республика Алтай, Чемальский район). ПН-10 располагался на нативном участке сухой степи Кулундинской равнины к северу от оз. Кулунда.

Экспедиционные работы в описанных выше пунктах проводились главным образом в антициклонических условиях, с которыми была связана ясная или малооблачная погода. Длительность измерений градиента потенциала электрического поля в каждом пункте определялась погодными условиями и составила от 2 до 9 суток (табл. 1).

Для проведения экспедиционных работ в каждом из пунктов выбирались открытые однородные участки, репрезентативные для значительной территории и мало подверженные антропогенному влиянию. Для регистрации $\nabla\phi$ использовался портативный флюксметр EFS-2/50 (ООО «НТЦР»), установленный на заземлённом штативе-треноге на высоте 2 м. Данный флюксметр был предварительно откалиброван с помощью калибровочного стенда (плоского конденсатора) и приведён к показаниям флюксметра CS110 (Campbell Scientific), работающего в режиме мониторинга в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН [13]. Регистрация $\nabla\phi$ выполнялась с временным разрешением 1 с. Расположение флюксметра в ПН представлено на рис. 2.

Кроме измерения $\nabla\phi$ в каждом из пунктов также производились параллельные измерения основных метеорологических величин и энергетической освещённости в УФ- и видимой областях с временным разрешением 1 мин, а также наблюдения за облачностью и атмосферными явлениями. В некоторых пунктах дополнительно измерялись характеристики естественного радиационного фона и содержания аэрозольных частиц ($PM_{2.5}$ и PM_{10}) в воздухе. В данной статье изменчивость этих величин рассматриваться не будет, так как это не входило в цель описываемого исследования.

Анализ экспериментальных данных заключался в проведении дескриптивно-корреляционно-регрессионного анализа изменчивости $\nabla\phi$ в пунктах наблюдений как для всех периодов наблюдений, так и для отдельных часовых интервалов. Если за периоды наблюдений отмечались интервалы времени с нарушением условий «хорошей погоды», то они исключались из анализа.

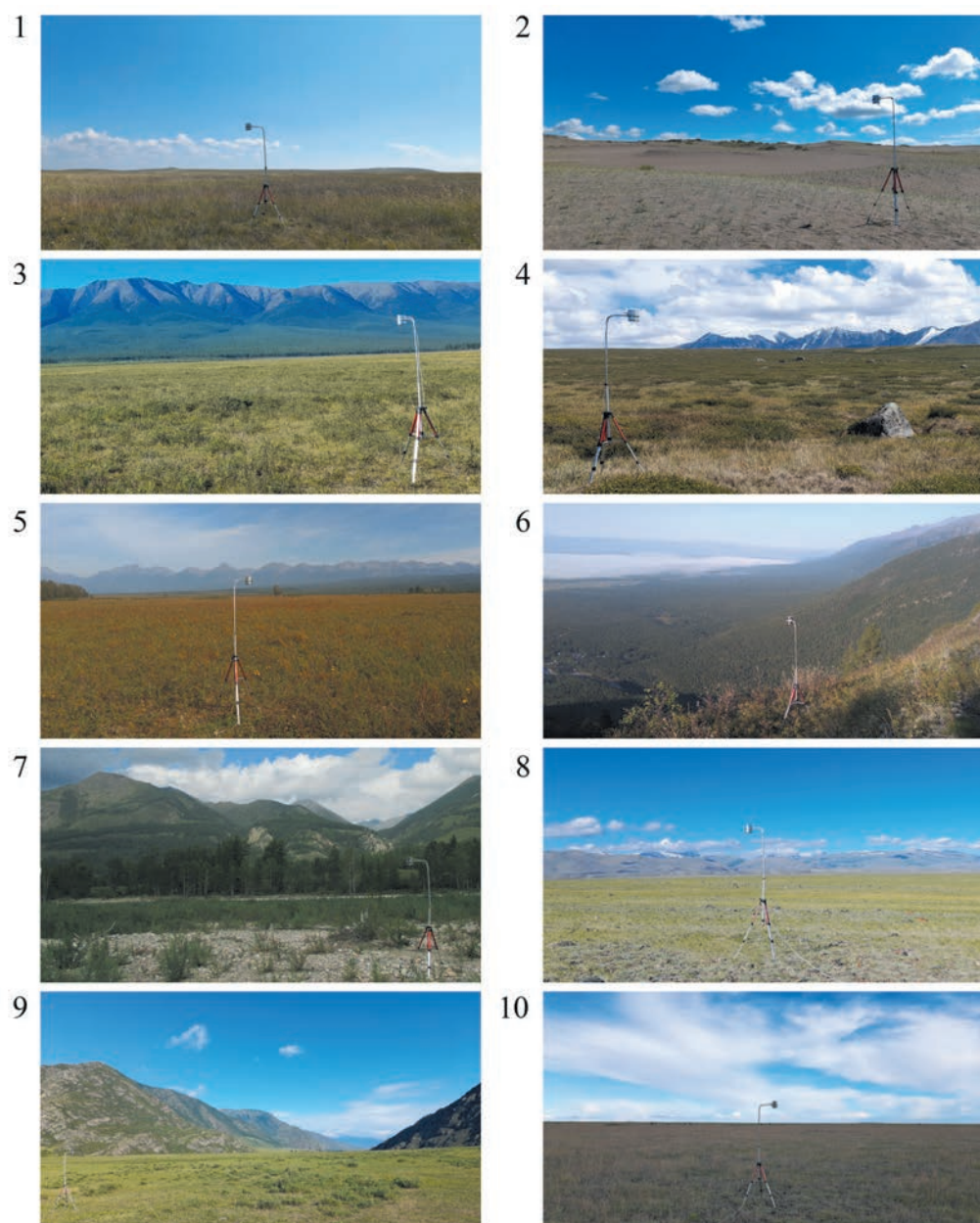


Рис. 2. Расположение флюксметра в пунктах наблюдений 1—10.

Fig. 2. Location of the field mill in the observation sites 1—10.

Результаты исследований

Перейдём к рассмотрению полученных результатов. Основные статистические характеристики изменчивости градиента потенциала электрического поля в пунктах наблюдений в условиях электрически невозмущённой атмосферы представлены в табл. 2, а их визуализация в виде квантильных диаграмм («ящичков с усами») — на рис. 3. При анализе результатов, представленных в табл. 2 и рис. 3, было отмечено следующее.

Таблица 2

Среднее арифметическое значение (M), среднеквадратическое отклонение (σ), медиана (Me), интерквартильное расстояние ($IQR = P_{75} - P_{25}$), а также значения, соответствующие 5-, 25-, 75- и 95-процентлям (P_5, P_{25}, P_{75} и P_{95}), для градиента потенциала электрического поля (В/м) в условиях «хорошей погоды» в пунктах наблюдений

Mean (M), standard deviation (σ), median (Me), interquartile range ($IQR = P_{75} - P_{25}$), and values corresponding to the 5th, 25th, 75th and 95th percentiles (P_5, P_{25}, P_{75} and P_{95}), of $\nabla\phi$ (V/m) under fair-weather conditions at observation sites

№ ПН	M	σ	Me	IQR	P_5	P_{25}	P_{75}	P_{95}
1	77	48	68	38	25	51	89	149
2	92	28	89	29	52	76	105	137
3	75	38	69	26	42	57	83	119
4	115	31	112	33	77	96	129	164
5	98	21	97	30	32	65	83	112
6	136	24	130	32	81	102	119	151
7	93	38	85	48	48	65	113	161
8	83	32	82	35	34	64	99	131
9	48	16	47	19	24	37	56	77
10	65	31	65	44	14	45	88	113

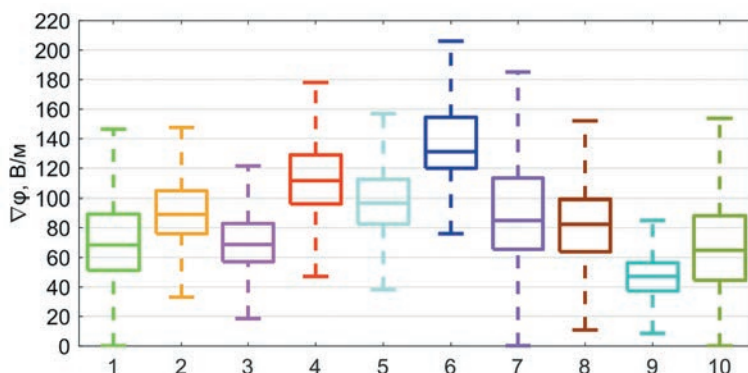


Рис. 3. Квантильные диаграммы (box-plot) для изменчивости градиента потенциала в условиях «хорошей погоды» в пунктах наблюдений 1—10.

Fig. 3. The box-plot quartile diagram of the variability of potential gradient under fair-weather conditions in the observation sites 1—10.

При увеличении абсолютной высоты местности отмечается увеличение средних (медианных) значений градиента потенциала. В частности, это видно из попарного сравнения медианных значений градиента потенциала в ПН-10 ($h = 130$ м н. у. м., $\nabla\varphi = 65$ В/м), ПН-1 ($h = 540$ м н. у. м., $\nabla\varphi = 68$ В/м), ПН-2 (910 м н. у. м., $\nabla\varphi = 89$ В/м), ПН-8 (1930 м н. у. м., $\nabla\varphi = 82$ В/м), ПН-4 (2490 м н. у. м., $\nabla\varphi = 110$ В/м). Все эти пункты расположены на относительно плоских участках местности с малой кривизной поверхности (на равнине, в центре обширных котловин, на плато). Подобная зависимость ранее отмечалась на Кавказе [8] и предположительно связана с изменением электрических характеристик столба атмосферы (электропроводности, сопротивления и других) при увеличении абсолютной высоты местности.

Кроме абсолютной высоты местности значительное влияние на градиент потенциала оказывает форма рельефа (кривизна поверхности). Так, для ПН-9, который находится в узкой горной долине (ущелье), характерны более низкие средние значения и небольшой размах градиента потенциала, чем для равнинной местности в ПН-10, несмотря на то, что его абсолютная высота на ~ 400 м выше, чем у последнего. Тот же эффект наблюдается в ПН-7, расположенном на ~ 600 м выше ПН-5, среднее значение $\nabla\varphi$ здесь ниже, чем в последнем. Оба пункта находятся в котловинах веретенообразной формы (в Тункинской и Мондинской соответственно), однако их ширина сильно отличается. Так, Тункинская котловина в центральной части имеет ширину (расстояние от хребта Тункинские гольцы до хребта Хамар-Дабан) около 40 км, в то время как ширина Мондинской котловины вблизи пункта составляет всего около 5 км. Похожая особенность отмечается для ПН-3 и ПН-2. В ПН-3, расположенном у подножья протяжённого горного хребта (Восточный Танну-Ола) с относительной высотой более 1500 м, средние значения $\nabla\varphi$ ниже, чем в ПН-2, находящемся на плоском дне обширной котловины (Тувинской), хотя его абсолютная высота на 100 м больше, чем у последнего. Противоположная ситуация отмечается при сравнении средних значений $\nabla\varphi$ в ПН-4 и ПН-6. В пункте 6 (отрог горного хребта) среднее значение $\nabla\varphi$ больше, чем в пункте 4 (высокогорное плато), хотя абсолютная высота хребта на 1000 м меньше, чем у плато. Указанные выше особенности можно объяснить влиянием кривизны поверхности на изменение напряжённости электрического поля (густоту силовых линий): по сравнению с плоской поверхностью выпуклые части рельефа обуславливают повышение значений напряженности поля, а отрицательные формы рельефа и точка у основания положительных, наоборот, приводят к его снижению. При этом высокогорное плато приближённо может считаться плоскостью с большой абсолютной высотой.

Наконец, можно отметить ещё один важный фактор, оказывающий влияние на приземное электрическое поле в электрически невозмущённых атмосферных условиях — локальные условия окружающей среды (влажность воздуха, содержание аэрозоля в воздухе, радиационный фон и другие факторы). Так, например, при сравнении средних значений $\nabla\varphi$ в ПН-2 и ПН-5, которые расположены в аналогичных условиях рельефа (в центре Тувинской и Тункинской котловин соответственно), можно отметить, что в ПН-5, находящемся на 140 м ниже пункта

ПН-2, средние значения $\nabla\varphi$ больше, чем в последнем. Из этого можно предположить, что при схожих физико-географических условиях (сопоставима абсолютная высота и подобная форма рельефа) в пунктах наблюдений различие измеренных значений $\nabla\varphi$ обусловлено главным образом отличием локальных условий в них. Однако это предположение справедливо только для природных ландшафтов, имеющих минимальную антропогенную загрязнённость, а также удалённых от месторождений радиоактивных руд и активных тектонических разломов. В селитебных (антропогенных) ландшафтах влияние загрязнённости воздуха, зданий и сооружений, воздушных линий электропередачи и других антропогенных факторов на приземное электрическое поле может доминировать над физико-географическими факторами.

Для всех пунктов экспедиционных наблюдений получены оценки среднечасовых значений $\nabla\varphi$, рассчитываемых по многодневным данным за периоды ± 30 мин относительно начала каждого часа в течение суток. Для удобства сравнения суточных вариаций $\nabla\varphi$ в ПН их время было приведено ко времени центрального для региона исследования часового пояса (UTC+7). Суточные вариации абсолютных и нормированных значений градиента потенциала электрического поля представлены на рис. 4 и 5.

Согласно рис. 4, в большинстве ПН основной максимум $\nabla\varphi$ приходится на послеполуденные часы (~13—17 ч местного времени), а основной минимум — после полуночи (~00—02 ч). Также в большинстве ПН во время интенсивного прогрева подстилающей поверхности и воздуха (~07—12 ч) прослеживается быстрое возрастание градиента потенциала с последующим слабым снижением или стабилизацией — вторичный максимум и минимум, обусловленные действием конвективного генератора [6]. Согласно классификации [2, 3, 7], суточный ход $\nabla\varphi$ в ПН может быть отнесён к континентальному типу с двумя максимумами и двумя минимумами («двойная волна»). Кроме того, в предрассветные часы и во время рассвета во всех ПН отмечаются дополнительные максимум и минимум соответственно. В ПН-1, ПН-3, ПН-7 и ПН-9 также можно выделить и другие особенности суточного хода $\nabla\varphi$, предположительно, обусловленные влиянием местной циркуляции (бризовая и горно-долинная) и локальных атмосферных явлений (радиационный туман и туман испарения). В частности, во время рассвета и/или заката дополнительно регистрируются быстрые возрастания $\nabla\varphi$. Причём в ПН-1 значения $\nabla\varphi$ во время данного эффекта превышают основной (послеполуденный) максимум. В ПН-7 этот «эффект» также регистрировался в полночь (00 ч). Повышенная влажность воздуха, обусловленная орографическими условиями и относительной близостью водных объектов, в совокупности с сильным выхолаживанием подстилающей поверхности и приземного слоя воздуха в антициклональных погодных условиях способствует образованию дымки (тумана). Так, среднесуточные значения относительной влажности в этих пунктах в период наблюдений значительно (до 10 % и более) превышали аналогичные значения в остальных пунктах. При этом максимумы в суточном ходе относительной влажности согласуются с возрастанием $\nabla\varphi$. Подобное повышение $\nabla\varphi$ также было зарегистрировано в ПН-8, однако оно отмечалось после захода солнца и при невысокой относительной влажности (< 70 %).

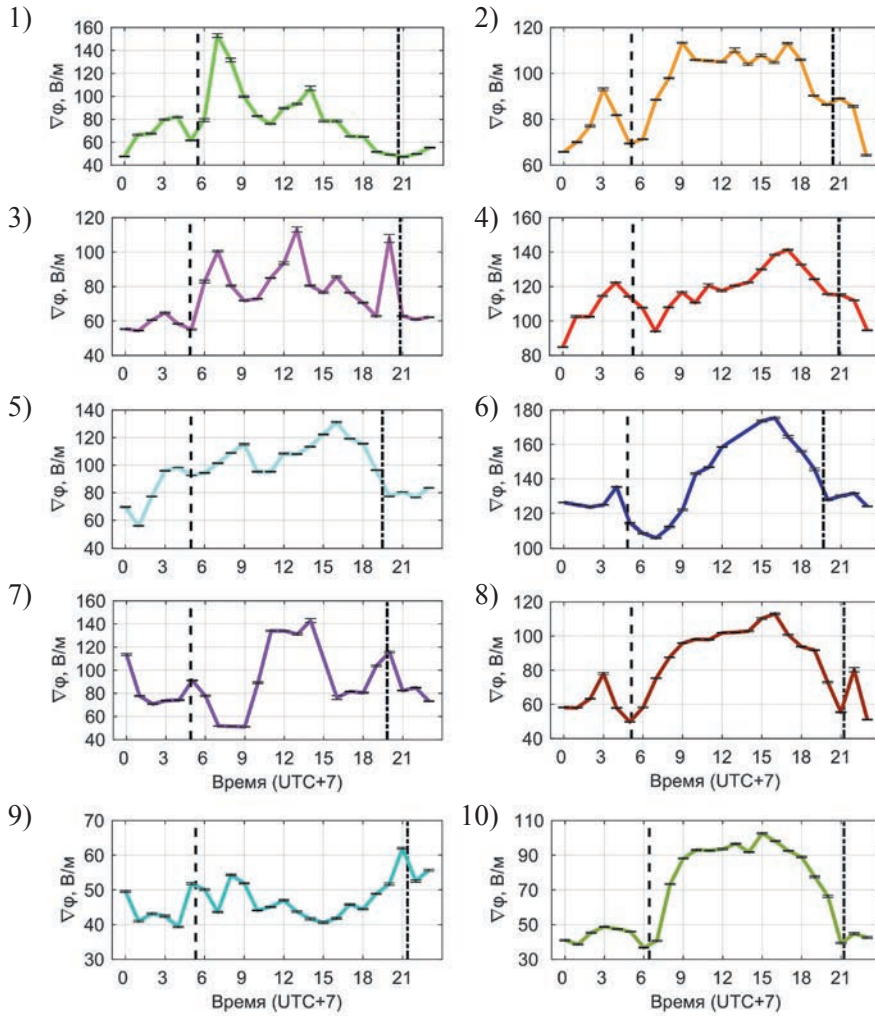


Рис. 4. Суточные вариации среднечасовых значений градиента потенциала в условиях «хорошей погоды» в пунктах наблюдений 1—10. Ширина доверительного интервала рассчитывается как произведение коэффициента Стьюдента (t) и стандартной ошибки среднего ($\delta = \sigma/\sqrt{N}$, где σ — стандартное отклонение, N — длина выборки) в пунктах экспедиционных наблюдений 1—10.

На рисунках пунктирная и штрихпунктирная линии —
среднее время восхода и захода солнца в пунктах наблюдений.

Fig. 4. Diurnal variation of hourly means of potential gradient under fair-weather conditions in the observation sites 1—10. The width of the confidence interval is determined by the multiplication of the Student's t -value (t) and the standard error of the mean ($\delta = \sigma/\sqrt{N}$, where σ — standard deviation, N — sample length).

In the figures, the dotted and dash-dotted lines —
the average times of sunrise and sunset at observation points.

Далее рассмотрим суточные вариации среднечасовых значений $\nabla\varphi$, нормированных относительно средних за периоды наблюдений в ПН (представлены в процентах от среднего). Согласно рис. 5, отмечается хорошее согласие суточного хода $\nabla\varphi$ в электрически невозмущённых атмосферных условиях в пунктах экспедиционных наблюдений ПН-2, ПН-4, ПН-5, ПН-6, ПН-8 и ПН-10. При этом, согласно рис. 6, коэффициент корреляции Пирсона для суточных вариаций $\nabla\varphi$ в этих пунктах при попарном сравнении составляет 0,5 и более, что характеризует их связь как умеренную и сильную. Наиболее сильная корреляционная зависимость (коэффициент корреляции Пирсона 0,9 и более) отмечается между пунктами ПН-2, ПН-8 и ПН-10 (рис. 6). При этом данные пункты находятся в различных регионах (Тува, Республика Алтай и Алтайский край) на большом расстоянии друг от друга (ПН-2 и ПН-8 — 450 км; ПН-8 и ПН-10 — 720 км; ПН-2 и ПН-10 — 1020 км).

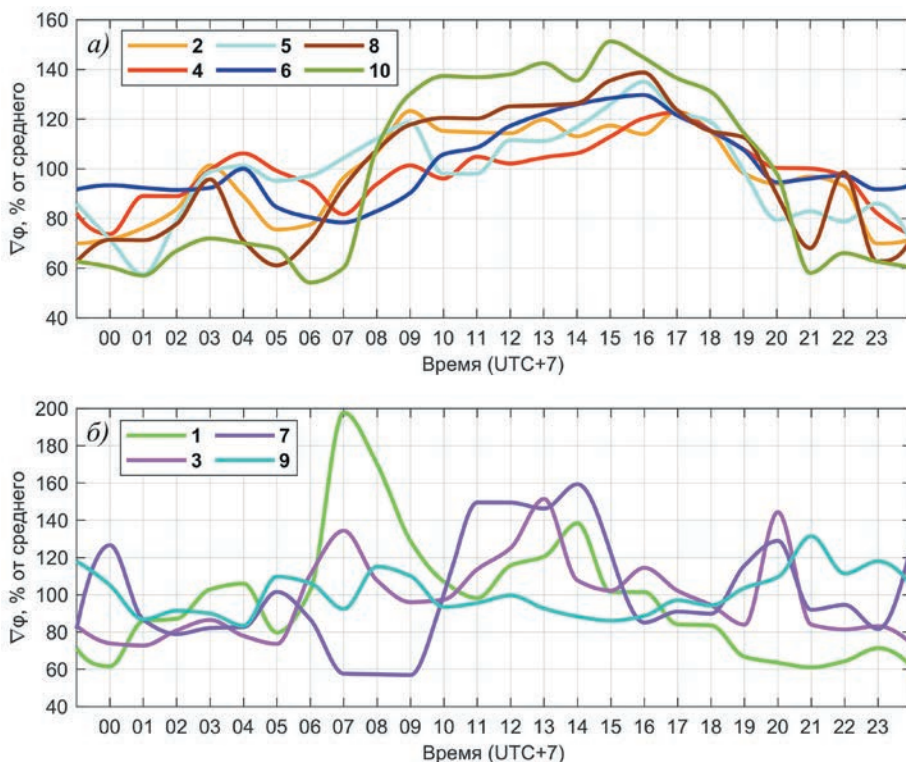


Рис. 5. Сглаженные суточные вариации нормированных значений градиента потенциала в условиях «хорошей погоды» по местному времени (UTC+7) в пунктах наблюдений: а) пункты 2, 4, 5, 6, 8 и 10; б) пункты 1, 3, 7 и 9.

Fig. 5. Smoothed daily variations of the normalized values of potential gradient under fair-weather conditions at local time (UTC+7) in the observation sites: а) sites 2, 4, 5, 6, 8 and 10; б) sites 1, 3, 7 and 9.

Исходя из отмеченного, пункты экспедиционных наблюдений можно приближённо разделить на две группы:

1) пункты наблюдений с типичным для континентальных районов суточным ходом $\nabla\varphi$, имеющим два максимума и два минимума — пункты 2, 4, 5, 6, 8 и 10 (рис. 5 а);

2) пункты с более сложным суточным ходом, имеющим дополнительные максимумы в периоды рассвета и заката — 1, 3, 7 и 9 (рис. 5 б).

В первую группу входят пункты наблюдений с более сухим микроклиматом, расположенные на равнине, в центральных частях обширных котловин, на отроге южного склона горного хребта, а также на высокогорном плато. И, наоборот, ко второй группе можно отнести ПН, находящиеся в сложных физико-географических условиях (горные долины, подножье северного склона горного хребта, холмистая местность), а также имеющие более влажный микроклимат.

По данным измерений градиента потенциала в пунктах 2, 4, 5, 8 и 10, относящихся к первой группе, был получен средний суточный ход $\nabla\varphi$, который приближённо можно считать типичным для электрического поля на территории исследования в летние месяцы.

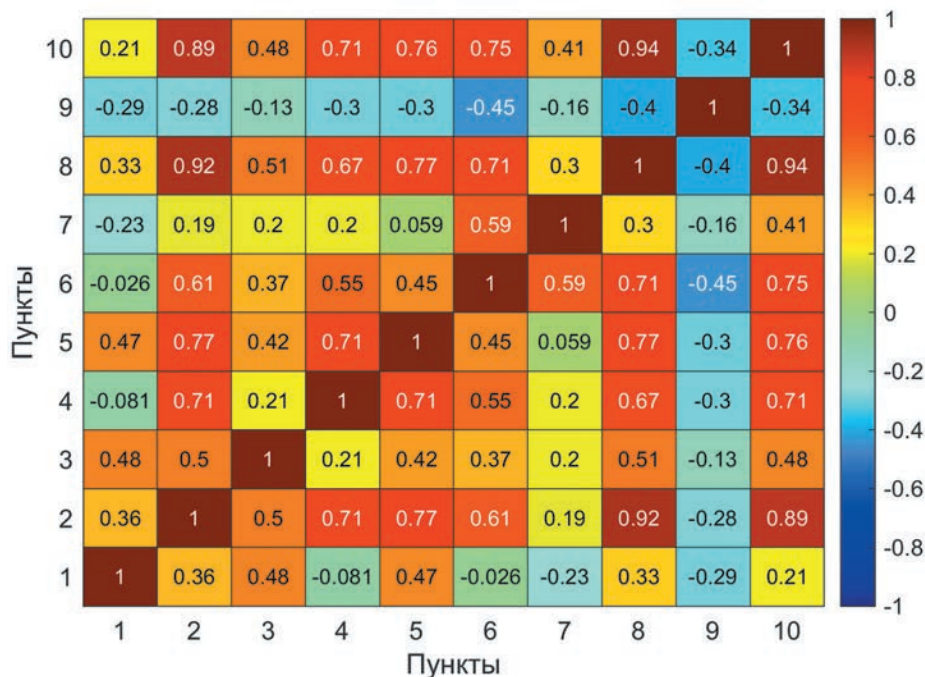


Рис. 6. Корреляционная матрица суточных вариаций градиента потенциала в условиях «хорошей погоды» в пунктах наблюдений 1—10.

Fig. 6. Correlation matrix of the diurnal variability of potential gradient under fair-weather conditions in the observation sites 1—10.

Сравнение суточных вариаций нормированных значений $\nabla\varphi$ в пунктах наблюдений, представленных во всемирном координированном времени (UTC), с аналогичными вариациями, полученными за летние месяцы 2006—2020 гг. в ГО ИМКЭС (г. Томск) [13], и унитарной вариацией (кривой Карнеги) [4] показало следующее. Форма вариаций $\nabla\varphi$ в ПН и ГО ИМКЭС имеет похожий вид, однако, в городском пункте измерений вторичный максимум и минимум выражены сильнее, а время наступления основного (вечернего) максимума электрического поля наступает значительно позднее, чем в пунктах, расположенных в естественных степных и горных ландшафтах. Предположительным объяснением этого являются более высокое содержание аэрозоля в городском пункте, а также влияние городского «острова тепла», способствующее замедленному остыванию воздуха в вечерние часы и, как следствие, более позднему ослаблению конвективных потоков и турбулентного перемешивания по сравнению с природными ландшафтами. Основные минимумы и максимумы вариаций $\nabla\varphi$ в ПН сильно смещены относительно аналогичных экстремумов кривой Карнеги. Так, основной максимум в осреднённом суточном ходе $\nabla\varphi$ в ПН отмечается на ~ 10 ч UTC раньше основного максимума кривой Карнеги (рис. 7). В связи с этим суточные вариации электрического поля, полученные в экспедиционных пунктах на юге Сибири и соответствующие унитарной вариации (кривой Карнеги), имеют противофазный

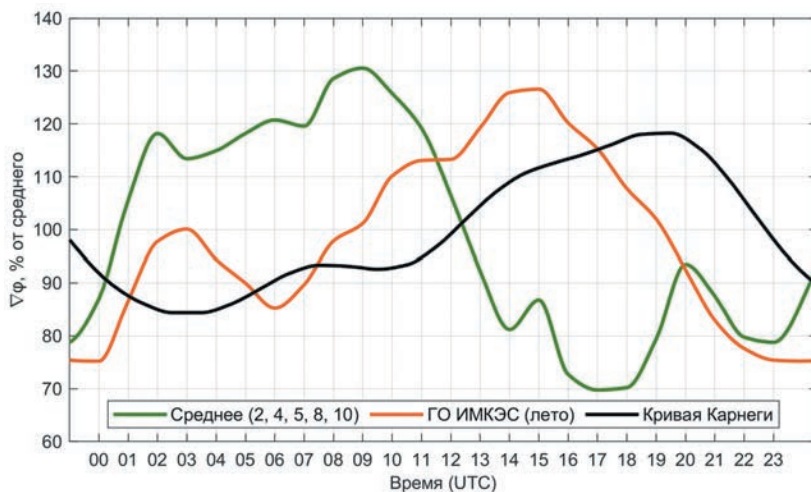


Рис. 7. Сглаженные суточные вариации нормированных значений градиента потенциала в условиях «хорошей погоды» по всемирному координированному времени (UTC) в пунктах наблюдений (средние для пунктов 2, 4, 5, 8 и 10), в ГО ИМКЭС (г. Томск; средние для летних месяцев) [13] и кривая Карнеги [4].

Fig. 7. Smoothed daily variations of the normalized values of potential gradient under fair-weather conditions at coordinated universal time (UTC) in the observation sites (the mean for points 2, 3 and 4 2, 4, 5, 8 and 10), in the IMCES GO (Tomsk; the mean for summer months) [13] and the Carnegie Curve [4].

вид. При этом отмечено, что в период 20—21 ч UTC (3—4 ч местного времени) в большинстве пунктов присутствует дополнительный пик $\nabla\varphi$, который согласуется по времени с максимумом кривой Карнеги. Особенно ярко он проявляется в пункте 4 (высокогорное плато), отмечается в ранние утренние часы (до рассвета) и его сложно объяснить только локальными условиями в пунктах наблюдений. Исходя из этого можно предположить, что он связан с проявлением унитарной вариации. Однако для подтверждения или опровержения этого требуются дополнительные исследования.

Заключение

Получены количественные оценки изменчивости градиента потенциала электрического поля в приземном слое в электрически невозмущённых атмосферных условиях «хорошей погоды» по данным экспедиционных измерений, проведённых на территории Южной Сибири в летние месяцы 2020—2023 гг.

Сравнительный анализ средних значений и характеристик изменчивости градиента потенциала, наблюдаемых в разных ландшафтных зонах на юге Сибири, показал, что при увеличении абсолютной высоты средние значения градиента потенциала в общем увеличиваются. Однако значительное влияние на их значения и изменчивость оказывают также орографические и ландшафтные особенности территории в месте наблюдения.

Суточные вариации градиента потенциала в горных и степных ландшафтах на юге Сибири в летние месяцы, в общем, имеют вид двойной волны. Минимальные значения градиента потенциала отмечаются ночью, а максимальные — в послеполуденные и вечерние часы. Перед рассветом и во время рассвета отмечаются вторичный максимум и минимум электрического поля. В период интенсивного прогрева отмечается быстрое возрастание градиента потенциала. Суточная изменчивость градиента потенциала на исследованных ландшафтах преимущественно определяется изменением солнечной радиации и температуры воздуха, с которыми связаны изменения интенсивности конвективных потоков и турбулентности, обуславливающих перераспределение радионуклидов и аэрозольных частиц. Кроме того, в ландшафтах, расположенных в сложных физико-географических условиях, отмечается более сложный суточный ход электрического поля, обусловленный дополнительным влиянием местной циркуляции и локальных атмосферных явлений.

Анализ суточной изменчивости невозмущённого электрического поля в экспедиционных пунктах на юге Сибири позволил выделить два вида суточного хода градиента потенциала. Отмечена умеренная и сильная корреляция суточных вариаций градиента потенциала в пунктах измерений, относящихся к первой группе, несмотря на значительное расстояние между ними. Получен средний нормированный суточный ход градиента потенциала, рассчитанный по данным пунктов, относящихся к первой группе и расположенных на равнине, в обширных котловинах и на плато, который приближённо можно считать типичным суточным ходом электрического поля на юге Сибири в летние месяцы.

Сравнение нормированных средних суточных вариаций градиента потенциала в экспедиционных пунктах на юге Сибири и в ГО ИМКЭС (г. Томск) показало, что их формы имеют схожий вид. Однако в городском пункте вторичные максимум и минимум выражены сильнее, и время начала основного (вечернего) максимума электрического поля наступает значительно позднее, чем в ПН в естественных ландшафтах. Предположительным объяснением этого является более высокое содержание аэрозоля в городском пункте, а также влияние городского «острова тепла».

При сравнении суточного хода электрического поля в условиях «хорошей погоды» в экспедиционных пунктах с кривой Карнеги отмечается их противофазный ход. Однако в ранние утренние часы в большинстве пунктов был зарегистрирован вторичный максимум, который согласуется по времени с максимумом кривой Карнеги и, предположительно, может быть связан с проявлением унитарной вариации в регионе исследования.

Список литературы

1. Chalmers J. A. Atmospheric electricity. Oxford: Pergamon Press, 1967. 515 p.
2. Красногорская Н. В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 323 с.
3. Israël H. Atmospheric Electricity. Vol. 2: Fields, Charges, Currents. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1973. 365 p.
4. Harrison R. G. The Carnegie Curve // Surveys in Geophysics. 2013. Vol. 34. P. 209—232. doi: 10.1007/s10712-012-9210-2.
5. Bennett A. J., Harrison R. G. Variability in surface atmospheric electric field measurements // Journal of Physics: Conference Series. 2008. Vol. 142. P. 012046. doi: 10.1088/1742-6596/142/1/012046.
6. Anisimov S. V., Galichenko S. V., Shikhova N. M., Afinogenov K. V. Electricity of the convective atmospheric boundary layer: field observations and numerical simulation // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2014. Vol. 50. P. 390—398. doi: 10.1134/S0001433814040112.
7. Yaniv R., Yair Y., Price C., Katz Sh. Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel // Atmospheric Research. 2016. Vol. 172—173. P. 119—125. doi: 10.1134/S0001433814040112.
8. Adzhiev A. K., Kupovykh G. V. Measurements of the Atmospheric Electric Field under High-Mountain Conditions in the Vicinity of Mt. Elbrus // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2015. Vol. 51. P. 633—638. doi: 10.1134/S000143381506002X.
9. Tacza J., Raulin J.-P., Morales C. et al. Analysis of long-term potential gradient variations measured in the Argentinian Andes // Atmospheric Research. 2021. Vol. 248. P. 105200. doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105200.
10. Ahmad N., Gurmani S. F., Basit A. et al. Impact of local and global factors and meteorological parameters in temporal variation of atmospheric potential gradient // Advances in Space Research. 2021. Vol. 67. P. 2491—2503. doi: 10.1016/j.asr.2021.01.046.
11. Nicoll K. A., Harrison R. G., Bor J. et al. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2019. Vol. 184. P. 18—29. doi: 10.1016/J.JASTP.2019.01.003.
12. Зайнетдинов Б. Г. Результаты наблюдений за электрическими характеристиками приземного слоя атмосферы в полярном регионе // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2018. Вып. 588. С. 47—61.
13. Pustovalov K. N., Nagorskiy P. M., Oglezneva M. V., Smirnov S. V. The Electric Field of the Undisturbed Atmosphere in the South of Western Siberia: A Case Study on Tomsk // Atmosphere. 2022. Vol. 13. P. 614. doi: 10.3390/atmos13040614.
14. Торопов А. А., Козлов В. И., Каримов Р. Р. Вариации атмосферного электрического поля по наблюдениям в Якутске // Наука и образование. 2016. 2 (82). С. 58—65.

15. Baishev D. G., Samsonov S. N., Moiseev A. V. et al. Monitoring and investigating space weather effects with meridional chain of instruments in Yakutia: a brief overview // *Solar-Terrestrial Physics*. 2017. Vol. 3 (2). С. 25—33. doi: 10.12737/22607.
16. Smirnov S. Atmospheric Electricity Measurements in the Pacific Northwest, Russia // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. P. 2571. doi: 10.3390/app13042571.
17. Firstov P. P., Malkin E. I., Akbashev R. R. et al. Registration of atmospheric-electric effects from volcanic clouds on the Kamchatka peninsula (Russia) // *Atmosphere*. 2020. Vol. 11. P. 634. doi: 10.3390/atmos11060634.

References

1. Chalmers J. A. Atmospheric electricity. Oxford: Pergamon Press, 1967: 515 p.
2. Krasnogorskaya N. V. *Elektrichestvo nizhnikh sloyev atmosfery i metody yego izmereniya = Electricity of the Lower Layers of the Atmosphere and Methods of Its Measurement*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972: 323 p. (In Russ.).
3. Israël H. Atmospheric Electricity. Vol. 2: Fields, Charges, Currents. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1973. 365 p.
4. Harrison R. G. The Carnegie Curve. *Surveys in Geophysics*. 2013;(34):209—232. doi: 10.1007/s10712-012-9210-2.
5. Bennett A. J., Harrison R. G. Variability in surface atmospheric electric field measurements. *Journal of Physics: Conference Series*. 2008;(142): 012046. doi: 10.1088/1742-6596/142/1/012046.
6. Anisimov S. V., Galichenko S. V., Shikhova N. M., Afinogenov K. V. Electricity of the convective atmospheric boundary layer: field observations and numerical simulation. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014;(50):390—398. doi: 10.1134/S0001433814040112.
7. Yaniv R., Yair Y., Price C., Katz Sh. Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel. *Atmospheric Research*. 2016;(172—173):119—125. doi: 10.1134/S0001433814040112.
8. Adzhiev A. K., Kupovykh G. V. Measurements of the Atmospheric Electric Field under High-Mountain Conditions in the Vicinity of Mt. Elbrus. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015;(51): P. 633—638. doi: 10.1134/S000143381506002X.
9. Tacza J., Raulin J.-P., Morales C. et al. Analysis of long-term potential gradient variations measured in the Argentinian Andes. *Atmospheric Research*. 2021;(248):105200. doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105200.
10. Ahmad N., Gurmani S. F., Basit A. et al. Impact of local and global factors and meteorological parameters in temporal variation of atmospheric potential gradient. *Advances in Space Research*. 2021;(67):2491—2503. doi: 10.1016/j.asr.2021.01.046.
11. Nicoll K. A., Harrison R G., Bor J. et al. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019;(184):18—29. doi: 10.1016/J.JASTP.2019.01.003.
12. Zaynetdinov B. G. Results of observations of the electrical characteristics of the surface layer of the atmosphere in the polar region. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A. I. Voyeykova = Proceedings of A. I. Voikov Main Geophysical Observatory*. 2018;(588):47—61. (In Russ.).
13. Pustovalov K. N., Nagorskiy P. M., Oglezneva M. V., Smirnov S. V. The Electric Field of the Undisturbed Atmosphere in the South of Western Siberia: A Case Study on Tomsk. *Atmosphere*. 2022;(13):614. doi: 10.3390/atmos13040614.
14. Toropov A. A., Kozlov V. I., Karimov R. R. Variations of the atmospheric electric field according to observations in Yakutsk. *Nauka i obrazovaniye = Science and education*. 2016;(2):58—65. (In Russ.).
15. Baishev D. G., Samsonov S. N., Moiseev A. V. et al. Monitoring and investigating space weather effects with meridional chain of instruments in Yakutia: a brief overview. *Solar-Terrestrial Physics*. 2017;(3):25—33. doi: 10.12737/22607.
16. Smirnov S. Atmospheric Electricity Measurements in the Pacific Northwest, Russia. *Applied Sciences*. 2023;(13):2571. doi: 10.3390/app13042571.
17. Firstov P. P., Malkin E. I., Akbashev R. R. et al. Registration of atmospheric-electric effects from volcanic clouds on the Kamchatka peninsula (Russia). *Atmosphere*. 2020;(11):634. doi: 10.3390/atmos11060634.

Информация об авторах

Константин Николаевич Пустовалов, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН; доцент, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, const.pv@yandex.ru.

Пётр Михайлович Нагорский, д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, prm_sta@mail.ru.

Мария Викторовна Оглезнева, младший научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, oglezneva.m@yandex.ru.

Артыш Алашович Сат, младший научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, artysh.sat@gmail.com.

Сергей Васильевич Смирнов, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН; доцент, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, smirnov@imces.ru.

Information about authors

Konstantin N. Pustovalov, PhD (Phys. and Math. Sci.), Senior Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor, National Research Tomsk State University.

Petr M. Nagorsky, Doctor of Sciences (Phys. and Math. Sci.), Professor, Principal Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Mariya V. Oglezneva, Junior Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Artysh A. Sat, Junior Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Sergei V. Smirnov, PhD (Phys. and Math. Sci.), Senior Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor, National Research Tomsk State University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 11.10.2023

Принята к печати после доработки 01.04.2024

The article was received on 11.10.2023

The article was accepted after revision on 01.04.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 251—268.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(75):251—268.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 551.513.11(203.5)
doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-251-268

Исследование волновых процессов во время сложных внезапных стратосферных потеплений

**Ксения Андреевна Диденко^{1, 2}, Богдан Аминович Бикбулатов¹,
Татьяна Сергеевна Ермакова^{2, 3}, Андрей Владиславович Коваль^{2, 3}**

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, didenko@izmiran.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург.

³ Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Изучена эволюция нелинейных процессов в средней атмосфере, связанных с распространением стационарных планетарных волн (СПВ) во время развития сложных внезапных стратосферных потеплений (ВСП). Анализ волновых процессов основан на методе исследования возмущенной потенциальной энтропии (ПЭ), который был выполнен для зим 2003—2004 гг. и 2005—2006 гг., когда наблюдались ВСП со сложной термодинамической структурой. Показаны сходства в развитии нелинейных взаимодействий между планетарными волнами и различия во взаимодействии планетарных волн со средним потоком при формировании ВСП. Полученные оценки могут быть использованы в качестве предикторов формирования внезапных стратосферных потеплений.

Ключевые слова: стратосферный полярный вихрь, планетарные волны, нелинейные волновые взаимодействия, внезапное стратосферное потепление, энтропия, волновая активность.

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда РФФ: расчеты потоков волновой активности и нелинейных процессов, анализ слагаемых возмущенной потенциальной энтропии — в рамках гранта №23-77-01035, <https://rscf.ru/project/23-77-01035/>; обработка гидрометеорологических полей из базы данных реанализа и расчет волновых характеристик — в рамках гранта №20-77-10006-П, <https://rscf.ru/project/20-77-10006/>.

Для цитирования: Диденко К. А., Бикбулатов Б. А., Ермакова Т. С., Коваль А. В. Исследование волновых процессов во время сложных внезапных стратосферных потеплений // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 251—268. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-251-268.

Investigation of wave processes during complex sudden stratospheric warmings

Kseniia A. Didenko^{1, 2}, *Bogdan A. Bikbulatov*¹,
Tatiana S. Ermakova^{2, 3}, *Andrey V. Koval*^{2, 3}

¹ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Russian Academy of Sciences, Moscow, didenko@izmiran.ru

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg.

³ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg.

Summary. The evolution of various nonlinear processes in the middle atmosphere associated with the spreading of stationary planetary waves during the development of complex sudden stratospheric warming is studied. Stationary planetary waves with constant phase surface fixed relative to the Earth propagate with group velocities, providing energy and momentum transfer from the troposphere. The wave's impact is characterized by strong nonlinearity and causes anomalies of stratospheric circulation. Waves affect the structure of the stratospheric polar vortex while interacting with the mean flux. The most pronounced effects of nonlinear interaction of waves with the mean flux, as well as waves interconnections are manifested during sudden stratospheric warming — strong thermodynamic phenomena in the winter polar stratosphere. Sudden stratospheric warming affects the whole middle atmosphere and also causes significant changes in the troposphere, mesosphere, and lower thermosphere. One of the ways to study the internal dynamic reasons of the sudden stratospheric warming development associated with the wave processes is to investigate the variability of the perturbed potential enstrophy — the potential vorticity squared. Using the MERRA-2 reanalysis data, the temporal variability of wave activity, perturbed potential enstrophy fluxes divergence and advection, the interactions of atmospheric waves with each other and with the mean flux were analyzed. Such an analysis was carried out for the winters of 2003—2004 and 2005—2006, when complex sudden stratospheric warmings were observed. This is due to the complex spatial and temporal distributions of zonal wind, temperature, and the amplitudes of planetary waves with different zonal wave numbers during their development. Similarities in the development of nonlinear interactions between planetary waves and differences in the interaction of planetary waves with the mean flux during the formation of the sudden stratospheric warmings under consideration are shown. The obtained estimates of wave processes can be used as predictors of the formation of sudden stratospheric warming.

Keywords: stratospheric polar vortex, planetary waves, nonlinear wave's interactions, sudden stratospheric warming, enstrophy, wave activity.

Acknowledgments: the research was supported by Russian Science Foundation: wave activity fluxes and nonlinear processes calculations, analysis of the terms of eddy potential enstrophy — within the framework of grant #23-77-01035, <https://rscf.ru/en/project/23-77-01035/>; processing of hydrometeorological fields from the reanalysis database and wave characteristics calculations — within the framework grant #20-77-10006-P, <https://rscf.ru/project/20-77-10006/>.

For citation: Didenko K. A., Bikbulatov B. A., Ermakova T. S., Koval A. V. Investigation of wave processes during complex sudden stratospheric warmings. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(75):251—268. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-251-268.

Введение

Планетарные волны (ПВ), генерируемые в тропосфере из-за орографических неоднородностей, баротропной/бароклинной неустойчивости, распространяются

в верхние слои атмосферы и за счет обмена импульсом и энергией с атмосферными струйными течениями оказывают существенное влияние на глобальную атмосферную циркуляцию [1]. Например, взаимодействуя со средним потоком, волны влияют на структуру стратосферного полярного вихря [2, 3]. Наиболее выраженные эффекты взаимодействия ПВ со средним потоком и между собой проявляются во время внезапного стратосферного потепления (ВСП). ВСП способны вызывать значительные изменения динамического и теплового режимов в тропосфере, мезосфере и нижней термосфере [4, 5].

Формирование ВСП связывают с усилением стационарных планетарных волн с зональными волновыми числами 1 и 2 (СПВ1 и СПВ2) [6], генерация которых в тропосфере усиливается за счет увеличения долготных контрастов притока тепла между сушей и океаном в зимний период. В работах [7, 8] обсуждается, что для изучения предпосылок и развития ВСП необходимо анализировать нелинейные взаимодействия ПВ друг с другом и со средним потоком наравне с такими внешними воздействиями, как Эль-Ниньо — Южное колебание, квазидвухлетнее колебание зонального ветра в экваториальной стратосфере, одиннадцатилетний солнечный цикл и осцилляция Маддена-Джулиана [9—13].

ВСП являются важным фактором межгодовой и внутрисезонной изменчивости стратосферного полярного вихря. Во время ВСП наблюдается расщепление или смещение стратосферного полярного вихря из полярных широт в течение нескольких дней, что сопровождается потеплением приполярной стратосферы и, как следствие, изменением направления меридионального температурного градиента. Это приводит к ослаблению или к развороту среднезонального зонального ветра [14—16]. Внезапные стратосферные потепления классифицируют в зависимости от степени развития и длительности на большое (главное, мажорное) и малое (минорное). Первый тип характеризуется положительным градиентом среднезональной температуры на 10 гПа в широтном диапазоне от 60° до 90° с.ш., а дополнительным условием является изменение направления среднезонального ветра на 60° с.ш. и высоте 10 гПа с восточного на западное. Для второго типа ВСП дополнительное условие для среднезонального ветра не выполняется. В последние годы появляется все больше работ, в которых обсуждается вопрос необходимости совершенствования определения и классификации ВСП. Это обусловлено их сложной пространственной и термодинамической структурой: наблюдаемые ВСП характеризуются большой изменчивостью как по продолжительности, так и по влиянию на циркуляцию атмосферы и состояние озонового слоя [17, 18].

Основной задачей данной работы является исследование изменчивости различных волновых процессов с целью анализа предпосылок и развития ВСП со сложной структурой на примере двух событий в течение зимних сезонов 2003—2004 гг. и 2005—2006 гг. Для этого с использованием данных реанализа MERRA-2 [19] были рассчитаны слагаемые в уравнениях баланса возмущенной потенциальной энтропии (ПЭ). Слагаемые описывают изменение волновой активности отдельных СПВ, межволновые взаимодействия и взаимодействия СПВ

со средним потоком. Такой подход к диагностике волновых взаимодействий во время ВСП был детально описан в работах [20, 21] и применялся для исследования нелинейных взаимодействий ПВ на разных стадиях ВСП со смещением и расщеплением стратосферного полярного вихря.

Данные и метод

Метод анализа волновых процессов заключается в исследовании возмущенной ПЭ, являющейся квадратом потенциальной завихренности. Такой подход позволяет анализировать взаимодействия СПВ со средним потоком (влияние волн на зональную циркуляцию) и между собой [22]. Вывод и преобразование уравнений баланса возмущенной ПЭ для СПВ1 и СПВ2 представлены в работе [20]. При получении уравнений для описания межволнового взаимодействия была учтена генерация вторичных планетарных волн [23]. Когда сигнал от двух гармонических волн с зональными волновыми числами и частотами (m_1, ω_1) и (m_2, ω_2) проходит через нелинейную квадратичную систему, то сигналом на выходе этой системы будет являться набор вторичных волн со следующими параметрами: $(2m_1, 2\omega_1)$, $(2m_2, 2\omega_2)$, $(m_1 - m_2, \omega_1 - \omega_2)$ и $(m_1 + m_2, \omega_1 + \omega_2)$. Следуя этой теории, вторичная СПВ2 будет генерироваться в результате нелинейных взаимодействий СПВ3—СПВ1 и в случае самовзаимодействия СПВ1, а вторичная СПВ1 — при взаимодействии СПВ2—СПВ1 и СПВ3—СПВ2. Преобразование уравнений позволило описать не только нелинейные волновые процессы, как показано в работах [22, 24], но и дивергенцию, и адвекцию потока ПЭ. Уравнения баланса возмущенной ПЭ для СПВ1 и СПВ2, (1) и (2) соответственно:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \overline{P_1'^2}}{\partial t} = -\overline{P_1'(\overline{V_1'} \cdot \nabla P_2')} - \overline{P_1'(\overline{V_2'} \cdot \nabla P_1')} - \overline{P_1'(\overline{V_2'} \cdot \nabla P_3')} - \overline{P_1'(\overline{V_3'} \cdot \nabla P_2')} - \frac{1}{\rho_0} \operatorname{div} \left(\rho_0 \overline{P P_1' \overline{V_1'}} \right) - \overline{P_1'(\overline{V} \cdot \nabla P_1')} + \overline{P(\overline{V_1'} \cdot \nabla P_1')} + \overline{P_1' R_1'}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \overline{P_2'^2}}{\partial t} = -\overline{P_2'(\overline{V_1'} \cdot \nabla P_1')} - \overline{P_2'(\overline{V_1'} \cdot \nabla P_3')} - \overline{P_2'(\overline{V_3'} \cdot \nabla P_1')} - \frac{1}{\rho_0} \operatorname{div} \left(\rho_0 \overline{P P_2' \overline{V_2'}} \right) - \overline{P_2'(\overline{V} \cdot \nabla P_2')} + \overline{P(\overline{V_2'} \cdot \nabla P_2')} + \overline{P_2' R_2'}. \quad (2)$$

Черта сверху означает зональное усреднение, штрихи — возмущения, т.е. отклонения от зонально усредненных значений, а подстрочные индексы — зональное волновое число m . В уравнениях (1) и (2) P — потенциальная завихренность Эртеля, \overline{V} — вектор скорости ветра, ρ_0 — плотность ($\rho_0 \equiv \rho_s \exp(-z/H)$), ρ_s — плотность у поверхности, z — вертикальная координата, H — высота однородной атмосферы), R — диссипативные слагаемые и неадиабатические источники. Слагаемое в левой части уравнений описывает временную изменчивость волновой активности [24, 25]. Первые четыре слагаемых уравнения (1) и первые три

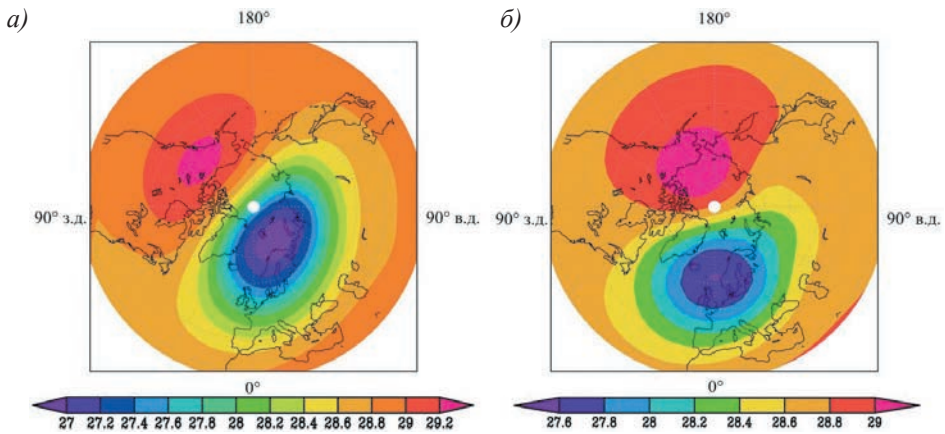


Рис. 1. Распределения геопотенциальной высоты в км, на уровне 10 гПа, усредненные за две недели развития ВСП.

- a) внезапное стратосферное потепление зимой 2003—2004 гг.,
- б) внезапное стратосферное потепление зимой 2005—2006 гг.

Fig. 1. Composites of geopotential height, at the level of 10 hPa, averaged over two weeks of SSW development.

- a) 2003—2004 sudden stratospheric warming,
- b) 2005—2006 sudden stratospheric warming.

слагаемых уравнения (2) в правой части описывают нелинейную генерацию СПВ, теория которой описана выше, далее три обменных слагаемых, описывающих дивергенцию, адвекцию потока ПЭ и взаимодействие волны со средним потоком, последнее слагаемое — диссипация ПЭ.

Для исследования выполнения баланса возмущенной ПЭ, т.е. вклада различных слагаемых в уравнениях (1) и (2), были использованы данные о температуре, скорости зонального и меридионального ветра, давлении и геопотенциальной высоте из базы реанализа метеорологической информации MERRA-2. Расчеты были проведены для двух зим 2003—2004 гг. и 2005—2006 гг., когда наблюдались внезапные стратосферные потепления со сложной структурой, сопровождавшиеся смещением стратосферного полярного вихря (рис. 1).

Рассмотренные нами ВСП классифицируются как главные. Согласно работам [26—28], они являются примерами сложных ВСП. Это обусловлено сложными пространственно-временными распределениями зонального ветра, температуры, а также амплитуд планетарных волн с различными зональными волновыми числами на разных этапах развития ВСП. На рис. 2 и 3 показан временной ход среднезонального ветра, отклонений среднезональной температуры от средних значений за январь-апрель, а также амплитуд СПВ с зональными волновыми числами $m = 1—3$ зимой 2003—2004 гг. Рост температуры начинается в середине декабря 2003 г. на уровне верхней стратосферы, нижней мезосферы, постепенно спускаясь на уровень 10 гПа (рис. 2 б). К 26 декабря

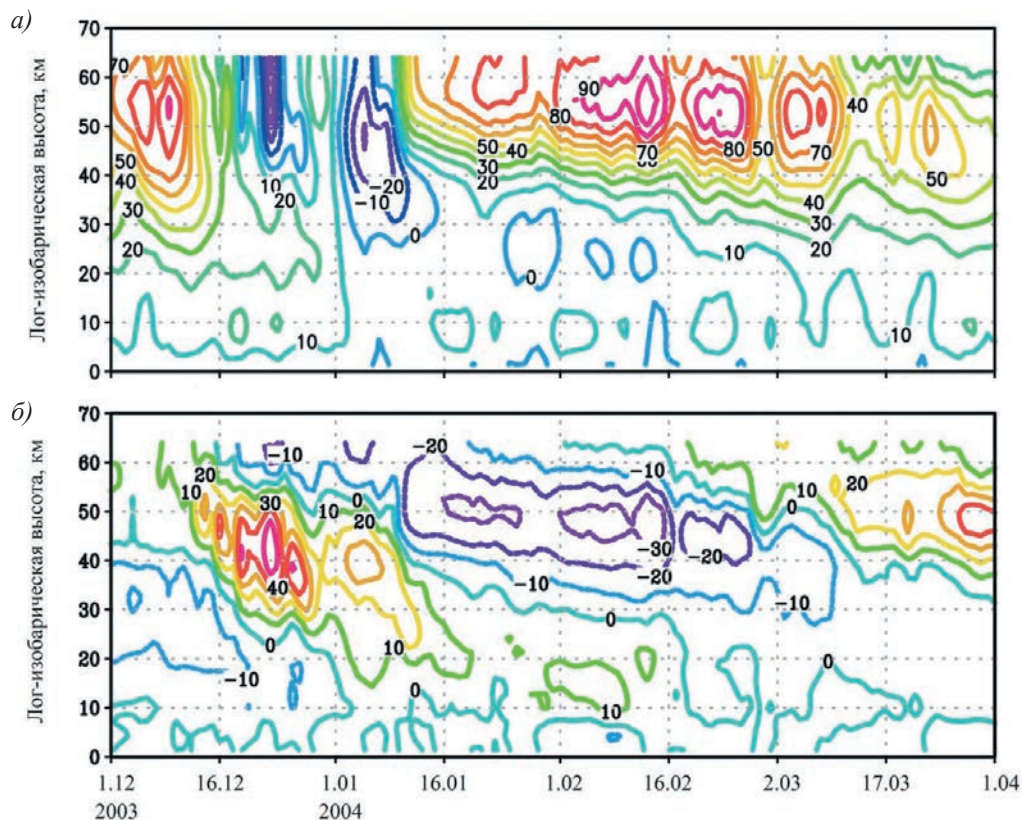


Рис. 2. Высотно-временные распределения зимой 2003—2004 гг.

a) средний зональный ветер (м/с) на $62,5^\circ$ с. ш., *б)* отклонения средней зональной температуры (К) от усредненной за январь—апрель 2004 г. в поясе северных широт $85\text{--}90^\circ$.

Fig. 2. The time-altitude cross-sections of the mean zonal wind (m/s) at latitude 62.5°N (*a*), the zonal mean temperature deviations (K) from averaged over January—April 2004 at 87.5°N (*b*) during winter 2003—2004.

2003 г. аномалия температуры на этом уровне составила 45 К и достигла максимального значения, а среднезональный ветер сменил направление (рис. 2 *a*). В начале января после непродолжительного понижения температуры и восстановления направления ветра на уровне 10 гПа, наблюдался второй максимум температуры, сопровождавшийся изменением направления среднезонального ветра. Внезапному стратосферному потеплению 26 декабря 2003 г. предшествовало сильное увеличение амплитуды СПВ1 на высоте 40—60 км с начала декабря (рис. 3 *a*). Кроме этого, наблюдались аномально сильные увеличения амплитуд СПВ2 и СПВ3 на тех же уровнях с 7 по 24 декабря 2003 г. (рис. 3 *б* и рис. 3 *в*). После ВСП значения амплитуд СПВ1 и СПВ2 оставались аномально большими.

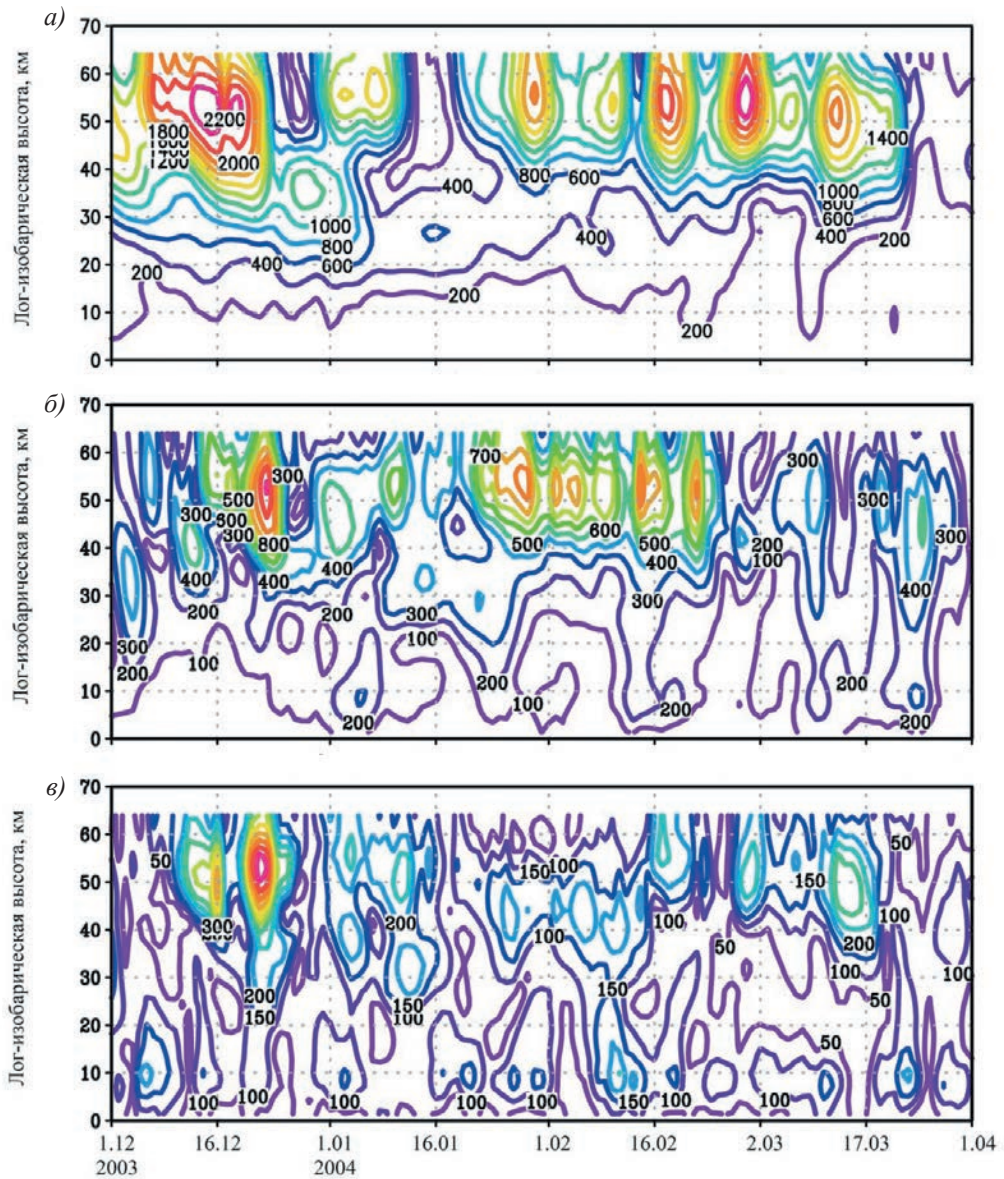


Рис. 3. Высотно-временное распределение амплитуд СПВ в поле геопотенциальной высоты (м) на $62,5^\circ$ с. ш. зимой 2003—2004 гг.

а) зональное волновое число $m = 1$, б) зональное волновое число $m = 2$,
в) зональное волновое число $m = 3$.

Fig. 3. The time-altitude cross-sections of the amplitude planetary wave in the geopotential height at latitude 62.5°N , winter 2003—2004.

a) zonal wavenumber $m = 1$, b) zonal wavenumber $m = 2$, c) zonal wavenumber $m = 3$

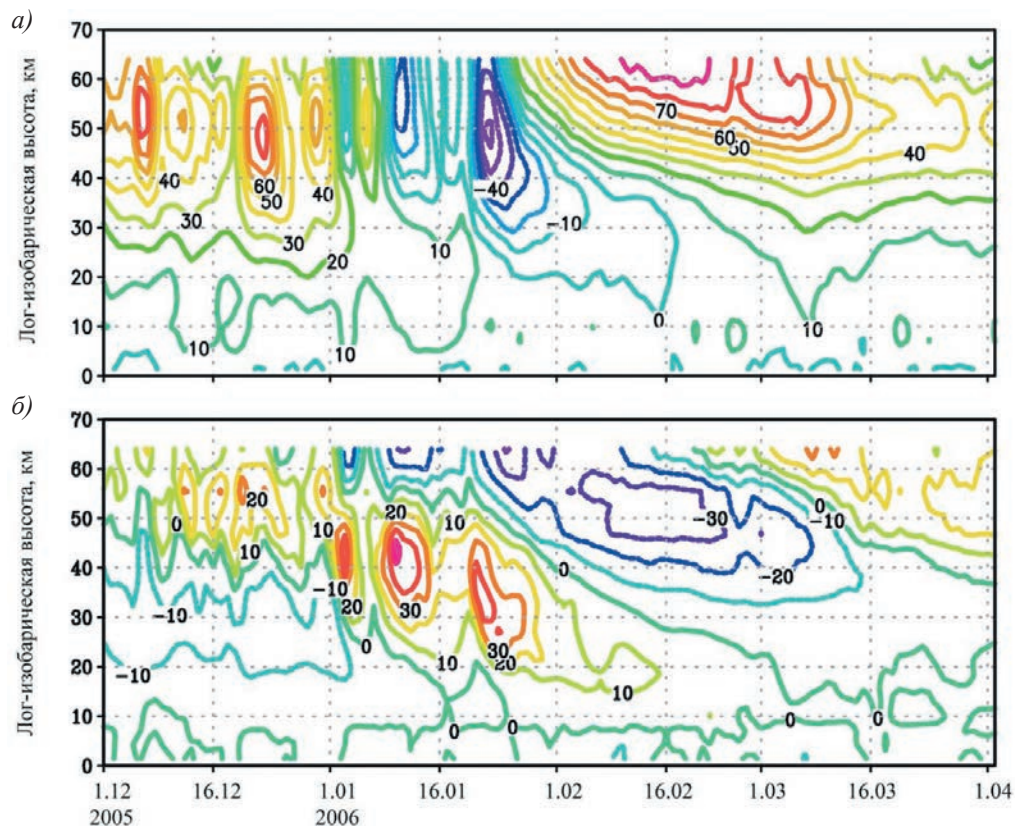


Рис. 4. Высотно-временные распределения зимой 2005—2006 гг.

a) средний зональный ветер (м/с) на $62,5^\circ$ с. ш., *б)* отклонения средней зональной температуры (К) от усредненной за январь—апрель 2006 г. в поясе северных широт 85° — 90° .

Fig. 4. The time-altitude cross-sections of the mean zonal wind (m/s) at latitude 62.5°N (*a*), the zonal mean temperature deviations (K) from averaged over January—April 2006 at 87.5°N (*b*) during winter 2005—2006.

Распределения полей среднезонального ветра, температуры и амплитуд СПВ1-3 зимой 2005—2006 гг. представлены на рис. 4 и рис. 5. Характер вариаций температуры и зональной компоненты ветра при развитии этого ВСП схож с распределениями при ВСП зимой 2003—2004 гг. Рост температуры начинается с конца декабря 2005 г. на уровне верхней стратосферы, нижней мезосферы, постепенно спускаясь на уровень 10 гПа (рис. 4 б). На уровне 10 гПа температура начинает расти с 1 января, и с колебаниями ± 20 К достигает максимальных значений 21 января, что сопровождается изменением направления среднезонального ветра. Внезапному стратосферному потеплению 21 января 2006 г. предшествовало сильное увеличение амплитуд СПВ1, СПВ2 и СПВ3 на 40—60 км с начала декабря (рис. 5).

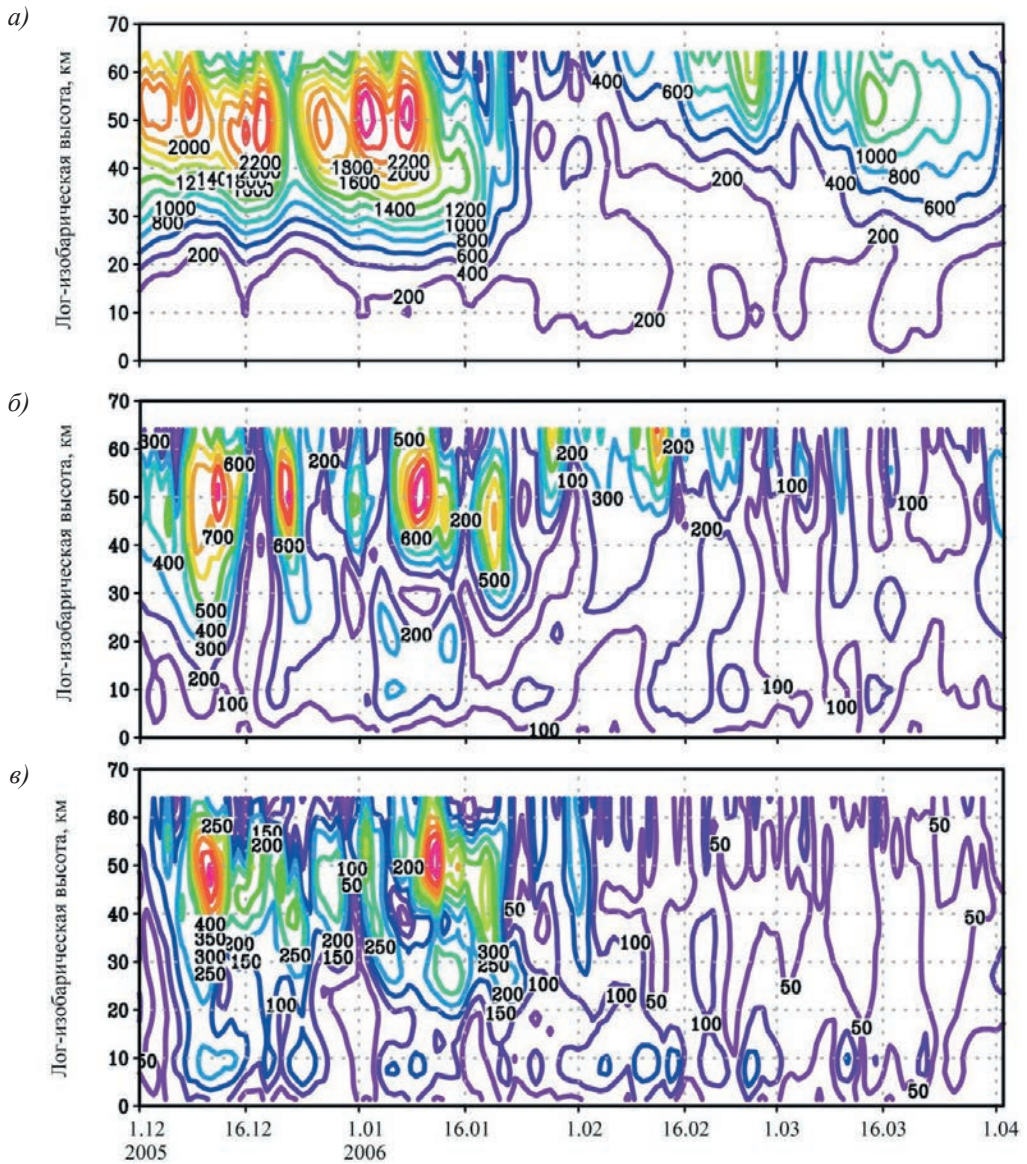


Рис. 5. Высотно-временное распределение амплитуд СПВ в поле геопотенциальной высоты (м) на $62,5^\circ$ с. ш. зимой 2005—2006 гг.

a) зональное волновое число $m = 1$, *б)* зональное волновое число $m = 2$,
в) зональное волновое число $m = 3$.

Fig. 5. The time-altitude cross-sections of the amplitude of planetary wave in the geopotential height at latitude 62.5°N , winter 2005—2006.

a) zonal wavenumber $m = 1$, *b)* zonal wavenumber $m = 2$, *c)* zonal wavenumber $m = 3$.

Результаты исследований

Расчеты и оценки вкладов различных слагаемых в уравнения баланса возмущенной ПЭ для СПВ1 и СПВ2 — уравнение 1 и 2, соответственно, были выполнены с использованием данных реанализа MERRA-2 для уровня 50 км. На этом уровне наблюдаются максимальные значения амплитуд планетарных волн с зональными волновыми числами $m = 1—3$. Расчеты были произведены для периода с 6 декабря 2003 г. по 11 января 2004 г. (левые панели на рис. 6—8) и для периода с 1 января по 5 февраля 2006 г. (правые панели на рис. 6—8), т. е. анализ проводился для двух временных интервалов: 3 недели до и 2 недели после ВСП. Синяя вертикальная пунктирная линия — дата ВСП. Результаты усреднены в полосе $52,5^{\circ}—62,5^{\circ}$ с.ш. На рис. 6—8 значения приведены в единицах $10^{12}(\text{кг}\cdot\text{м}^{-3})^2\cdot\text{PVU}^2/\text{сутки}$, где $1\text{PVU} = 10^{-6} \text{ К}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ [29].

Результаты расчета межволновых взаимодействий при генерации СПВ представлены на рис. 6. При развитии исследуемых ВСП самовзаимодействие СПВ1 при генерации СПВ2 вносит наибольший вклад за 3 недели до потепления — черная линия на рис. 6в и рис. 6г. Взаимодействие СПВ1—СПВ2 при генерации СПВ1 наблюдается за 10 дней до ВСП в обоих случаях — черная линия на рис. 6а и рис. 6б. В тоже время в 2005—2006 гг. наблюдается еще одно максимальное значение этого слагаемого за 3 недели до ВСП. Вклад СПВ3 в межволновые взаимодействия больше во время ВСП 2003—2004 гг. (синие линии на рис. 6).

После достижения максимальной температуры во время ВСП в стратосфере взаимодействия между планетарными волнами практически не наблюдаются, несмотря на то, что, как было указано выше, значительные амплитуды планетарных волн регистрировались на протяжении всей зимы (например, зима 2003—2004 гг.).

Адвекция потока ПЭ вносит наименьший вклад в баланс возмущенной ПЭ, при этом она максимальна за 8—12 дней до наступления ВСП (рис. 7, черная линия). Взаимодействие волны со средним потоком балансируется дивергенцией потока ПЭ (рис. 7, зеленая и синяя линии, соответственно).

Поведение обменных слагаемых, в отличие от межволновых взаимодействий, индивидуально для двух ВСП. После наступления ВСП взаимодействия волны со средним потоком и дивергенция потока ПЭ наблюдаются на протяжении ~10 дней. Взаимодействия СПВ1 и СПВ2 со средним потоком максимальны за 10 дней до ВСП 2003—2004 гг., а дивергенция потока ПЭ за 3 недели (рис. 7а и рис. 7в). Взаимодействие СПВ1 со средним потоком максимально за 2 недели до ВСП 2005—2006 гг. (рис. 7б).

Вклад основных процессов в баланс возмущенной ПЭ и, как следствие, в изменение волновой активности представлен на рис. 8.

Развитие рассматриваемых ВСП сопровождается вариациями волновой активности СПВ1, а изменения волновой активности СПВ2 больше во время ВСП зимой 2005—2006 гг. Уменьшение волновой активности СПВ1 сопровождается уменьшением волновой активности СПВ2, т. е. эти слагаемые не уравновешивают друг друга.

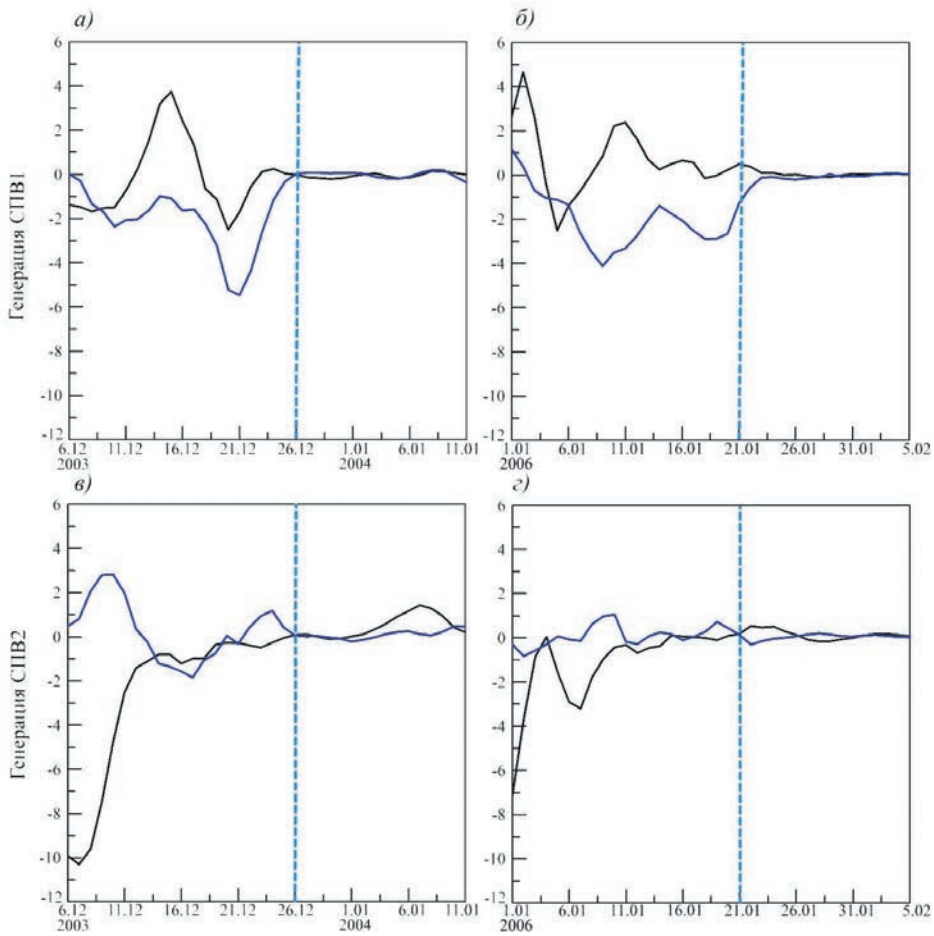


Рис. 6. Слагаемые, отвечающие за межволновые взаимодействия, в балансе возмущенной потенциальной энтропии.

- a)* генерация СПВ1 при развитии ВСП зимой 2003—2004 гг. (взаимодействие СПВ1—СПВ2 — черная линия, СПВ2—СПВ3 — синяя), *б)* генерация СПВ1 при развитии ВСП зимой 2005—2006 гг. (взаимодействие СПВ1—СПВ2 — черная линия, СПВ2—СПВ3 — синяя), *в)* генерация СПВ2 при развитии ВСП зимой 2003—2004 гг. (самовзаимодействие СПВ1 — черная линия, СПВ1—СПВ3 — синяя), *г)* генерация СПВ2 при развитии ВСП зимой 2005—2006 гг. (самовзаимодействие СПВ1 — черная линия, СПВ1—СПВ3 — синяя).

Fig. 6. Terms responsible for wave—wave interactions in the balance of perturbed potential enstrophy.

- a)* SPW1 generation during the SSW 2003—2004 winter development (interaction of SPW1—SPW2 — black line, SPW2—SPW3 — blue), *b)* SPW1 generation during the SSW 2005—2006 winter development (interaction of SPW1—SPW2 — black line, SPW2—SPW3 — blue), *c)* SPW2 generation during the SSW 2003—2004 winter development (SPW1 self-interaction of — black line, SPW1—SPW3 — blue), *d)* SPW2 generation during the SSW 2005—2006 winter development (SPW1 self-interaction of — black line, SPW1—SPW3 — blue).

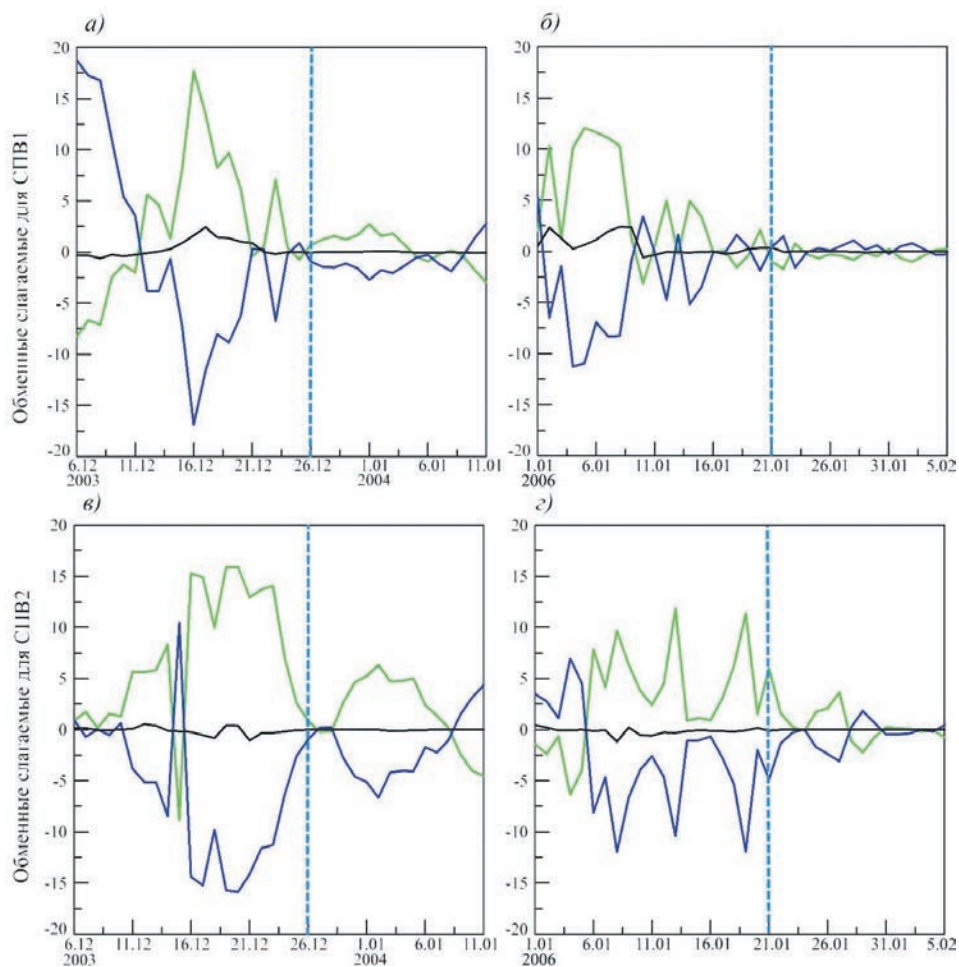


Рис. 7. Обменные слагаемые в балансе возмущенной потенциальной энтропии (адвективные слагаемые — черная линия, дивергенция — синяя линия и взаимодействие волны со средним потоком — зеленая).

- a) обменные слагаемые для СПВ1 при развитии ВСП зимой 2003—2004 гг.,
- б) обменные слагаемые для СПВ1 при развитии ВСП зимой 2005—2006 гг.,
- в) обменные слагаемые для СПВ2 при развитии ВСП зимой 2003—2004 гг.,
- г) обменные слагаемые для СПВ2 при развитии ВСП зимой 2005—2006 гг.

Fig. 7. Exchange terms in the balance of perturbed potential enstrophy (advective terms — black line, the divergence — blue line and wave—mean flow interaction — green one).

- a) SPW1 exchange terms during the SSW 2003—2004 winter development,
- b) SPW1 exchange terms during the SSW 2005—2006 winter development,
- c) SPW2 exchange terms during the SSW 2003—2004 winter development,
- d) SPW2 exchange terms during the SSW 2005—2006 winter development.

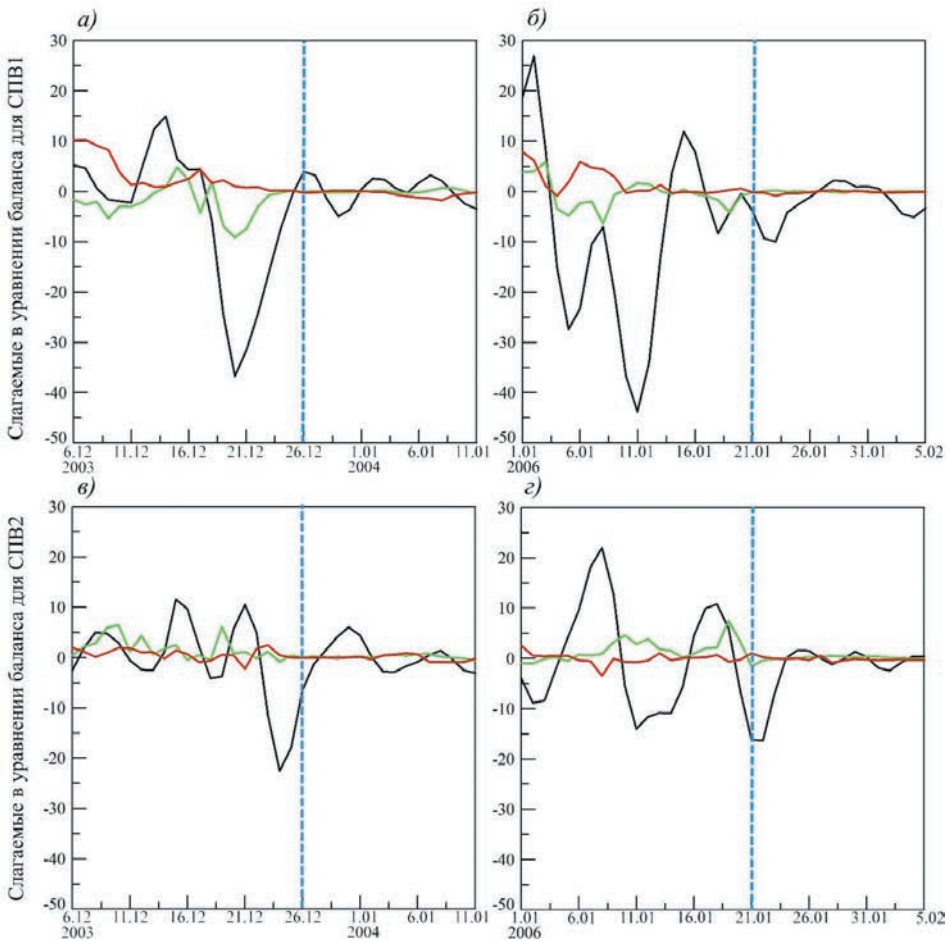


Рис. 8. Слагаемые в балансе возмущенной потенциальной энтропии (изменение волновой активности во времени — черная линия, сумма обменных слагаемых — красная линия и сумма слагаемых, отвечающих за генерацию волны — зеленая).

- a) слагаемые для СПВ1 при развитии ВСП зимой 2003—2004 гг.,
- б) слагаемые для СПВ1 при развитии ВСП зимой 2005—2006 гг.,
- в) слагаемые для СПВ2 при развитии ВСП зимой 2003—2004 гг.,
- г) слагаемые для СПВ2 при развитии ВСП зимой 2005—2006 гг.

Fig. 8. Terms in the balance of perturbed potential enstrophy (wave activity time variations — black line, the exchange terms sum — red line and wave generation terms sum — green one).

- a) SPW1 terms during the SSW 2003—2004 winter development,
- b) SPW1 terms during the SSW 2005—2006 winter development,
- c) SPW2 terms during the SSW 2003—2004 winter development,
- d) SPW2 terms during the SSW 2005—2006 winter development.

Волновая активность планетарных волн начинает меняться за 2 недели до ВСП зимой 2003—2004 гг. (рис. 8 *a* и рис. 8 *в*) и за 3 недели до ВСП зимой 2005—2006 гг. (рис. 8 *б* и рис. 8 *з*). Во время формирования рассматриваемых ВСП вклад слагаемых, ответственных за взаимодействие между СПВ и СПВ со средним потоком, сопоставим (рис. 8, красные и зеленые линии).

Заключение

Данная работа посвящена исследованию процессов, вызванных распространением планетарных волн и волновой активностью при формировании и развитии внезапных стратосферных потеплений со сложной временной и пространственной структурой. С этой целью был проанализирован вклад различных слагаемых в уравнения баланса возмущенной потенциальной энтропии (ПЭ). Такой подход позволяет оценить изменение волновой активности во времени, взаимодействие стационарных планетарных волн между собой и со средним потоком, дивергенцию и адвекцию потока ПЭ. С использованием данных реанализа слагаемые были рассчитаны для ВСП, которые наблюдались зимой 2003—2004 гг. и 2005—2006 гг.

Результаты расчета слагаемых в уравнениях баланса возмущенной ПЭ для СПВ1 и СПВ2 показали сходства в развитии нелинейных взаимодействий между планетарными волнами и различия во взаимодействии планетарных волн со средним потоком при развитии двух сложных ВСП зимой 2003—2004 гг. и 2005—2006 гг. В частности, было впервые показано, что при формировании исследуемых внезапных стратосферных потеплений самовзаимодействия СПВ1 могут вносить наибольший вклад в межволновые взаимодействия за 3 недели до ВСП, а взаимодействия СПВ1—СПВ2 за 10 дней до ВСП. Кроме этого, после наступления ВСП межволновые взаимодействия в стратосфере средних широт в рассмотренных случаях не наблюдались.

Взаимодействия планетарных волн со средним потоком различны для двух ВСП. Несмотря на то, что вклад адвекции потока ПЭ наблюдается за 8—12 дней до наступления ВСП, ее вклад в баланс возмущенной ПЭ — минимальный. Вклад слагаемых ответственных за межволновые взаимодействия в вариации волновой активности сопоставим с вкладом обменных со средним потоком слагаемых. Развитие этих ВСП сопровождалось, в основном, вариациями волновой активности СПВ1.

Результаты исследования продемонстрировали, что при анализе похожих ВСП (по положению стратосферного полярного вихря, по величине и характеру изменения температуры, по увеличению амплитуд СПВ), наблюдаются схожие тенденции в изменении некоторых нелинейных волновых процессов, т. е. просматривается некий универсальный механизм. Временная эволюция волновой активности различается и, очевидно, должна балансироваться диссипативными процессами. Это важная и актуальная задача для дальнейшего детального изучения.

Список литературы

1. Hoskins B. J., Pierce R. P. Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere / Eds. Hoskins B. J., Pierce R. P. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1983. 397 p.

2. Chen P., Robinson W. Propagation of planetary waves between the troposphere and stratosphere // *J. Atmos. Sci.* 1992. Vol. 49, No. 24. P. 2533—2545.
3. Reichler T., Kushner P. J., Polvani L. M. The coupled stratosphere-troposphere response to impulsive forcing from the troposphere // *J. Atmos. Sci.* 2005. Vol. 62. P. 3337—3352.
4. Baldwin M., Ayarzagueno B., Birner T. et al. Sudden stratospheric warmings // *Rev. Geophys.* 2021. Vol. 58. P. 1—37. doi: 10.1002/essoar.10502884.1.
5. Варгин П. Н., Володин Е. М., Карпечко А. Ю., Погорельцев А. И. О стратосферно-тропосферных взаимодействиях // *Вестник РАН.* 2015. Т. 85. № 1. С. 39—46. doi: 10.7868/S0869587315010181.
6. Matsuno T. A. Dynamical model of stratospheric warmings // *J. Atmos. Sci.* 1971. Vol. 28. P. 1479—1494.
7. Labitzke K., Kunze M. On the remarkable Arctic winter in 2008/2009 // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114. P. 1—9. doi: 10.1029/2009jd012273.
8. Pogoreltsev A. I., Savenkova E. N., Aniskina O. G. et al. Interannual and intraseasonal variability of stratospheric dynamics and stratosphere-troposphere coupling during northern winter // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2015. Vol. 136. P. 187—200. doi: 10.1016/j.jastp.2015.08.008.
9. Кандиева К. К., Анискина О. Г., Погорельцев А. И. Влияние осцилляции Маддена — Джулиана на интенсивность и структуру полярного вихря // *Ученые записки РГГМУ.* 2018. № 50. С. 18—27.
10. Кандиева К. К., Анискина О. Г., Погорельцев А. И. и др. Влияние осцилляции Маддена — Джулиана и квазидвухлетнего колебания на динамику внетропической стратосферы // *Геомagnetизм и аэрономия.* 2019. Т. 59. № 1. С. 114—124. doi: 10.1134/S0016794018060068.
11. Ermakova T. S., Aniskina O. G., Statnaya I. A. et al. Simulation of the ENSO influence on the extra-tropical middle atmosphere // *Earth, Planets and Space.* 2019. Vol. 71:8. doi: 10.1186/s40623-019-0987-9.
12. Garfinkel C. I., Benedict J. J., Maloney E. D. Impact of the MJO on the boreal winter extratropical circulation // *Geophys. Res. Lett.* 2014. Vol. 41. P. 6055—6062. doi: 10.1002/2014gl061094.
13. Kuroda Y., Kodera K. Effect of solar activity on the polar-night jet oscillation in the Northern and Southern Hemisphere winter // *Journal of the Meteorological Society of Japan.* 2002. Vol. 80. P. 973—984. doi: 10.2151/jmsj.80.973.
14. Butler A. H., Seidel D. J., Hardiman S. C. et al. Defining sudden stratospheric warmings // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2015. Vol. 96. P. 1913—1928. doi: 10.1175/BAMS-D-13-00173.1.
15. Charlton-Perez A. J., Polvani L. M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks // *J. Clim.* 2007. Vol. 20. P. 449—469. doi: 10.1175/JCLI3996.1.
16. Seviour W. J. M., Gray L. J., Mitchell D. M. Stratospheric polar vortex splits and displacements in the high-top CMIP5 climate models // *J. Geophys. Res.: Atmospheres.* 2016. Vol. 121. P. 1—14. doi: 10.1002/2015JD024178.
17. Manney G. L., Lawrence Z. D., Santee M. L. et al. A minor sudden stratospheric warming with a major impact: Transport and polar processing in the 2014/2015 Arctic winter // *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42. P. 7808—7816. doi: 10.1002/2015GL065864.
18. Wright C. J., Hall R. J., Banyard T. P. et al. Dynamical and surface impact of the January 2021 sudden stratospheric warming in novel Aeolus wind observations, MLS and ERA5 // *Weather and Climate Dynamics Discussions.* 2021. doi: 10.5194/wcd-2021-16.
19. Gelaro R., McCarty W., Suarez M. J. et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) // *J. Clim.* 2017. Vol. 30, No. 13. P. 5419—5454. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
20. Диденко К. А., Ермакова Т. С., Коваль А. В., Погорельцев А. И. Диагностика нелинейных взаимодействий стационарных планетарных волн // *Ученые записки РГГМУ.* 2019. № 56. С. 19—29. doi: 10.33933/2074-2762-2019-56-19-29.
21. Didenko K. A., Koval A. V., Ermakova T. S., Lifar V. D. Interactions of stationary planetary waves during winter 2008—2009 and 2018—2019 sudden stratospheric warmings // *Proc. of SPIE, 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics.* 2022. doi: 10.1117/12.2644458.
22. Smith A. K. Observation of wave-wave interactions in the stratosphere // *J. Atmos. Sci.* 1983. Vol. 40. P. 2484—2493.
23. Pogoreltsev A. I. Numerical simulation of secondary planetary waves arising from the nonlinear interaction of the normal atmospheric modes // *Physics and Chemistry of the Earth (Part C).* 2001. Vol. 26, No. 6. P. 395—403.

24. Smith A. K., Gille J. C., Lyjak L. V. Wave-wave interactions in the stratosphere: Observations during quiet and active wintertime periods // *J. Atmos. Sci.* 1984. Vol. 41. P. 363—373.
25. White I. P., Hua L., Mitchell N. J., Phillips T. Dynamical response to the QBO in the Northern winter stratosphere: signatures in wave forcing and eddy fluxes of potential vorticity // *J. Atmos. Sci.* 2015. Vol. 72. P. 4487—4507. doi: 10.1175/JAS-D-14-0358.
26. Butler A. H., Sjoberg J. P., Seidel D. J., Rosenlof K. H. A sudden stratospheric warming compendium // *Earth System Science Data*. 2017. Vol. 9. P. 63—76. doi: 10.5194/essd-9-63-2017.
27. Choi H., Kim B., Choi W. Type classification of sudden stratospheric warming based on pre- and post-warming periods // *J. Clim.* 2019. Vol. 32, No. 8. P. 2349—2367. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0223.1.
28. Li Y., Kirchengast G., Schwaerz M., Yuan, Y. Monitoring sudden stratospheric warmings under climate change since 1980 based on reanalysis data verified by radio occultation // *Atmos. Chem. Phys.* 2023. Vol. 23. P. 1259—1284, doi: 10.5194/acp-23-1259-2023.
29. McIntyre M. E. Dynamical meteorology: potential vorticity // *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Second Edition. 2014. Vol. 2. P. 375—383. doi: 10.1016/b978-0-12-382225-3.00140-7.

References

1. Hoskins B. J., Pierce R. P. Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere / Eds. Hoskins B. J., Pierce R. P. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1983: 397 p.
2. Chen P., Robinson W. Propagation of planetary waves between the troposphere and stratosphere. *J. Atmos. Sci.* 1992; 49(24): 2533—2545.
3. Reichler T., Kushner P. J., Polvani L. M. The coupled stratosphere-troposphere response to impulsive forcing from the troposphere. *J. Atmos. Sci.* 2005; (62): 3337—3352.
4. Baldwin M., Ayrarzaguen B., Birner T. et al. Sudden stratospheric warmings. *Rev. Geophys.* 2021; (58): 1—37. doi: 10.1002/essoar.10502884.1.
5. Vargin P. N., Volodin E. M., Karpechko A. Yu., Pogoreltsev A. I. Stratosphere-troposphere interactions. *Herald Russ. Acad. Sci.* 2015; 85(1): 56—63. doi: 10.7868/S0869587315010181.
6. Matsuno T. A. Dynamical model of stratospheric warmings. *J. Atmos. Sci.* 1971; (28): 1479—1494.
7. Labitzke K., Kunze M. On the remarkable Arctic winter in 2008/2009. *J. Geophys. Res.* 2009; (114): 1—9. doi: 10.1029/2009jd012273.
8. Pogoreltsev A. I., Savenkova E. N., Aniskina O. G. et al. Interannual and intraseasonal variability of stratospheric dynamics and stratosphere-troposphere coupling during northern winter. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2015; (136): 187—200. doi: 10.1016/j.jastp.2015.08.008.
9. Kandieva K. K., Aniskina O. G., Pogoreltsev A. I. Influence of the Madden-Julian oscillation on the polar vortex. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2018; (50): (18—27). [In Russ.].
10. Kandieva K. K., Aniskina O. G., Pogoreltsev A. I. et al. Effect of the Madden-Julian oscillation and quasi-biennial oscillation on the dynamics of extratropical stratosphere. *Gemagnetizm I Aeronomiya = Geomagnetism and Aeronomy*. 2019; 59(1): (114—124). doi: 10.1134/S0016794018060068. [In Russ.].
11. Ermakova T. S., Aniskina O. G., Statnaya I. A. et al. Simulation of the ENSO influence on the extra-tropical middle atmosphere. *Earth, Planets and Space*. 2019; 71(8). doi: 10.1186/s40623-019-0987-9.
12. Garfinkel C. I., Benedict J. J., Maloney E. D. Impact of the MJO on the boreal winter extratropical circulation. *Geophys. Res. Lett.* 2014; (41): 6055—6062. doi: 10.1002/2014gl061094.
13. Kuroda Y., Kodera K. Effect of solar activity on the polar-night jet oscillation in the Northern and Southern Hemisphere winter. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 2002; (80): 973—984. doi: 10.2151/jmsj.80.973.
14. Butler A. H., Seidel D. J., Hardiman S. C. et al. Defining sudden stratospheric warmings. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2015; (96): 1913—1928. doi: 10.1175/BAMS-D-13-00173.1.
15. Charlton-Perez A. J., Polvani L. M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks. *J. Clim.* 2007; (20): 449—469. doi: 10.1175/JCLI3996.1.
16. Seviour W. J. M., Gray L. J., Mitchell D. M. Stratospheric polar vortex splits and displacements in the high-top CMIP5 climate models. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2016; (121): 1—14. doi: 10.1002/2015JD024178.

17. Manney G. L., Lawrence Z. D., Santee M. L. et al. A minor sudden stratospheric warming with a major impact: Transport and polar processing in the 2014/2015 Arctic winter. *Geophys. Res. Lett.* 2015; (42): 7808—7816. doi:10.1002/2015GL065864.
18. Wright C. J., Hall R. J., Banyard T. P. et al. Dynamical and surface impact of the January 2021 sudden stratospheric warming in novel Aeolus wind observations, MLS and ERA5. *Weather and Climate Dynamics Discussions*. 2021. <https://doi.org/10.5194/wcd-2021-16>.
19. Gelaro R., McCarty W., Suarez M. J. et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *J. Clim.* 2017; 30(13): 5419—5454. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
20. Didenko K. A., Ermakova T. S., Koval A. V., Pogoreltsev A. I. Diagnostics of nonlinear interactions of stationary planetary waves. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2019; (56): (19—29). doi: 10.33933/2074-2762-2019-56-19-29. [In Russ.].
21. Didenko K. A., Koval A. V., Ermakova T. S., Lifar V. D. Interactions of stationary planetary waves during winter 2008—2009 and 2018—2019 sudden stratospheric warmings. *Proc. of SPIE, 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics*. 2022. doi: 10.1117/12.2644458.
22. Smith A. K. Observation of wave—wave interactions in the stratosphere. *J. Atmos. Sci.* 1983; (40): 2484—2493.
23. Pogoreltsev A. I. Numerical simulation of secondary planetary waves arising from the nonlinear interaction of the normal atmospheric modes. *Physics and Chemistry of the Earth (Part C)*. 2001; (26): 395—403.
24. Smith A. K., Gille J. C., Lyjak L. V. Wave—wave interactions in the stratosphere: Observations during quiet and active wintertime periods. *J. Atmos. Sci.* 1984; (41): 363—373.
25. White I. P., Hua L., Mitchell N. J., Phillips T. Dynamical response to the QBO in the Northern winter stratosphere: signatures in wave forcing and eddy fluxes of potential vorticity. *J. Atmos. Sci.* 2015; (72): 4487—4507. doi: 10.1175/JAS-D-14-0358.
26. Butler A. H., Sjoberg J. P., Seidel D. J., Rosenlof K. H. A sudden stratospheric warming compendium. *Earth System Science Data*. 2017; (9): 63—76. doi: 10.5194/essd-9-63-2017.
27. Choi H., Kim B., Choi W. Type classification of sudden stratospheric warming based on pre- and post-warming periods. *J. Clim.* 2019; 32(8): 2349—2367. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0223.1.
28. Li Y., Kirchengast G., Schwaerz M., Yuan Y. Monitoring sudden stratospheric warmings under climate change since 1980 based on reanalysis data verified by radio occultation. *Atmos. Chem. Phys.* 2023; (23): 1259—1284, doi: 10.5194/acp-23-1259-2023.
29. McIntyre M. E. Dynamical meteorology: potential vorticity. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences. Second Edition*. 2014; (2): 375—383. doi: 10.1016/b978-0-12-382225-3.00140-7.

Информация об авторах

Диденко Ксения Андреевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Центр прогнозов космической погоды, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), didenko@izmiran.ru.

Бикбулатов Богдан Аминович, научный сотрудник, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН (ИЗМИРАН), bogdan.bikbulatov1@gmail.com.

Ермакова Татьяна Сергеевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет, taalika@mail.ru.

Коваль Андрей Владиславович, доктор физико-математических наук, доцент кафедры физики атмосферы, Санкт-Петербургский государственный университет, a.v.koval@spbu.ru.

Information about authors

Kseniia Andreevna Didenko, candidate of Science in Physics and Mathematics, senior researcher, Space Weather Prediction Center, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Russian Academy of Sciences.

Bogdan Aminovich Bikbulatov, researcher, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Russian Academy of Sciences.

Tatiana Sergeevna Ermakova, candidate of Science in Physics and Mathematics, assistant professor, Department of Meteorological Forecasts, Russian State Hydrometeorological University.

Andrey Vladislavovich Koval, doctor of Science in Physics and Mathematics, associate professor, Atmospheric physics department, associate professor, Saint Petersburg State University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 01.02.2024

Принята к печати после доработки 08.05.2024

The article was received on 01.02.2024

The article was accepted after revision on 08.05.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 269—279.

Hydrometeorology and Ecology. 2024;(75):269—279.

Научная статья

УДК 551.509.616

doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-269-279

Применение прогностической модели атмосферы при проведении работ по активным воздействиям на облака

***Роман Юрьевич Игнатов¹, Андрей Викторович Частухин²,
Андрей Михайлович Петрунин²***

¹ Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия, prognostist@gmail.com

² АНО «Агентство атмосферных технологий»

Аннотация. Практика оперативных работ по активному воздействию на облака показала, что наряду с радиолокационной информацией и данными радиозондирования атмосферы важную роль в этих работах играет оперативная прогностическая информация о поле ветра в регионе их проведения. В статье на примере процессов, имевших место во время метеозащиты Санкт-Петербурга и при проведении противогорадовых работ на территории Северного Кавказа, показано, что информация о поле ветра в регионе проведения воздействий позволяет своевременно скорректировать процесс их проведения. Делается заключение о целесообразности использования в оперативных работах по активному воздействию на облака совместно с другими источниками информации прогностической модели атмосферы WRF-ARW.

Ключевые слова: поле ветра, прогностическая модель атмосферы, активные воздействия на облака, мезомасштабные процессы.

Для цитирования: Игнатов Р. Ю., Частухин А. В., Петрунин А. М. Применение прогностической модели атмосферы при проведении работ по активным воздействиям на облака // *Гидрометеорология и экология*. 2024. № 75. С. 269—279. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-269-279.

Original article

Application of a predictive atmospheric model during work on active influences on clouds

Roman Yu. Ignatov¹, Andrey V. Chastukhin², Andrey M. Petrunin²

¹ Institute for Problems of Safe Development of Nuclear Energy Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, prognostist@gmail.com

² ANO «Atmospheric Technology Agency»

Summary. The practice of operational work on active influence on clouds has shown that, along with radar information and atmospheric radio sounding data, the analysis of which allows only an inertial forecast

to be made, operational forecast information about the wind field in the region where they are carried out plays an important role in these works. The paper examines two real cases, which, from the authors' point of view, seem to be the most interesting for studying the wind field in the region of influence. An analysis of the synoptic situations of the processes that took place during the weather protection of St. Petersburg and during anti-hail work in the North Caucasus is provided. The results of the analysis, carried out without taking into account forecast information, showed that in the first case there was an unpredictable movement of the precipitation zone into the protected area, in the second case there was an anomalous movement of the convective cell relative to super-powerful hail convective storms. The article presents forecast wind fields for these processes obtained using the regional non-hydrostatic atmospheric model WRF-ARW, which showed the formation of local atmospheric disturbances. The authors make the assumption that the formation of such local atmospheric disturbances can affect the overall wind field in the region where the work is being carried out. Using these processes as an example, it is shown that information about the wind field in the region of impact allows timely adjustment of the process of their implementation. A conclusion is made about the advisability of using the WRF-ARW atmospheric forecast model in operational work on active influence on clouds together with other sources of information.

Keywords: wind field, atmospheric forecast model, active influences on clouds, mesoscale processes.

For citation: Ignatov R Yu., Chastukhin A.V., Petrunin A.M. Application of a predictive atmospheric model during work on active influences on clouds. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydro-meteorology and Ecology*. 2024;(75):269—279. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-269-279.

Введение

Работы по активным воздействиям (АВ) на облака с целью искусственного регулирования осадков или борьбы с градом проводятся более 60 лет. Важную роль в достижении положительного эффекта при их проведении играет оперативная радиолокационная информация и данные радиозондирования атмосферы. Анализ этих данных позволяет делать лишь инерционный прогноз. Однако, как показывает практика, важную роль в работах по АВ играет оперативная прогностическая информация, полученная с помощью модели атмосферы в регионе проведения работ, что может позволить более эффективно управлять процессом АВ, оперативно корректируя районы, время и высоты воздействий.

Модели атмосферы в настоящее время широко используются для решения различных задач, связанных с исследованием влияния мезомасштабных атмосферных процессов и получения прогностической информации о поле ветра в конкретном регионе. Положительный опыт применения прогностической информации моделей авторы отмечают в работах [1, 2, 3].

Цель работы состоит в том, чтобы на конкретных примерах показать необходимость применения прогностической модели атмосферы в работах по АВ. Ниже рассмотрены процессы при проведении противоградовых работ 17 июля 2006 г. во время метеозащиты Санкт-Петербурга и 19 августа 2015 г. на территории Северного Кавказа, анализ которых без учета прогностической информации показал:

- в первом случае наблюдалось непрогнозируемое перемещение зоны осадков на защищаемую территорию;
- во втором случае — аномальное перемещение конвективной ячейки относительно сверхмощных градовых конвективных штормов.

На данных примерах исследуется влияние мезомасштабных атмосферных процессов на процесс принятия решений о проведении АВ.

Анализ процесса в районе Санкт-Петербурга 17 июля 2006 г.

Синоптическая ситуация 17 июля 2006 г. Синоптическая ситуация в Ленинградской области и на Карельском перешейке характеризовалась в первой половине дня 17 июля 2006 г. влиянием тыловой части заполняющегося циклона с центром над востоком Вологодской области. Во второй половине дня влияние этого циклона значительно ослабло, а к вечеру начало сказываться влияние другого циклона, приближающегося со Скандинавии. В данной работе рассматривается период до 15 часов, когда циклон со Скандинавии ещё не оказывал влияние на данный регион.

По данным радиолокационных наблюдений 17 июля 2006 г. [4], в утренние часы к северо-востоку от Санкт-Петербурга наблюдалась обширная зона облачности и осадков (рис. 1). Слоистая и слоисто-дождевая облачность перемещалась на юг—юго-восток со скоростью 25—30 км/час и имела многослойный характер: высота нижнего яруса до 4—5 км, верхнего — до 8—9 км. Из облачности выпадали осадки интенсивностью до 2 мм/час. С 00:00 до 05:00—06:00 МСК во всей

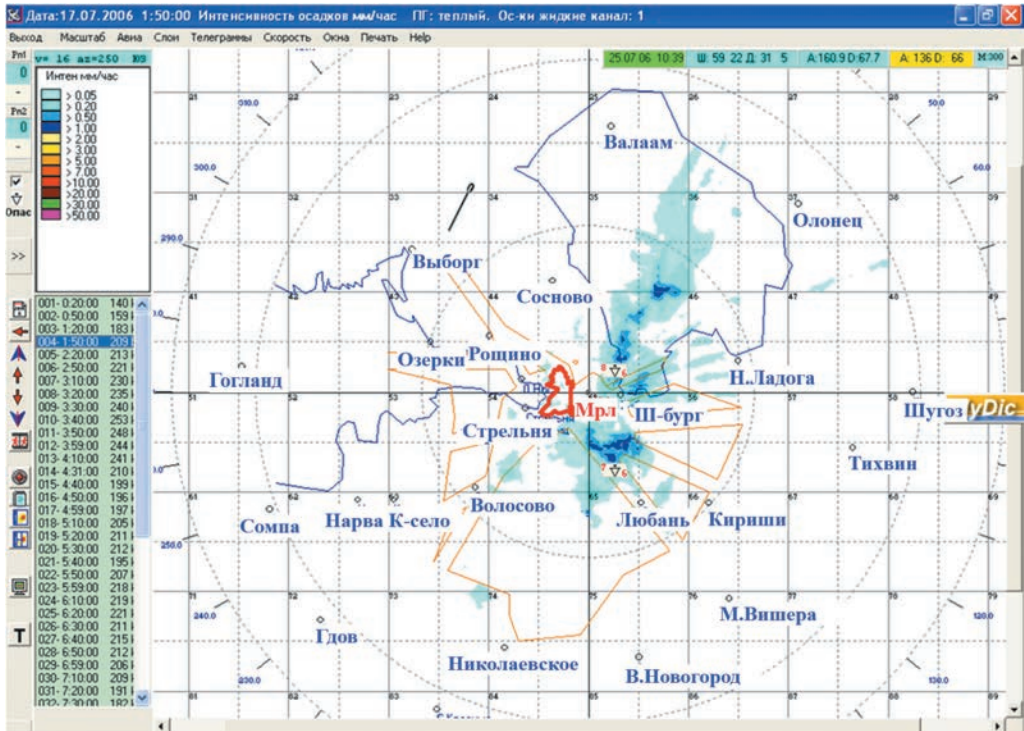


Рис. 1. Радиолокационная карта распределения интенсивности осадков на площади работ в 01:50 МСК, 17 июля 2006 г.

Fig. 1. Radar map of precipitation intensity distributions at the work area at 01:50 Moscow time, July 17, 2006.

тропосфере наблюдался северный перенос воздушных масс, который, по данным синоптического прогноза, сохранялся на протяжении всего дня, причем зона осадков должна была пройти в 20—30 км восточнее границ города, не затронув его. Следует отметить, что данный прогноз был сделан без учета прогностической информации о ветре на высотах. Ниже показано, что использование прогностической модели WRF-ARW улучшает качество работ по АВ, позволяя корректировать процесс их проведения.

Обоснование выбора данных прогностической модели атмосферы WRF-ARW. Прогностические поля ветра были получены с помощью региональной негидростатической модели атмосферы WRF-ARW (Weather, Research, Forecast) (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>) [5, 6]. Данная модель, созданная в Национальном центре атмосферных исследований США, хорошо документирована и широко используется для решения значительного числа прикладных метеорологических задач и в оперативной работе. Модель является открытой и свободно распространяемой по сети Интернет. Открыт также и программный код всех модулей этой модели, что предоставляет широкую возможность для её усовершенствования и адаптации к самым разным задачам. Модель WRF-ARW достаточно качественно воспроизводит ветер. Примеры оценок качества прогноза приземного ветра приведены в работе [7].

В качестве начальных данных и граничных условий для WRF-ARW в данной работе использовался реанализ Европейского Центра Среднесрочных Прогнозов Погоды (ECMWF) ERA-5 [8]. ERA5 представляют собой глобальные данные в формате GRIB1 со следующими параметрами:

- горизонтальное разрешение — 0.25° вдоль широты и долготы;
- шаг по времени — 6 часов (00:00, 06:00, 12:00 и 18:00 ч);
- приземные метеорологические параметры, необходимые для запуска модели WRF-ARW (температура на 2 м, зональная компонента ветра на 10 м, меридиональная компонента ветра на 10 м, точка росы на 2 м, маска «суша-море», орография, давление на поверхности орографии, давление на уровне моря, температура поверхности, сплочённость льда, температура поверхности моря, плотность снежного покрова, высота снежного покрова, температура и влажность почвы на глубинах 7, 28, 100, 289 см);
- метеорологические параметры на 37 изобарических поверхностях от 1000 до 1 гПа (геопотенциал, температура, относительная влажность, зональная компонента ветра, меридиональная компонента ветра).

Результаты расчета по прогностической модели. Рис. 2 и рис. 3 демонстрируют результаты расчета по модели WRF-ARW для процесса в районе Санкт-Петербурга 17 июля 2006 г. На рис. 2 показаны линии тока (линии со стрелками) на цветном фоне скорости ветра, на рис. 3 — изменение со временем ветра в точке с координатами 59.91° с. ш., 30.85° в. д. (обозначена синим треугольником на рис. 2), горизонтальная ось — время, вертикальная — давление в гПа.

На рис. 2 видно, что в 06:00 часов в юго-восточной части горизонтального сечения поля ветра прослеживается северная окраина циклона (на рисунке оно обозначено черным овалом), где наблюдается ветер восточного направления.

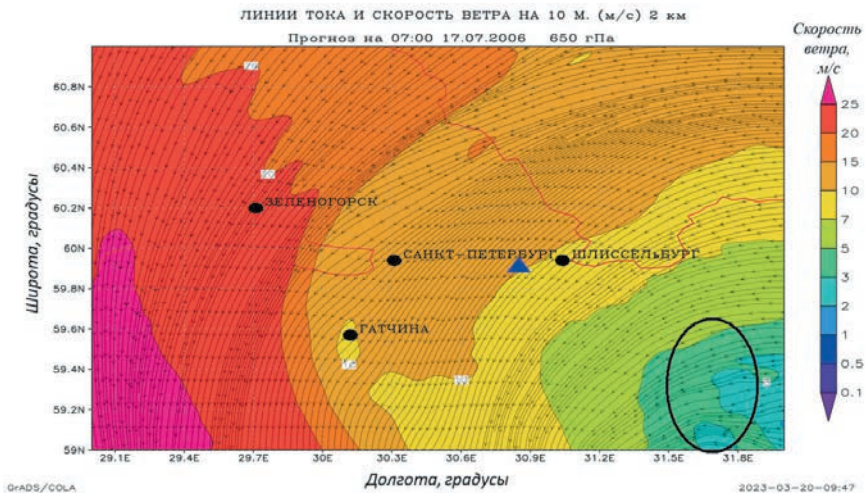


Рис. 2. Карта линий тока (линии со стрелками) и скорости ветра (цвет) на изобарической поверхности 650 гПа на 07:00 17 июля 2006 г.

Синий треугольник — точка вертикального разреза на рис. 3.

Fig. 2. Map of streamlines (lines with arrows) and wind speed (color) on an isobaric surface of 650 hPa at 07:00 July 17, 2006.

The blue triangle is the point of the vertical section in Fig. 3.

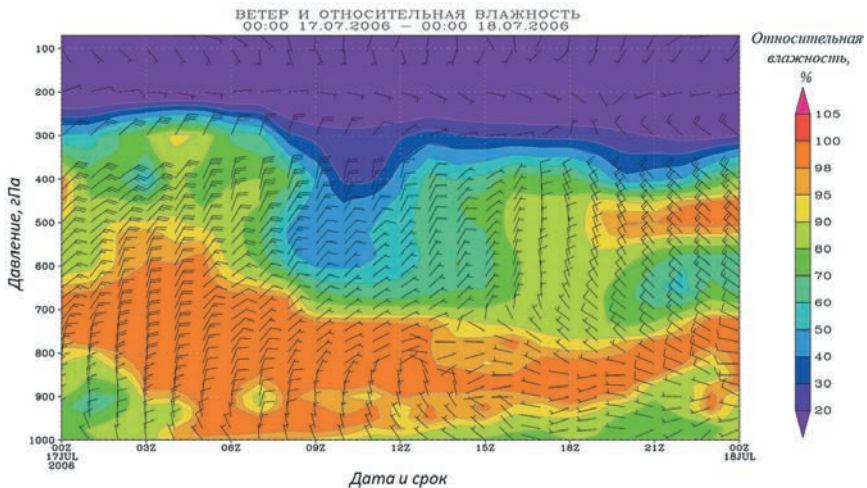


Рис. 3. Вертикальный разрез поля ветра (перья) и относительной влажности (цвет) для 17 июля 2006 г. в точке с координатами 59.91° с. ш., 30.85° в. д.

Fig. 3. Vertical section of the wind field (feathers) and relative humidity (color) for July 17, 2006 at a point with coordinates 59.91° N. latitude, 30.85° east. d.

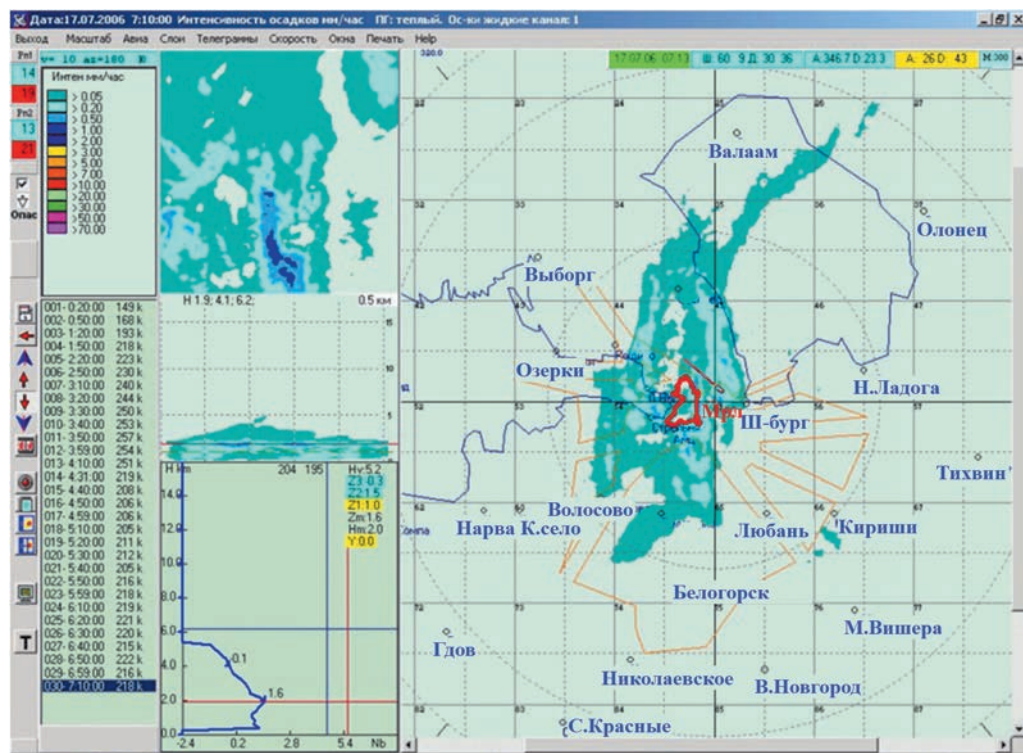


Рис. 4. Радиолокационная карта распределения интенсивности осадков на площади работ в 7:10 МСК, 17 июля 2006 г.

Fig. 4. Radar map of precipitation intensity distributions over the work area at 7:10 Moscow time, July 17, 2006.

Этот циклон, согласно прогнозу, медленно смещался на север, в результате чего около 13:00 часов произошел разворот ветра в слое до 650 гПа на восточный — северо-восточный в районе Санкт-Петербург — Шлиссельбург. В результате данная территория оказалась в северо-западной периферии мезомасштабного барического возмущения, которое на несколько часов изменило преобладающий северный перенос на северо-восточный и восточный в слое 850—650 гПа. Это хорошо видно на вертикальном разрезе (рис. 3) в период с 7 до 15 часов. В результате около 10:00 часов зона облачности, перемещавшаяся с севера на юг восточнее Санкт-Петербурга, по данным радиолокатора (рис. 4), повернула на город, вследствие чего в Санкт-Петербурге наблюдалось выпадение осадков, которых по прогнозу без учёта результатов прогностической модели не должно быть. Впрочем, помимо инерционных прогнозов и прогностической информации, необходимо учитывать фактор распространения процесса обновления системы (кластера).

Анализ процесса 19 августа 2015 г. на Северном Кавказе

Синоптическая ситуация 19 августа 2015 г. Синоптическая ситуация 19 августа 2015 г. в Карачаево-Черкессии и Ставропольском крае характеризовалась размытым барическим полем. Центры барических образований находились довольно далеко от региона, антициклон располагался над Балтикой, циклон — над югом Каспийского моря. В северной части рассматриваемой территории сказывалось влияние холодного атмосферного фронта, который медленно смещался на восток-юго-восток, и к концу дня под влиянием этого фронта оказалась значительная часть Карачаево-Черкессии и Ставропольского края.

По данным радиолокационных наблюдений, с 13:20 до 24:00 МСК на территории Северного Кавказа наблюдались сверхмощные, быстро перемещающиеся, градовые конвективные штормы. Общая длительность грозоградового процесса составила более 10,5 часов [9]. На рис. 5 показаны данные радиолокационных наблюдений для четырех последовательных моментов времени. Как видно из рисунка, в 16:00 МСК в районе Моздока образовалась конвективная ячейка (рис. 5 а, положение 1). Эта ячейка смещалась в западном направлении со скоростью около 50 км/ч с высотой нижней границы около 2 км и верхней — 10 км (рис. 5 б, рис. 5 в, положение 2 и 3 соответственно). После 18:15 данная ячейка стала перемещаться обратно в восточном направлении со скоростью около 40 км/ч и к 19:00 вернулась в район Моздока, практически слившись с облачной системой приближившегося атмосферного фронта (рис. 5 г, положение 4). Высота её нижней границы составляла около 3,5 км, а верхней — 10 км.

Противоградовые работы в регионе были начаты в 13:46 часов и проводились Краснодарской, Ставропольской и Северо-Кавказкой военизированными службами по АВ на гидрометеорологические процессы до 19:30 часов.

Хотя воздействия на данную ячейку не проводились, этот случай представляет несомненный интерес с точки зрения необходимости оперативного мониторинга поля ветра в районе воздействий и с точки зрения перемещения и эволюции облачности во избежание угрозы нанесения ущерба для защищаемой территории.

Результаты расчета по прогностической модели. Рис. 6 и рис. 7 демонстрируют результаты расчета по модели WRF-ARW в районе Моздока 19 августа 2015 г. На рис. 6 даны линии тока (линии со стрелками) на цветном фоне скорости ветра. На рис. 7 показано изменение со временем вертикального разреза ветра в точке с координатами 43.75° с. ш., 44.02° в. д. (обозначена синим треугольником на рис. 6), горизонтальная ось — время, вертикальная — давление в гПа.

На рис. 6 видно, что около 19:00 часов над Северной Осетией сформировалось локальное атмосферное возмущение (на рисунке обозначено черным овалом), что привело к возмущению потоков в регионе. При этом восточный перенос распространялся почти до 700 гПа с 15:00 до 21:00 часов (рис. 7).

Наблюдавшаяся по радиолокатору конвективная ячейка в районе между Прохладным и Моздоком, подчиняясь этому потоку, в отличие от облачной системы северо-восточнее Черкесска, двигалась на запад. Данное локальное атмосферное возмущение просуществовало до 23:00, смещаясь на северо-восток,

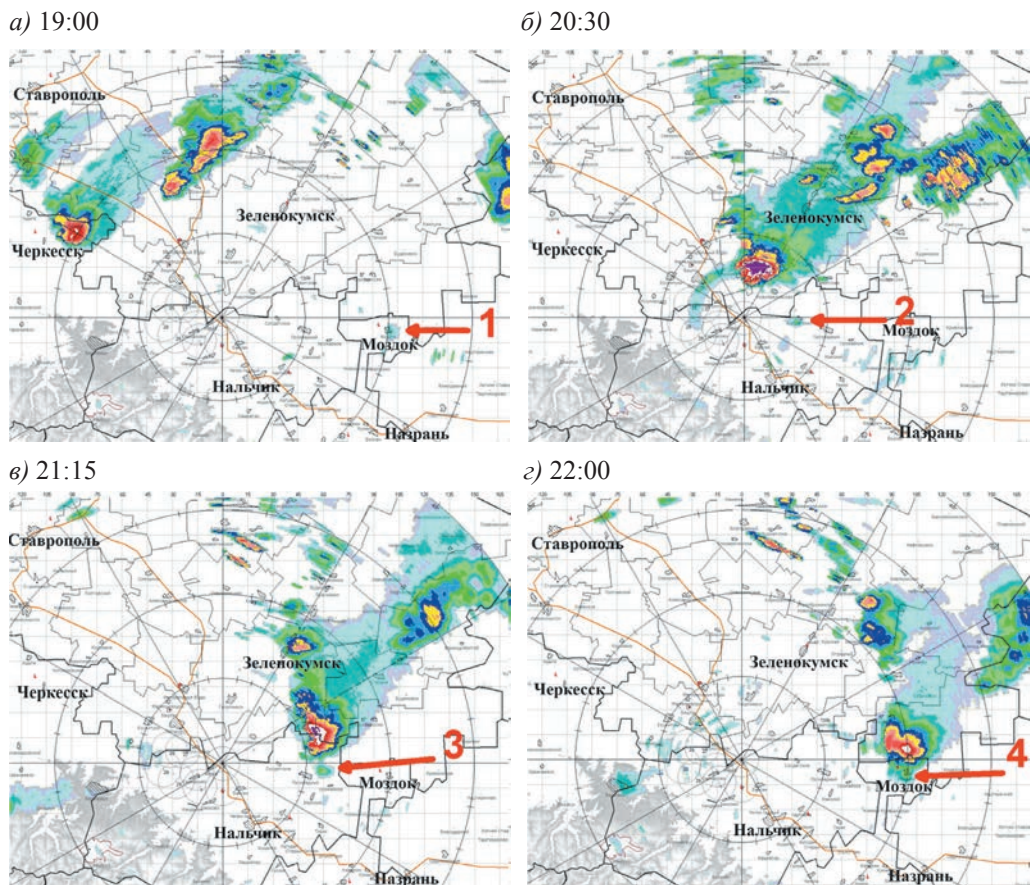


Рис. 5. Радиолокационная карта распределения отражаемости 19 августа 2015 г. для четырех моментов времени и четырех положений выбранной конвективной ячейки.

Fig. 5. Radar map of reflectivity distributions on August 19, 2015 for 4 times and 4 positions of the selected convective cell.

прослеживалось до высоты 650 гПа. После чего восточный перенос на 700—800 гПа сменился на западный и юго-западный, увлекая конвективную ячейку в этом же направлении.

Таким образом, причиной аномальной траектории конвективной ячейки в указанном районе могло явиться локальное атмосферное возмущение воздушного потока, который привёл к формированию восточного переноса в слое до 700 гПа.

Выводы

Проведенный анализ между синоптическими данными и прогностическими данными по модели атмосфера WRF-ARW подтвердил возможность

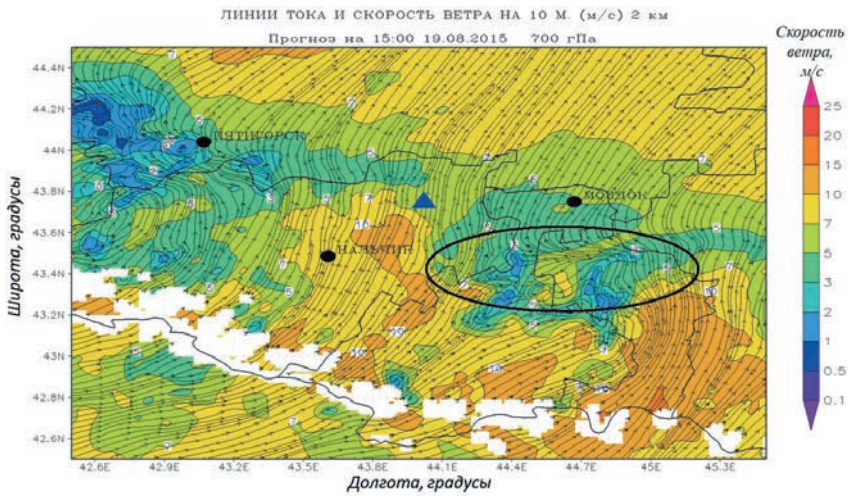


Рис. 6. Карта линий тока (линии со стрелками) и скорости ветра (цвет) на изобарической поверхности 700 гПа на 15:00 19 августа 2015 г.

Синий треугольник — точка вертикального разреза на рис. 7.

Fig. 6 Map of streamlines (lines with arrows) and wind speed (color) on an isobaric surface of 700 hPa at 15:00 on August 19, 2015.

The blue triangle is the point of the vertical section in Fig. 7.

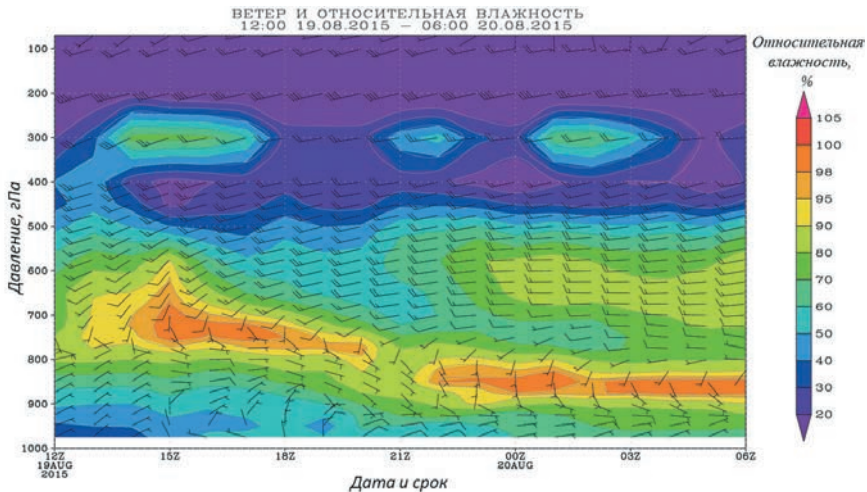


Рис. 7. Вертикальный разрез поля ветра и влажности для 19—20 августа 2015 г. в точке с координатами 43.75° с. ш., 44.02° в. д.

Fig. 7. Vertical section of the wind and humidity field for August 19—20, 2015 at a point with coordinates 43.75° N. latitude, 44.02° east. d.

использования последних для прогноза образования локальных атмосферных возмущений. Исследование поля ветра при проведении противоголовоградных работ 17 июля 2006 г. во время метеозащиты Санкт-Петербурга и 19 августа 2015 г. на территории Северного Кавказа, и сравнение его с полученным с помощью модели атмосфера WRF-ARW, показало наличие сдвига ветра, который оказывал влияние на общий ведущий поток. Это приводило к ухудшению качества проведения работ по АВ без учета данной прогностической информации. Таким образом, полученные результаты в ходе проведенных исследований, на наш взгляд, повысят эффективность работ по модификации облаков.

Список литературы

1. Кагермазов А. Х., Созаева Л. Т. Использование глобальной модели атмосферы (GFS NCEP) для прогноза грозоградовых процессов с заблаговременностью до пяти суток // Гидрометеорология и экология. 2021. № 61. С. 671—680. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-671—680.
2. Калинин Р. А., Шихов А. Н., Быков А. В. Прогноз мезомасштабных конвективных систем на Урале с помощью модели WRF и данных дистанционного зондирования // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 16—28.
3. Рубинштейн К. Г., Игнатов Р. Ю., Набокова Е. В., Арутюнян Р. В. и др. Использование региональной негидростатической модели для получения метеорологических данных в задачах прогноза распространения и выпадения радионуклидов // Метеорология и гидрология. 2009. № 8. С. 27—38.
4. Айсин Д. Р., Гальперин С. М., Козлов В. Н., Шукин Г. Г. Активные воздействия на облака и осадки в Санкт-Петербурге во время проведения саммита Глав Государств и Правительства «Группы восьми» // Труды ГГО. 2007. Вып. 556. С. 215—229.
5. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J. et al. Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note. June 2008. 113 p. doi:10.5065/D68S4MVH.
6. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Technical Note. January 2019. 128 p. doi: 10.5065/1DFH-6P97.
7. Смирнова М. М., Рубинштейн К. Г., Юшков В. П. Оценка воспроизведения региональной моделью характеристик пограничного слоя атмосферы // Метеорология и гидрология. 2011. № 12. С. 5—16.
8. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 Global Reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, July 2020, 1999—2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
9. Абшаев М. Т. Крупномасштабный суперячейковый градовый процесс на Северном Кавказе 19 августа 2015 г. // Евразийское научное объединение. 2017. Т.1. №7. С. 1—8.

References

1. Kagermazov A. Kh., Sozaeva L. T. Using the global atmospheric model (GFS NCEP) to forecast thunderstorm processes with a lead time of up to five days. *Gidrologiy i ekologiy = Hydrometeorology and Ecology*. 2021; (61):(671—680). (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-671-680.
2. Kalinin R. A., Shikhov A. N., Bykov A. V. Forecast of mesoscale convective systems in the Urals using the WRF model and remote sensing data. *Meteorologiy i gidrologiy = Meteorology and Hydrology*. 2017; (1):(16—28). (In Russ.).
3. Rubinshtein K. G., Ignatov R. Yu., Nabokova E. V., Arutyunyan R. V. et al. Using a regional non-hydrostatic model to obtain meteorological data in problems of forecasting the spread and fallout of radionuclides. *Meteorologiy i gidrologiy = Meteorology and Hydrology*. 2009; (8):(27—38). (In Russ.).
4. Aisin D. R., Galperin S. M., Kozlov V. N., Shchukin G. G. Active influences on clouds and precipitation in St. Petersburg during the G8 summit of Heads of State and Government. *Trudy glavnoi geofizicheskoi observatorii = Proceedings of the main geophysical observatory*. 2007; (556):(215—229). (In Russ.).

5. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O. et al. Description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Technical Note*. June 2008:113 p. doi:10.5065/D68S4MVH.
6. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 4. *NCAR Technical Note*. January 2019:128 p. doi: 10.5065/1DFH-6P97.
7. Smirnova M. M., Rubinshtein K. G., Yushkov V. P. Assessment of the regional model's reproduction of the characteristics of the atmospheric boundary layer *Meteorologiy i gidrologiy = Meteorology and Hydrology*. 2011; (12):(5—16). (In Russ.).
8. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, July 2020; (1999—2049). <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
9. Abshaev M. T. Large-scale supercell hail process in the North Caucasus August 19, 2015. *Evrasiiskoe naychnoe obiedinenie = Eurasian Scientific Association*. 2017; 1(7):(1—8). (In Russ.).

Информация об авторах

Роман Юрьевич Игнатов, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, prognozist@gmail.com.

Андрей Викторович Частухин, канд. физ.-мат. наук, заместитель директора по научной работе, АНО «Агентство атмосферных технологий», a.chastuhin@mail.ru.

Андрей Михайлович Петрунин, канд. физ.-мат. наук, заместитель директора по оперативным проектам, АНО «Агентство атмосферных технологий», a.m.petrunin@mail.ru.

Information about authors

Roman Y. Ignatov, PhD (Phys. and Math. Sci.), Senior Researcher, Institute for Problems of Safe Development of Nuclear Energy Russian Academy of Sciences, prognozist@gmail.com.

Andrey V. Chastukhin, PhD (Phys. and Math. Sci.), Deputy Director for Research, ANO «Atmospheric Technology Agency», a.chastuhin@mail.ru.

Andrey M. Petrunin, PhD (Phys. and Math. Sci.), Deputy Director for Operational Projects, ANO «Atmospheric Technology Agency», a.m.petrunin@mail.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 17.04.2023

Принята к печати после доработки 01.05.202

The article was received on 17.04.2023

The article was accepted after revision on 01.05.202

Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 280—292.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(75):280—292.

OCEANOLOGIA

Научная статья
УДК 551.465.46(265.1)
doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-280-292

Изменчивость индекса апвеллинга в области Перуанского течения

***Джимми Хуан Мартина-Васкес, Светлана Михайловна Гордеева,
Валерий Николаевич Малинин***

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
Россия, jimmymartinavasquez@gmail.com

Аннотация. В статье впервые рассматривается оценка интенсивности апвеллинга с использованием теории Экмана в области Перуанского течения за период 1980—2020 гг. Вертикальный поток водной массы через границу глубины трения принят в качестве индекса апвеллинга (ИА). Предложена методика расчета ИА по зональной и меридиональной компонентам скорости ветра в приводном слое океана. Рассчитаны статистические характеристики меридиональной и межгодовой изменчивости глубины трения, индекса апвеллинга. Выявлена корреляционная связь их друг с другом и с температурой поверхности океана для различных районов Перуанского апвеллинга.

Ключевые слова: Перуанский апвеллинг, индекс апвеллинга, глубина трения, теория Экмана, изменчивость индекса апвеллинга и глубины трения.

Для цитирования: Мартина-Васкес Д. Х., Гордеева С. М., Малинин В. Н. Изменчивость индекса апвеллинга в области Перуанского течения // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 280—292. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-280-292.

OCEANOLOGY

Original article

Variability of the upwelling index in the Peruvian Current region

Jimmy Juan Martina-Vasquez, Svetlana M. Gordeeva, Valery N. Malinin

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russian Federation

Summary. The Peruvian upwelling is one of the four most highly productive upwelling areas in the World Ocean and is the largest in terms of fish catches. The waters of the PA, which covers an area of approximately 0.02% of the area of the MO, produce about 20% of the world's fish catch. Large-scale fishing of small pelagic fish species is largely supported by the upwelling process, which contributes to the formation of high biological productivity of waters. The article discusses the assessment of upwelling intensity using Ekman's theory in the PA region for the period 1980-2020. The vertical flow of water mass across

© Мартина-Васкес Д. Х., Гордеева С. М., Малинин В. Н., 2024

the friction depth boundary is taken as the upwelling index (IA). A technique is proposed for calculating IA using the zonal and meridional components of wind speed in the ocean surface layer. The basis for the calculations of wind components was the NCEP/DOE AMIP-II reanalysis archive (Reanalysis-2). The statistical characteristics of the meridional and interannual variability of friction depth and the upwelling index were calculated for 11 selected PA regions. It is shown that for most areas of the PA there are positive trends in the depth of friction and IA. This means increasing friction depth and increasing upwelling. A negative correlation was found between IA and friction depth for most areas of PA, as well as between SST and D, and between IA and SST. All types of connections between these parameters have a clear physical basis, which allows us to consider the correlation between them reliable.

Keywords. Peruvian upwelling, upwelling index, friction depth, Ekman theory, variability of upwelling index and friction depth.

For citation: Martina-Vasquez J. Ju., Gordeeva S. M., Malinin V. N. Variability of the upwelling index in the Peruvian Current region. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(75):280—292. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-280-292.

Введение

Перуанский апвеллинг (ПА) обусловлен взаимодействием океанических и атмосферных факторов, является одним из четырех наиболее высокопродуктивных районов апвеллинга в Мировом океане (МО) и крупнейшим по уловам рыбы [1—3]. ПА образован холодным Перуанским течением, которое берет начало из северной ветви Антарктического циркумполярного течения и течет к северу, к экватору. В результате ветра, дующего в направлении экватора, сила Кориолиса в пассатной зоне отклоняет течение на запад [4—5]. Область ПА плавно переходит в огромную зону юго-восточной части Тихого океана, в которой добывается максимальное количество ставриды в МО (4—4,5 млн т), причем доля России до 1990 г. составляла 27 % [6].

Процесс апвеллинга (подъем на поверхность богатых питательными веществами вод) способствует формированию здесь высокой биологической продуктивности [7—8], которая поддерживает крупный промысел мелких пелагических видов рыбы. В водах ПА, занимающего площадь примерно 0,02 % площади МО, добывается около 20 % мирового улова рыбы [9—13].

Очевидно, к числу важнейших абиотических факторов относится температура морской воды и интенсивность апвеллинга. Воздействие температуры воды на жизнедеятельность морских организмов исключительно многогранно [14]. Она может ускорять или замедлять рост численности отдельных видов и даже приводить к массовой гибели организмов. Апвеллинг в зоне Перуанского течения в соответствии с теорией Экмана возникает под действием пассатного ветра, дующего вдоль западных берегов Южной Америки и вызывающего перенос поверхностных вод с отклонением влево от направления ветра. Это приводит к подъёму в эвфотический слой промежуточных вод с повышенным содержанием биогенных элементов. В результате в верхнем слое океана создаются благоприятные условия для первичного продуцирования и развития фито- и зоопланктона, которые служат кормовой базой массовым видам пелагических рыб [15—16].

Однако оценить интенсивность апвеллинга очень непросто. Это связано с тем, что вертикальные скорости в океане малы и определяются с большими погрешностями, сравнимыми с их средними оценками. Интенсивность апвеллинга

часто определяется косвенными методами. С этой целью достаточно широкое распространение получили разнообразные индексы апвеллинга. Наиболее простые из них представляют собой простую разность температуры воды (ΔT_w) между прибрежной и морской акваторией, измеренной на одной и той же широте с целью количественной оценки прибрежного охлаждающего эффекта апвеллинга [17—19]. Основным недостатком этих методов является неоднозначность пространственного выбора широтных границ.

Более обоснованным является индекс апвеллинга (ИА), предложенный Бакуном в 1973 г. [20], который получил в зарубежных исследованиях довольно широкое распространение. Расчет данного индекса сводится к вычислению составляющих геострофического ветра в каждой точке выбранной области расчета по среднемесячным градиентам приводного атмосферного давления и, в конечном итоге, нахождению величины полного потока в виде экмановского переноса. Вычисленный полный поток водной массы характеризует лишь дрейфовую составляющую течения и не отражает вертикальное поступление воды из глубин океана. Этого недостатка лишен предложенный в работе [14] метод оценки интегрального ИА, позволяющий косвенно учитывать вертикальный поток массы на уровне глубины трения.

Цель данной работы состоит в расчете глубины трения, ИА для области ПА за многолетний период (1980—2020 гг.), выявлении их межгодовой изменчивости, определении степени связи друг с другом и с температурой поверхности океана.

Исходные данные и методика расчетов

Основой для расчетов составляющих ветра в приводном слое океана послужил хорошо известный архив NCEP/DOE AMIP-II reanalysis (Reanalysis-2) [21], который с 1979 г. является естественным продолжением архива NCEP Reanalysis-1. В этих архивах применяется комбинированный подход к усвоению всех видов исходной информации, однако основным является спутниковое зондирование. Архив R-2 охватывает период наблюдений с 1979 г. по настоящее время, использует обновлённые модели прогноза и ассимиляции данных. Пространственная область реализации модели простирается от $88,5^\circ$ ю.ш. до $88,5^\circ$ с.ш. и имеет разрешение $1,8^\circ \times 1,8^\circ$. Для области ПА в границах от 4° до 40° ю.ш. [22] выделено 73 точки в узлах сетки (рис. 1). Для указанных точек из данного архива выбирались среднемесячные значения зональной и меридиональной составляющих скорости ветра за период 1980—2020 гг. [<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/>].

Кроме того, в данной работе использовалась глобальная база данных GODAS (Глобальная система ассимиляции океанических данных), которая основана на квазиглобальной конфигурации GFDL MOM.v3 (Модульная модель океана Лаборатории геофизической гидродинамики). Область модели простирается от 75° ю.ш. до 65° с.ш. и имеет разрешение $1^\circ \times 1^\circ$, увеличенное до $1/3^\circ$ с севера на юг в пределах 10° от экватора. На акватории ПА выделено 216 точек участка сетки, для которых из базы данных GODAS были выбраны среднемесячные

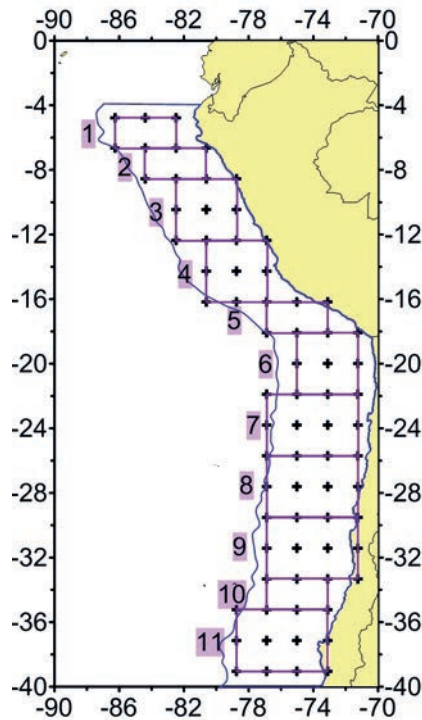


Рис. 1. Схема области Перуанского апвеллинга.

Для одиннадцати выделенных прямоугольников выполнялся расчет индекса апвеллинга.

Fig. 1. Scheme of the Peruvian upwelling region.

The upwelling index was calculated for 11 selected rectangles.

значения температуры поверхности океана (ТПО) за период 1980–2020 гг. [http://apdrc.soest.hawaii.edu/dods/public_data/Reanalysis_Data/GODAS/monthly/].

В соответствии с работой [14] рассмотрим кратко методику оценки интенсивности процесса апвеллинга. С этой целью воспользуемся уравнением водного баланса верхнего слоя океана, которое запишем следующим образом:

$$\partial V / \partial t + \text{div}F_w = P - E + \xi_z, \quad (1)$$

где первый член слева означает изменение объема этого слоя, второй член — результирующий отток (приток) горизонтального потока массы. Справа разность $P - E$ (осадки минус испарение) означает приток влаги через поверхность океана, а величина ξ_z — поток водной массы через нижнюю границу z выделенного верхнего слоя океана. При этом поток вверх (внутри слоя) принимается со знаком «плюс», а поток вниз — со знаком «минус». В качестве z в соответствии с теорией Экмана примем границу трения D . Схематично составляющие уравнения баланса для района апвеллинга представлены на рис. 2.

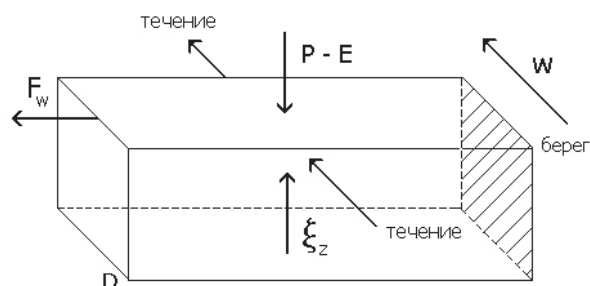


Рис. 2. Схема водных потоков в верхнем слое океана до глубины трения D в области апвеллинга.

Fig. 2. Scheme of water flows in the upper layer of the ocean to friction depth D in the upwelling region.

Естественно, что величиной $\partial V / \partial t$ в уравнении (1) можно пренебречь, поскольку области апвеллингов являются открытыми, вдобавок, влагообмен через поверхность океанов является малой величиной по сравнению с $divF_w$. Отсюда следует, что вертикальный поток водной массы ξ_z уравнивается ее результирующим горизонтальным потоком, т. е.

$$divF_w = \xi_z, \tag{2}$$

По существу величина ξ_z и представляет индекс апвеллинга. Поскольку непосредственное определение вертикальных потоков воды весьма сложно, то воспользуемся косвенным методом. Так как величина $divF_w$ обычно представляет малую разность больших величин, то ее оценка через производные в заданной каким-либо образом сеточной области представляется нецелесообразной. Воспользуемся формулой Остроградского-Гаусса, которая позволяет рассчитывать значения дивергенции через горизонтальные потоки массы, перпендикулярные к контуру некоторого выделенного участка области апвеллинга:

$$divF_w = \frac{1}{A} \int_L F_n dL, \tag{3}$$

где L — периметр контура, стягивающего площадь A , F_n — поток массы, нормальный к контуру.

Отсюда следует, что осредненная по площади величина дивергенции горизонтального потока массы в верхнем слое океана по сути является индексом апвеллинга. Представим теперь формулу (3) в конечных разностях в виде:

$$IA = divF_w = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^n l_j \frac{(F_j + F_{j+1})}{2}, \tag{4}$$

где l_j — расстояние между двумя соседними (j и $j + 1$) точками на внешней границе области апвеллинга, F_j и F_{j+1} — вертикально-интегрированные горизонтальные

потоки водной массы в точках j и $j + 1$, нормальные к контуру. Тогда в зависимости от ориентации граней контура в пространстве (по параллели или по меридиану) поток массы может быть зональным (F_{wx}) или меридиональным (F_{wy}).

Достаточно очевидно, что основной вклад в формирование циркуляции верхнего слоя океана вносят дрейфовые течения. В качестве косвенной оценки их интенсивности ограничимся экмановским переносом. Как известно из теории Экмана, полный поток массы дрейфового течения F_{wxy} направлен под углом 90° от направления ветра вправо в северном полушарии и влево в южном полушарии. В этом случае его зональная и меридиональная компоненты могут быть вычислены по формуле:

$$F_{wx} = \frac{V_o D \rho \sqrt{2}}{2\pi} = \frac{\tau_v}{2\Omega \sin \varphi}, F_{wy} = \frac{V_o D \rho \sqrt{2}}{2\pi} = \frac{\tau_u}{2\Omega \sin \varphi}, \quad (5)$$

где V_o — скорость течения на поверхности, направленная под углом 45° к направлению ветра, ρ — средняя плотность воды, D — глубина слоя трения, τ_u и τ_v — зональная и меридиональная компоненты касательного напряжения скорости ветра, Ω — угловая скорость вращения Земли, φ — широта. Величина $\tau_{u,v}$ определяется следующим образом:

$$\tau_u = \rho_a C_d u^2, \quad \tau_v = \rho_a C_d v^2, \quad (6)$$

где ρ_a — средняя плотность воздуха, u и v — зональная и меридиональная компоненты скорости ветра, C_d — коэффициент трения, для оценки которого при стратификации, близкой к нейтральной, может быть принята линейная зависимость от средней скорости ветра [23]:

$$C_d = (a + b\bar{V}) \cdot 10^{-3}. \quad (7)$$

В этой же работе содержится довольно подробный обзор возможных параметризаций C_d . Нами было принято $a = 0,63$, $b = -0,066$. Отметим, что глубина экмановского слоя D определялась по известной формуле:

$$D = \pi \sqrt{\frac{\mu}{\rho \sin \varphi}}, \quad (8)$$

где $\mu = 0,43 W^2$ — динамический коэффициент турбулентной вязкости (W — модуль скорости приводного ветра).

Итак, зональная компонента дрейфового потока массы рассчитывается по меридиональной компоненте скорости ветра, а величина F_{wy} — наоборот, по зональной компоненте ветра. Заметим, что в работах [24, 25] в качестве индекса прибрежного апвеллинга предложено использовать величину $\frac{\tau_v}{2\Omega \sin \varphi}$, которая рассчитывается по ветру, параллельному берегу. Нетрудно видеть, что ИПА является частным случаем ИА и позволяет учитывать лишь локальную интенсивность апвеллинга.

Результаты расчетов и их обсуждение

Для одиннадцати выделенных районов в области ПА были рассчитаны среднемесячные значения ИА за 1980—2020 гг. На рис. 3 приводится внутригодовая изменчивость глубины трения и индекса апвеллинга, осредненных для всей области ПА. Средняя многолетняя величина глубины трения D составляет 67 м, а ИА — 470 мм/мес. Максимум глубины трения отмечается в ноябре (74 м), а минимум в мае (64 м). Отсюда видно, что амплитуда колебаний примерно 15 % от среднего значения. Можно также отметить, что подобный внутригодовой ход ИА отмечается во всех выделенных районах, причем в южных районах амплитуда его выше, а в северных — ниже. Индекс апвеллинга меняется в диапазоне от 280 мм/мес (февраль) до 580 мм/мес (июнь). Амплитуда его колебаний составляет около 63 % от X_{cp} , т. е. внутригодовая изменчивость ИА в 4 раза выше изменчивости D .

Рассмотрим межгодовую изменчивость этих параметров. В табл. 1 приводятся первичные статистики (X_{cp} , коэффициент вариации C) и характеристики линейного тренда (угловой коэффициент a_1 и коэффициент тренда R^2). Нетрудно увидеть, что глубина трения уменьшается по направлению к Антарктике почти в 4 раза. Причиной этого является значительный рост $\sin\varphi$ в формуле 8. Отметим также, что в значениях D проявляется хорошо выраженная циркумконтинентальная зональность, поскольку изолинии D с увеличением в сторону открытого океана практически параллельны береговой черте. Амплитуда меридиональной изменчивости D в пределах ПА составляет 79 м, что превышает ее среднее значение. Однако межгодовая изменчивость значений D невелика (в пределах 10 %), причем мало меняется от района к району. Тренды для большинства районов положительные, что означает увеличение глубины трения. Тренды присутствуют почти во всех выделенных районах. Значимость трендов (вклад в дисперсию функции отклика) оценивается по коэффициенту детерминации. Критическое

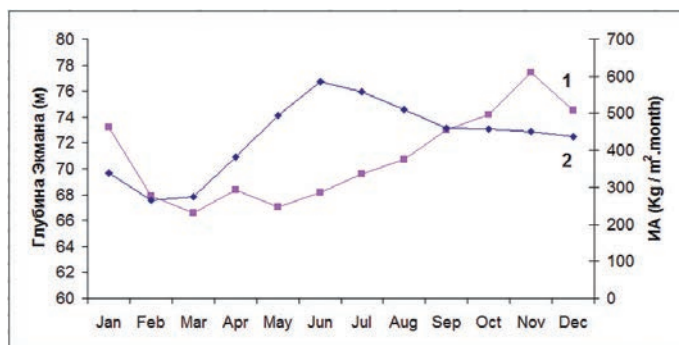


Рис. 3. Внутригодовая изменчивость глубины трения (1) в м и индекса апвеллинга (2) в (мм/мес) для всей области ПА.

Fig. 3. Intra-annual variability of friction depth (1) in m and upwelling index (2) in (mm/month) for the entire Peruvian upwelling region.

значение R^2 на уровне значимости по критерию Стьюдента 0,05 определяется по формуле $R^2_{кр} = 4/(n + 2)$. При $n = 40$ $R^2_{кр} = 0,093$, $r_{кр} = 0,33$. Итак, значимые тренды отмечаются в центральных районах ПА (районы 4 – 8).

Таблица 1

Оценки первичных статистик (X_{cp} , коэффициент вариации С) и характеристик линейного тренда (угловой коэффициент a_1 и коэффициент тренда R^2) для 11 районов ПА за 1980—2020 гг.

Estimates of primary statistics (X_{cp} , coefficient of variation С) and linear trend characteristics (angular coefficient a_1 and trend coefficient R^2) for 11 regions of the Peruvian upwelling for 1980–2020.

Район	Глубина слоя Экмана (м)				Индекс апвеллинга (мм/мес)			
	X_{cp}	С (%)	Тренд	R^2	X_{cp}	С (%)	Тренд	R^2
1	120,22	10,15	0,0064	0,001	-539,6	78,55	20,7260	0,343
2	110,23	8,50	-0,0095	0,001	275,0	118,30	5,5470	0,042
3	93,03	6,69	-0,0004	0,001	630,7	42,77	-0,1165	0,001
4	88,99	5,03	0,1857	0,247	272,9	67,55	0,9825	0,001
5	68,06	5,73	0,1312	0,162	464,6	55,00	8,7924	0,170
6	63,86	7,87	0,2143	0,261	554,6	24,42	0,2381	0,001
7	65,05	10,36	0,4060	0,521	344,5	24,88	-3,4660	0,235
8	51,04	7,71	0,2137	0,423	545,3	12,23	3,1281	0,315
9	41,03	7,64	0,0695	0,070	545,4	14,03	2,9893	0,219
10	41,67	9,54	0,0786	0,056	587,9	19,43	1,5346	0,026
11	36,59	6,07	0,0493	0,071	427,5	11,79	-1,2510	0,088

В отличие от глубины трения индекс апвеллинга не имеет хорошо выраженной меридиональной изменчивости, которая носит в основном случайный характер. Максимум ИА отмечается в районе 3, о котором также упоминается в работе [26], причем по обе стороны от него в районах 2 и 4 он, наоборот, минимален. Что касается межгодовой изменчивости ИА, то, напротив, она намного выше, чем в D. В большинстве районов коэффициент вариации ИА в разы выше, чем С в D. Максимальная изменчивость наблюдается в районе 2, где она превышает 100 %. Это связано с аномально низкой величиной X_{cp} ИА. Исключая два северных района, тренд в ИА является положительным, т. е. в целом апвеллинг усиливается. При этом значимые тренды преимущественно сосредоточены в южных районах ПА. Максимальный тренд наблюдается в районе 5.

В табл. 2 приводится корреляция между индексом апвеллинга и глубиной трения. Нетрудно увидеть, что за исключением 8 района, в других районах ПА корреляция между этими параметрами оказывается отрицательной: при уменьшении глубины трения происходит увеличение вертикальной скорости воды, что приводит к возрастанию вверх потока водной массы и, соответственно, ИА. Наиболее ярко связь между этими параметрами проявляется в районе 7, где корреляция достигает $r = -0,85$. Кроме того, в табл. 2 представлена корреляция значений D и ИА с ТПО в центре каждого района. Корреляция между ИА и ТПО в большинстве

районов отрицательная. Это означает, что при возрастании потока более холодных водных масс вверх к поверхности температура океана понижается.

Более сложный характер связи имеет место между ТПО и D. С понижением ТПО повышается плотность морской воды, в результате чего усиливается конвекция, которая, вероятно, увеличивает глубину трения. Поэтому должна отмечаться преимущественно отрицательная корреляция между ТПО и D, однако вследствие сложности указанного процесса она является значимой лишь в четырех районах южной части ПА. Итак, все виды связи между параметрами ТПО, ИА и D имеют довольно четкую физическую обусловленность, что позволяет считать корреляцию между ними достоверной.

Таблица 2

Оценки коэффициентов корреляции между индексом апвеллинга, глубиной трения и ТПО для одиннадцати районов Перуанского апвеллинга за период 1980—2020 гг.

Значимые коэффициенты корреляции выделены полужирным шрифтом.

Estimates of correlation coefficients between the upwelling index, friction depth and SST for 11 regions of the Peruvian upwelling for the period 1980–2020.

Significant correlation coefficients are highlighted in bold.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$r(D, ИА)$	-0,05	-0,29	-0,69	-0,22	-0,34	-0,60	-0,85	0,45	-0,25	-0,70	-0,22
$r(ТПО, ИА)$	-0,07	-0,41	-0,39	-0,50	-0,38	-0,03	0,48	-0,41	-0,13	0,21	-0,04
$r(D, ТПО)$	-0,12	0,02	0,23	-0,16	-0,14	-0,34	-0,66	-0,69	-0,43	-0,31	-0,20

Заклучение

Перуанский апвеллинг относится к числу четырех наиболее высокопродуктивных районов апвеллинга в Мировом океане и является крупнейшим по уловам рыбы. Крупный промысел мелких пелагических видов рыбы в значительной степени поддерживается процессом апвеллинга, который способствует формированию высокой биологической продуктивности вод. В статье впервые рассматривается оценка интенсивности апвеллинга с использованием теории Экмана в области ПА за период 1980—2020 гг. Вертикальный поток водной массы через границу глубины трения принят в качестве индекса апвеллинга (ИА). Предложена методика расчета ИА по зональной и меридиональной компонентам скорости ветра в приводном слое океана. Основой для расчетов составляющих ветра послужил архив NCEP/DOE AMIP-II reanalysis (Reanalysis-2). Были рассчитаны статистические характеристики меридиональной и межгодовой изменчивости глубины трения, индекса апвеллинга для одиннадцати выделенных районов ПА. Показано, что для большинства районов ПА отмечаются положительные тренды в глубине трения и ИА. Это означает увеличение глубины трения и усиление апвеллинга. Выявлена отрицательная корреляция между ИА и глубиной трения для большинства районов ПА, а также между ТПО и D, между ИА и ТПО. Все виды связи между этими параметрами имеют четкую физическую обусловленность, что позволяет считать корреляцию между ними достоверной.

Список литературы

1. Bakun A., Weeks S. The marine ecosystem off Peru: What are the secrets of its fishery productivity and what might its future hold? // *Progress in Oceanography*. 2008. Vol. 79, P. 290—299. DOI: 10.1016/j.pocan.2008.10.027.
2. Heileman, S., Guevara R., Chavez F., et al. Report: A Perspective on Changing Conditions in LMEs of the World's Regional Seas. eds K. Sherman, G. Hempel. XVII-56 Humboldt current: LME 13, in The United Nations Environment Programme Large Marine Ecosystem (UNEP-LME), (Nairobi: United Nations Environment Programme). 2009. 15 p.
3. Gutiérrez D., Akester M., Naranjo L. Productivity and sustainable management of the Humboldt current large marine ecosystem under climate change // *Environmental Development*. 2015. Vol. 17, P. 126—144. DOI: 10.1016/j.envdev.2015.11.004.
4. Karstensen J., Ulloa O. Peru–Chile Current System // *Encyclopedia of Ocean Sciences*. 2009. P. 385—392. DOI: 10.1016/B978-012374473-9.00599-3.
5. Ramos J. E., Tam J., Aramayo V., et al. Climate vulnerability assessment of key fishery resources in the Northern Humboldt Current System // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. № 1. DOI: 10.1038/s41598-022-08818-5.
6. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Промысловая океанология юго-восточной части Тихого океана. Том I. Изменчивость факторов среды обитания. СПб.: РГГМУ, 2009. 278 с.
7. Herbland A., Voituriez B. La production primaire dans l'upwelling mauritanien en mars 1973 // *Cah. O.R.ST.O.M., Sér. Océanogr*. 1974. Vol. 12. № 3. P. 187—201.
8. Minas H. J. Nutrients and primary production in the upwelling region off Northwest Africa // *Rapports et Proces-verbaux des Réunion. Conseil International pour l'Exploration de la Mer*. 1982. Vol. 180. P. 148—183.
9. Bakun A., Field D., Redondo-Rodriguez A., Weeks S. Greenhouse gas, upwelling-favorable winds, and the future of coastal ocean upwelling ecosystems // *Global Change Biology*. 2010. Vol. 16, 1213—1228. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02094.x.
10. Bakun A., Black B., Bograd S., et al. Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems. // *Current Climate Change Reports*. 2015. Vol. 1. P. 85—93. doi: 10.1007/s40641-015-0008-4.
11. Espinoza-Morriberon, D., Echevin V., Colas F., et al. Impacts of El Nino events on the Peruvian upwelling system productivity // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. Vol. 122. P. 5423—5444, doi:10.1002/2016JC012439.
12. Castillo R., Dalla L., Garcia W., et al. Anchovy distribution off Peru in relation to abiotic parameters: A 32-year time series from 1985 to 2017 // *Fisheries Oceanography* 2019. Vol. 28. P. 389—401. doi:10.1111/fog.12419.
13. FAO State of World Fisheries and Aquaculture. Towards Blue Transformation. FAO – Rome: Food and Agriculture Organization, 2022. 266 p. – ISBN 978-92-5-136364-5 Text (visual): immediate.
14. Малинин В. Н., Чернышков П. П., Гордеева С. М. Канарский апвеллинг: крупномасштабная изменчивость и прогноз температуры воды / В.Н. Малинин, П.П. Чернышков, С.М. Гордеева. СПб: Гидрометеоздат. 2002. 156 с.
15. Духова Л. А., Сапожников В. В. Гидрохимические показатели первичной продукции в зонах Перуанского и Канарского апвеллингов // *Водные биологические ресурсы. Труды ВНИРО*, 2014. Том 152, С. 85—100.
16. Сапожников В. В., Чернышков П. П., Шнар В. Н. и др. Комплексные исследования пелагической экосистемы района Канарского апвеллинга на СТМ «Атлантида» в июле-августе 2006 г. // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 3. С. 473—476.
17. Wooster W. S., Bakun A., McLain D. The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic // *Journal of Marine Research*. 1976. Vol. 34. № 2. P. 131—141.
18. Nykjær L., Van Camp L. Seasonal and interannual variability of coastal upwelling along north-west Africa and Portugal from 1981 to 1991 // *Journal of Geophysical Research*. 1994. Vol. 99. C7. P. 14197—14207.
19. Demarcq H., Faure V. Coastal upwelling and associated retention indices derived from satellite SST. Application to Octopus vulgaris recruitment // *Oceanologica Acta*. 2000. Vol. 23. № 4. P. 391—408. doi: 10.1016/S0399-1784(00)01113-0.

20. Bakun A. Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946—71. U.S. Department of Commerce Publication, NOAA Technical Report NMFS SSRF-671. 1973. 103 p.
21. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al., NCEP – DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // *Bull. American Meteorological Society*. 2002. V. 83. No. 11. P. 1631—1644. doi: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
22. Tarazona J., Arntz W. The Peruvian Coastal Upwelling System. In: Seeliger, U., Kjerfve, B. (eds) *Coastal Marine Ecosystems of Latin America*. // *Ecological Studies*. 2001. Vol. 144. P. 229—244. doi: 10.1007/978-3-662-04482-7_17.
23. Братсерт У. Х. Испарение в атмосфере: Теория, история, приложения. Л., Гидрометеиздат, 1985. 351 с.
24. Richards F. A. Coastal Upwelling. F. A. Richards, Ed., *Coastal Estuarine Science*, American Geophysical Union, Washington DC, Vol. 1. 1981. 215 p. <http://dx.doi.org/10.1029/CO001>.
25. Robert J.P. Aperçu sur l'hydrologie du plateau continental ouest-africain de la Mauritanie a la Guinée / Rapport du groupe de travail ad hoc sur les poissons pélagiques cotiers ouest-africains de la Mauritanie au Liberia (26°N a 5°N). COPACE / PACE Series 78 / 10 (Fr.): 92-97 (annexe 9).
26. Elipot S., Gille S. Ekman layers in the Southern ocean: spectral models and observations, vertical viscosity and boundary layer depth. *Ocean Science*. 2009; (5): 115—139. DOI: 10.5194/OS-5-115-2009.
27. Soto-Mardones L., Parés-Sierra A., Durazo R. Ekman modulation of the sea-surface temperature on the Eastern South Pacific // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2004. Vol. 51, N°6—9, P. 551—561. doi: 10.1016/j.dsr2.2003.06.006.

References

1. Bakun A., Weeks S. The marine ecosystem off Peru: What are the secrets of its fishery productivity and what might its future hold? *Progress in Oceanography*. 2008; 79(2—4): 290—299. DOI: 10.1016/j.pcean.2008.10.027.
2. Heileman, S., Guevara R., Chavez F., et al. Report: A Perspective on Changing Conditions in LMEs of the World's Regional Seas. eds K. Sherman, G. Hempel. XVII-56 Humboldt current: LME 13, in *The United Nations Environment Programme Large Marine Ecosystem (UNEP-LME)*, (Nairobi: United Nations Environment Programme). 2009: 15 p.
3. Gutiérrez D., Akester M., Naranjo L. Productivity and sustainable management of the Humboldt current large marine ecosystem under climate change. *Environmental Development*. 2015; (17): 126—144. DOI: 10.1016/j.envdev.2015.11.004.
4. Karstensen J., Ulloa O. Peru–Chile Current System. *Encyclopedia of Ocean Sciences*. 2009: 385—392. DOI: 10.1016/B978-012374473-9.00599-3.
5. Ramos J. E., Tam J., Aramayo V. et al. Climate vulnerability assessment of key fishery resources in the Northern Humboldt Current System. *Scientific Reports*. 2022. 12(1), 6584. DOI: 10.1038/s41598-022-08818-5.
6. Malinin V.N., Гордеева S.N. *Promyslovaya okeanologiya yugo-vostochnoj chasti Tikhogo okeana. T. 1. Izmenchivost' faktorov sredy obitaniya = Fishery oceanology of south-east Pacific Ocean. Volume 1. Variability of environmental factors*. St. Petersburg: RSHU, 2009: 278 p. (in Russ.).
7. Herbland A., Voituriez B. La production primaire dans l'upwelling mauritanien en mars 1973. *Cah. O.R.ST.O.M., Sér. Océanogr.* 1974; 12(3), 187—201.
8. Minas H. J. Nutrients and primary production in the upwelling region off Northwest Africa. *Rapports et Proces-verbaux des Réunion. Conseil International pour l'Exploration de la Mer*. 1982; (180): 148—183.
9. Bakun, A., Field D., Redondo-Rodriguez A., Weeks S. Greenhouse gas, upwelling-favorable winds and the future of coastal ocean upwelling ecosystems. *Global Change Biology*. 2010; (16): 1213—1228. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02094.x.
10. Bakun A., Black B., Bograd S., et al. Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems. *Current Climate Change Reports*. 2015; (1): 85—93. DOI: 10.1007/s40641-015-0008-4.
11. Espinoza-Morriberon D., Echevin V., Colas F., et al. Impacts of El Niño events on the Peruvian upwelling system productivity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017; (122): 5423—5444. DOI: 10.1002/2016JC012439.

12. Castillo R., Dalla L., García W., et al. Anchovy distribution off Peru in relation to abiotic parameters: A 32-year time series from 1985 to 2017. *Fisheries Oceanography*. 2019; (28): 389—401. DOI: 10.1111/fog.12419.
13. *FAO State of World Fisheries and Aquaculture. Towards Blue Transformation*. FAO – Rome: Food and Agriculture Organization, 2022: 266 p.
14. Malinin V., Chernyshkov P., Gordeeva S. *Kanarskiy apvelling: krupnomasshtabnaya izmenchivost' i prognoz temperatury vody = The Canarian upwelling: a Large-scale variability and forecast of water temperature*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat. 2002: 156 p. (in Russ.)
15. Dukhova L. A., Sapozhnikov V. V. Hydrochemical Indicators of Primary Production within the Peruvian and Canary Upwelling Areas. *Trudy VNIRO = Proceedings of VNIRO*, 2014; (152): 85—100. (in Russ.)
16. Sapozhnikov V. V., Chernyshkov P. P., Schnar V. N. et al. Comprehensive studies of the pelagic ecosystem of the Canary upwelling region on the Atlantis STM in July-August 2006. *Okeanologia = Oceanology*. 2007; 47(3): 473—476. (in Russ.)
17. Wooster W. S., Bakun A., McLain D. The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic. *Journal of Marine Research*. 1976; 34(2): 131—141.
18. Nykjær L., Van Camp L. Seasonal and interannual variability of coastal upwelling along north-west Africa and Portugal from 1981 to 1991. *Journal of Geophysical Research*. 1994; 99(C7): 14197—14207.
19. Demarcq H., Faure V. Coastal upwelling and associated retention indices derived from satellite SST. Application to Octopus vulgaris recruitment. *Oceanologica Acta*. 2000; 23(4): 391—408. DOI: 10.1016/S0399-1784(00)01113-0.
20. Bakun A. Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946—71. U.S. Department of Commerce Publication, NOAA Tech. Rep., NMFS SSRF-671. 1973: 103 p.
21. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al., NCEP – DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002; 83(11): 1631—1644. DOI: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
22. Tarazona J., Armtz W. The Peruvian Coastal Upwelling System. In: Seeliger, U., Kjerfve, B. (eds) Coastal Marine Ecosystems of Latin America. Ecological Studies. 2001. (144). *Springer, Berlin, Heidelberg*. DOI: 10.1007/978-3-662-04482-7_17.
23. Bratsert W. H. Evaporation into the atmosphere: Theory, history, applications. L., Gidrometeoizdat, 1985: 351 p (in Russ.).
24. Richards F. A. Coastal Upwelling. F. A. Richards, Ed., Coastal Estuarine Science, American Geophysical Union, Washington DC. 1981. (1): 215 p. <http://dx.doi.org/10.1029/CO001>.
25. Robert J. P. Aperçu sur l'hydrologie du plateau continental ouest-africain de la Mauritanie a la Guinee. Rapport du groupe de travail ad hoc sur les poissons pélagiques cotiers ouest-africains de la Mauritanie au Liberia (26°N a 5°N). COPACE / PACE Series 78 / 10 (Fr.): 92-97 (annexe 9).
26. Elipot S., Gille S. Ekman layers in the Southern ocean: spectral models and observations, vertical viscosity and boundary layer depth. *Ocean Science*. 2009; (5): 115—139. DOI: 10.5194/OS-5-115-2009.
27. Soto-Mardones L., Parés-Sierra A., Durazo R. Ekman modulation of the sea-surface temperature on the Eastern South Pacific. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2004; 51(6—9): 551—561. DOI: 10.1016/j.dsr2.2003.06.006.

Информация об авторах

Джимми Хуан Мартина-Васкес, аспирант Российского государственного гидрометеорологического университета, jimmymartinavasquez@gmail.com.

Светлана Михайловна Гордеева, кандидат геогр. наук, доцент, доцент кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами Института гидрологии и океанологии Российского государственного гидрометеорологического университета, gordeeva@rshu.ru.

Валерий Николаевич Малинин, доктор геогр. наук, профессор, профессор кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами Института гидрологии и океанологии Российского государственного гидрометеорологического университета, malinin@rshu.ru.

Information about authors

Jimmy Juan Martina Vásquez, PhD student of the Russian State Hydrometeorological University.

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

Valery Nikolaevich Malinin, PhD Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Russian State Hydrometeorological University, Institute of Hydrology and Oceanology, Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Professor.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 04.04.2024

Принята к печати после доработки 24.05.2024

The article was received on 04.04.2024

The article was accepted after revision on 24.05.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 293—309.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(75):293—309.

ЭКОЛОГИЯ. ОБЗОР

Научная статья
УДК 556.555:574.5
doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-293-309

Оценка экологического статуса водоемов на основе построения композитных индексов: методика, результаты, перспективы

***Василий Васильевич Дмитриев, Виктор Юрьевич Третьяков,
Дарья Сергеевна Зырянова, Анаит Арамовна Овсепян,
София Юрьевна Почепко, Анастасия Владимировна
Немчинова, Михаил Олегович Каспин***

Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле,
Санкт-Петербург, Россия, v.dmitriev@spbu.ru

Аннотация. Разработаны новые модели-классификации интегральной оценки экологического статуса водоема. В оценку экологического статуса включены 11 критериев оценки трофности водоема, 14 критериев оценки качества и токсического загрязнения воды, 30 критериев оценки потенциальной устойчивости водоема к изменению параметров естественного режима. Оценка устойчивости водоема выполнена на основе последней авторской методики оценки потенциальной устойчивости. Приведены рекомендации к построению оценочных шкал исходных параметров и субиндексов. Описаны этапы и технология построения интегральных показателей. Рассмотрены примеры оценки экологического статуса для ключевых водоемов.

Ключевые слова: экологический статус, продуктивность, качество воды, потенциальная устойчивость, интегральная оценка, нечисловая информация.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-27-10011, и при финансовой поддержке Санкт-Петербургского научного фонда.

Для цитирования: Дмитриев В. В., Третьяков В. Ю., Зырянова Д. С., Овсепян А. А., Почепко С. Ю., Немчинова А. В., Каспин М. О. Оценка экологического статуса водоемов на основе построения композитных индексов: методика, результаты, перспективы // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 293—309. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-293-309.

Original article

Assessment of the ecological status of reservoirs based on the construction of composite indices: methodology, results, prospects Article title***Vasily V. Dmitriev, Victor Yu. Tretiakov, Daria S. Zyryanova, Anayit A. Ovsepyan, Sofia Yu. Pochepko, Anastasia V. Nemchinova, Mikhail O. Kaspin***

St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg, Russia, earth.spbu.ru

Summary. Theoretical and methodological ideas about the ecological status of a water body have been developed on the basis of: 1 — study of the aquatic ecosystem's ability to produce organic matter; 2 — assessment of changes in water quality and toxic pollution; 3 — assessment of water body stability to changes in natural and anthropogenic regime parameters. The assessment of water body sustainability was carried out on the basis of the last author's methodology for assessing potential sustainability. The assessment of ecological status includes 11 criteria for assessing water body productivity (3 sub-indices IIP1, IIP2, IIP3), 14 criteria for assessing water quality and toxic pollution (3 sub-indices IIQ1, IIQ2, IIQ3), 30 criteria for assessing the potential stability of the water body to changes in the natural regime parameters, including 15 criteria for assessing adaptive stability: IIS1a, IIS2a, IIS3a (3 sub-indices) and 15 — to assess regenerative resilience: IIS1r, IIS2r, IIS3r (3 sub-indices); sub-indices IISa, IISr, IIS and composite index of the last level of convolution IIES. The estimation scales of initial parameters and calculated subindices are given. The stages and technology of II construction are described. On the example of a small lake in the northwestern Ladoga region it is shown that the water body during 6 years kept its ecological status within the limits of II-III classes on the IIES scale under different priorities of subindexes accounting in the IIES assessment. The second object (Nevskaya Bay) was assessed as III-IV classes with the most probable falling into IV class under different assessment priorities.

Keywords: ecological status, productivity, water quality, potential sustainability, integral assessment, non-numerical information.

Acknowledgments: This work was financially supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-27-10011, and by the St. Petersburg Science Foundation.

For citation: Dmitriev V. V., Tretiakov V. Yu., Zyryanova D. S., Ovsepyan A. A., Pochepko S. Yu., Nemchinova A. V., Kaspin M. O. Assessment of the ecological status of reservoirs based on the construction of composite indices: methodology, results, prospects. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(75):293—309. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-293-309.

Введение

В статье обсуждается опыт интегральной оценки экологического статуса водоемов. Оценка состояния сложных систем в природе и обществе, развитие методологии анализа и синтеза показателей, характеризующих это состояние, является актуальной научной проблемой большинства современных научных работ в науках о Земле и окружающей человека природной среде. Эти исследования вплотную соотносятся с развитием методов и моделей оценки воздействия на природные системы и получения ответной реакции системы в целом на оказанное или планируемое воздействие.

Целью работы является обзор и разработка теоретико-методологических основ и новых моделей-классификаций интегральной оценки экологического статуса водоема, совершенствование технологии построения композитных индексов экологического статуса на основе использования нечисловой информации о приоритетах оценивания и учете точности полученных результатов.

Содержанием и задачами исследования являлись:

- 1) разработка и апробация оценочных классификаций для интегральной оценки продуктивности, качества и токсического загрязнения воды, потенциальной устойчивости, экологического благополучия/неблагополучия водных объектов;
- 2) разработка математического аппарата для интегральной оценки экологического статуса водных объектов, их современного и перспективного состояния, тенденций и перспектив их изменения при внешнем воздействии.

Термин «экологический статус» (ЭС) природной системы был предложен нами после получения опыта системных исследований природных объектов. Ранее этот термин можно было встретить в основном в науках об обществе в контексте «экологический статус как часть конституционного статуса гражданина» [1], но чаще упоминался «эколого-правовой статус» при рассмотрении вопросов охраны окружающей среды, экологических прав и обязанностей субъектов — участников экологических правоотношений [2, 3].

В экологической терминологии достаточно давно использовался термин «трофический статус» и «трофический уровень», последний постепенно вытеснил термин «трофический статус» [4, 5]. Да и сам термин «экологическое состояние» при переводе на английский язык определялся как *ecological state* или *environmental status*.

Термин «статус» происходит от латинского *status* — «состояние, положение» и обозначает совокупность стабильных значений параметров объекта (или субъекта). С упрощённой точки зрения статус объекта (субъекта) — это характеристика его состояния, либо позиция, ранг в любой иерархии, структуре, системе, времени. Обращаем внимание на то, что сегодняшний акцент в исследованиях смещается на изучение объекта как системы в целом. Представление природных объектов как сложных систем позволяет нам говорить об оценке статуса как оценке свойства, присущего системе в целом, называемого часто неаддитивным, интегративным, эмерджентным свойством системы, под которым понимается несводимость свойств системы к свойствам её компонентов. Такое сложное свойство нельзя измерить в полевых условиях или свести к покомпонентному анализу изменения во времени и пространстве состава и свойств на уровне отдельных характеристик объекта.

Развитие природного объекта как системы характеризуется системными эффектами — проявлениями эмерджентности на уровне подсистем и их свойств. Системные эффекты сопровождаются изменением системных функций (биопроductiveй, деструкционной и др.). В связи с изменением скоростей процессов массообмена в экосистеме под влиянием большого числа влияющих на них факторов системные функции также обладают эмерджентными свойствами. Результатом этих изменений является трансформация системы. При этом результаты

трансформации могут иметь как положительную, так и отрицательную значимость для развития системы или для человека (общества). Примером отрицательной значимости является антропогенная трансформация системы, рассматриваемая нами как «болезнь» (степень неблагополучия) эко- или геосистемы. Такая оценка должна быть одновременно многокритериальной и полииерархичной (многоуровневой), поскольку использование в оценочных исследованиях только индикаторного подхода (индексологии) не снимает неопределенности в оценке полученных результатов.

При получении неопределенности в результате анализа системы с использованием «целевых индикаторов» исследователь часто «опускает руки» и начинает рассуждать о неприменимости метода или неправомерности его использования. Так, например, поступили авторы в одном из популярных современных зарубежных обобщений [6], в котором было рассмотрено более 1500 работ по индексам, разработанным для оценки «территориальных детерминант» с точки зрения охраны окружающей среды. Они выявили более 20 «пространственно-распределенных композитных индексов», в основе которых содержалась информация о более 300 натуральных характеристик состава и свойств объектов исследования. Авторы сделали вывод, что «это может привести к сильной субъективности и ограничению возможности сопоставления различных оценочных результатов».

На наш взгляд, выводы должны были свидетельствовать о том, что сравнивать оценочные результаты, полученные на разных моделях-классификациях (с учетом целей исследования), по величинам абсолютных значений индексов и субиндексов вообще не имеет смысла, хотя такой результат часто присутствует в современных публикациях. В этих случаях также получается, что исследуемую систему можно отнести к разным классам состояния по разным композитным индексам. В итоге авторы ограничились только первым этапом в исследовании системных свойств — обоснованием выбора оценочных критериев, оставив без обсуждения опыт построения композитных индексов и рекомендации по технологии получения и анализа оценочных результатов.

Отметим, что разные системные свойства, являющиеся часто эмерджентными, всегда можно представить в виде отдельных субиндексов (продуктивности, качества и токсического загрязнения, устойчивости, и др.). В этом случае появляется возможность учитывать приоритеты вклада каждого субиндекса на всех уровнях иерархии в получении итогового интегрального показателя. Затем в серии экспериментов, учитывающих возможные траектории развития системы при разных приоритетах оценивания, можно выявить, способна ли система сохранить свой статус (класс состояния) после оказанного воздействия (изменения приоритетов развития). На всех этапах (уровнях свертки) необходимо предусмотреть оценку точности полученных результатов. Сравнить результаты, полученные по разным оценочным классификациям, можно только по попаданию в определенный класс с учетом расчета точности полученных результатов.

В этом случае исследователь всегда выходит на подтверждение системологических принципов изучения сложных систем: иерархической организации сложной системы (интегративных уровней); контринтуитивного поведения сложной

системы; множественности моделей в изучении сложных систем на основе модельного представления объектов исследования; «относительности конкретного».

Оценить экологическое состояние природного объекта можно в определенный момент времени (экологическая ситуация) или за определенный временной интервал (экологическая обстановка). Это важное замечание выводит нас на рекомендацию, как следует оценивать системные эффекты. Например, химический и биологический состав, токсическое загрязнение воды можно определить в разные моменты времени, а для оценки экологического статуса требуется выполнить оценку для некоторого временного интервала, например, 3—5 лет.

Под экологической оценкой можно понимать параметрическое определение состояния природной среды, обеспечивающего существование живых организмов в условиях естественного и/или антропогенного режимов их развития. Сравнительно недавно в отечественную научную литературу был введен термин «геоэкологическая оценка». В работе [7] под геоэкологической оценкой понимается «многопараметрический анализ природно-ресурсного потенциала естественных и антропогенно-измененных ландшафтов с целью определения их возможности выполнять задаваемые им социально-экономические функции без нарушения функций жизнеобеспечения (средо- и ресурсовоспроизводства). В работе [8] в качестве геоэкологической оценки рассматривается параметрическое определение состояния антропогенно-трансформированной геосистемы, обеспечивающего существование конкретных сообществ живых организмов и человека (общества) с целью выделения антропогенной составляющей и последствий этих изменений на фоне природных процессов. При этом в оценку предлагалось включать две составляющие: 1) «геоэкологическую регламентацию», представляющую собой анализ параметров состояния антропогенно-трансформированной геосистемы, определение интервалов изменений элементов ее режимов (естественного и антропогенного); 2) «геоэкологическое нормирование» и выявление пороговых и критических величин воздействия на систему.

Геоэкологическое нормирование можно рассматривать как нормирование любого антропогенного воздействия на геосистему, при котором можно оценить реакцию геосистемы в целом или какого-либо ее «критического звена» (подсистемы) на это воздействие. Критическим звеном считается наиболее уязвимая («слабое звено») экосистема. Это означает, что нагрузка, допустимая на эту экосистему, принимается в качестве допустимой нагрузки для геосистемы в целом [8]. Под «геоэкологическим мониторингом» рассматривается информационная система наблюдений, оценки и прогноза изменений в состоянии окружающей среды, созданная с целью выделения антропогенной составляющей этих изменений на фоне природных процессов [8].

Под устойчивостью в данной работе понимается способность системы сохранять свои свойства, системные функции и параметры режимов в условиях внутренних и внешних воздействий. Новым является то, что при расчете интегральных показателей устойчивости (ИПУ) реализуется учет двух типов устойчивости: адаптационной и регенерационной. Поясним, что чаще всего в экологической литературе термин *устойчивость* используется в следующих значениях:

— *инертность системы* — способность экосистемы сохранять при внешнем воздействии исходное состояние в течение некоторого времени;

— *пластичность системы* — способность экосистемы переходить из одного состояния равновесия в другое, сохраняя при этом внутренние связи;

— *восстанавливаемость системы* — способность экосистемы возвращаться в исходное состояние после временного внешнего воздействия.

Первые два понятия трактуются как *адаптационная устойчивость*, третье — как *регенерационная* [8].

В наши дни исследования устойчивости системы (объекта) постепенно сместились на оценку только потенциальной устойчивости (устойчивости к изменению параметров естественного режима или устойчивости к изменению физико-географических условий, климатических и гидрологических особенностей объекта) [9]. Одновременный учет потенциальной устойчивости с изменением продуктивности и качества воды отражает способность/неспособность системы сохранять экологический статус системы и выводит исследователя на новый уровень — оценку способности системы сохранять свой экологический статус в естественных и антропогенных условиях развития.

Методика исследования

Решение проблемы оценки экологического статуса водных объектов и выделение экорегионов Европы в странах ЕС было сопряжено с принятием, доработкой и адаптацией Директивы Европейского парламента и Совета по установлению рамок действий Сообщества в области водной политики (Directive of the European Parliament and of the Council on setting the framework for Community action in the field of water policy). Основная цель «Директивы» в ЕС представлялась как достижение экологического благополучия или высокого экологического статуса для всех водных систем [10]. Характерной чертой зарубежных и большинства отечественных публикаций является отказ от экологической квалитметрии (работы со шкалами натуральных значений характеристик, которые чаще всего переводят в баллы). Балльная шкала при этом трансформирует натуральную шкалу, переводя её в линейную равномерную прямую или обратную шкалу. Баллы далее складывают с учетом или без учета веса (технология обоснования весов не раскрывается) и получается сумма баллов, которую можно дальше взять в рейтинг или в работу с ГИС для получения различных тематических карт [11]. При этом в легенде карт часто присутствует несколько цветовых вариантов «патчей», соответствующих классам балльной авторской шкалы, введенной на основе $(max - min)/n$, где *max* и *min* — максимальное и минимальное количество баллов для ИП или какого-либо субиндекса, для которого строится карта; *n* — количество классов, введенное автором.

При оценке экологического статуса водоема нами изначально учитывалось параметрическое многокритериальное и многоуровневое сочетание продукционного потенциала системы (интегральный показатель трофности ИПТ), качества, токсического загрязнения среды (интегральный показатель качества ИПК) и



Рис. 1. Схема построения интегрального показателя экологического статуса водоема.

Fig. 1. Scheme for constructing an integral indicator of the ecological status of a water body.

потенциальной устойчивости водоема (интегральный показатель устойчивости ИПУ), представленное соответствующими субиндексами (рис. 1).

Для построения ИПТ, ИПК, ИПУ и интегрального показателя экологического статуса (ИПЭС) нами применялась АСПИД-методология (Анализ и Синтез Показателей при Информационном Дефиците) с учетом использования нечисловой (а также неполной и неточной) информации (*ннн*-информации) для получения оценочных результатов [12, 13]. В данной статье рассмотрены последние модели-классификации и технология построения ИПТ, ИПК, ИПУ и ИПЭС с учетом новых идей в оценке отдельных субиндексов и, прежде всего, субиндекса потенциальной устойчивости ИПУ.

Результаты исследований

В качестве объекта исследования в работе было выбрано малое озеро в северо-западном Приладжье (оз. Суури, Большое Волковское) [14]. Технология и рекомендации формирования оценочных шкал исходных характеристик, расчета субиндексов и их оценочных шкал по классам экологического статуса по всем уровням свертки показателей для классификации, приведенной на рис. 1, подробно рассмотрены в наших последних публикациях [14—16].

В целом в оценку экологического статуса включены 11 критериев оценки трофности водоема (3 субиндекса), 14 критериев оценки качества и токсического

загрязнения воды (3 субиндекса), 30 критериев оценки потенциальной устойчивости водоема к изменению параметров естественного режима: 15 критериев для оценки адаптационной устойчивости (3 субиндекса) и 15 критериев для оценки регенерационной устойчивости (3 субиндекса) и, соответственно, субиндекс ИПУ и композитный индекс ИПЭС (рис. 1). Всего использовалось 55 критериев, при этом отметим, что критерии для оценки ИПУа и ИПУр, как правило, одноименные, но направленность изменения характеристик задается в зависимости от вида устойчивости и сезона года.

При оценке адаптационной устойчивости (холодное время года) высокая устойчивость в этот период обусловлена «стагнацией» процессов зимой (система «спит»). Физические процессы и процессы массообмена в системе проходят с низкими скоростями. Система очень медленно самоочищается. При оценке регенерационной устойчивости (теплый период года) высокая устойчивость в этот период обусловлена повышенными скоростями массообмена и самоочищения (повышение температуры увеличивает массообмен и естественное самоочищение водоема).

Рассмотрим содержание и характеристику основных этапов построения интегрального показателя экологического статуса водоема.

Этап 1. Выбор и обоснование составляющих (характеристики, блоки, субиндексы, уровни свертки, классы) для оценки ИПЭС. Выбранные характеристики агрегируются в блоки. Каждый блок является основой построения соответствующих субиндексов (ИПТ, ИПК, ИПУ), используемых для интегральной оценки ИПЭС. Субиндекс ИПТ учитывает продуктивность (трофность) водоема, ИПК — качество и токсическое загрязнение воды, ИПУ — потенциальную устойчивость водоема. Для каждого блока (субиндекса) отбираются не более 5—7 критериев, представленных показателями x_1, \dots, x_m , которые образуют группы характеристик для построения субиндексов разных порядков, входящих в ИПТ, ИПК, ИПУ и отражающих связь x_i с соответствующим интегративным свойством водоема (продуктивность, качество, устойчивость).

Для снижения мультиколлинеарности предусмотрено использование небольшого числа слабо коррелируемых критериев в каждой группе. Определяется количество классов, формируются оценочные шкалы для всех критериев для левой и правой границы каждого класса для каждого субиндекса. Устанавливаются предельные значения min_i, \dots, max_i (минимум и максимум, имеющие региональный смысл) для всех характеристик, входящих в субиндексы; вид и монотонность связи всех параметров с оцениваемым свойством водоема.

Каждый субиндекс в соответствии с рис. 1 может быть представлен несколькими субиндексами второго порядка: трофности (ИПТ1, ИПТ2, ИПТ3), качества (ИПК1, ИПК2, ИПК3), устойчивости (ИПУа, ИПУр). Субиндексы ИПУа и ИПУр, в свою очередь, также представлены субиндексами третьего порядка: ИП1а, ИП2а, ИП3а и ИП1р, ИП2р, ИП3р (рис.1). Их содержание раскрыто нами в публикации [9]. Построение ИПУ1, ИПУ2, ИПУ3 для модели адаптационной устойчивости (М1) и регенерационной устойчивости (М2) выполняется с учетом вида связи (прямая/обратная) и линейности/нелинейности связей.

Этап 2. Для каждого субиндекса выполняется нормирование показателей на основе нормирующих функций (1) и (2). Выбор нормирующей функции зависит от вида связи (прямая или обратная, линейная-нелинейная) и предпочтения исследователя в формировании шкал нормированных значений (слева 0 или слева 1).

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_i \leq \min_i \\ \left(\frac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i} \right)^\lambda, & \text{при } (\min_i < x_i \leq \max_i), \\ 1, & \text{при } x_i > \max_i \end{cases} \quad (1)$$

где q_i — преобразованное значение x_i ; x_i — текущее значение параметра; \min_i — минимальное (фоновое, допустимое и т.п.) значение параметра; \max_i — максимальное значение параметра (лучше ориентироваться на региональные, но не на абсолютные максимумы параметров). Исследователь должен дополнительно выбрать показатель степени λ , определяющий характер и степень выпуклости нормирующей функции $q_i(x_i)$: при $\lambda > 1$ соответствующая нормирующая функция выпукла вниз, а при $\lambda < 1$ — вверх.

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 1, & \text{при } x_i \leq \min_i \\ \left(\frac{\max_i - x_i}{\max_i - \min_i} \right)^\lambda, & \text{при } (\min_i < x_i \leq \max_i). \\ 0, & \text{при } x_i > \max_i \end{cases} \quad (2)$$

В результате нормирования получают безразмерные показатели q_1, \dots, q_m , $0 \leq q_i \leq 1$. Их часто называют *отдельными показателями*. Каждый q_i является функцией исходной характеристики $q_i = q_i(x_i)$ и позволяет оценить ИП с точки зрения i -го критерия. При этом близость величины q_i и ИП к нулю может характеризовать устойчивость как низкую, а близость q_i и ИП к 1 — как высокую. Здесь возможны две ситуации в зависимости от предпочтения автора, который может принять близость q_i и ИП к нулю за высокий класс, а близость q_i и ИП к 1 — за низкий или наоборот. Это отразится на выборе нормирующей функции при расчетах ИП и направленности оценочных шкал (от 0 к 1 или от 1 к 0).

Этап 3. При построении каждого субиндекса выбирается синтезирующая функция $Q(q) = Q(q_1, \dots, q_m)$, агрегирующая нормированные показатели q_1, \dots, q_m в единый интегральный показатель $Q = Q(q)$, сопоставляя j -му свойству (т.е. его оценке $q^{(j)} = (q_1^{(j)}, \dots, q_m^{(j)})$) некоторую числовую оценку $Q^{(j)} = Q(q^{(j)}) = Q(q_1^{(j)}, \dots, q_m^{(j)})$. На синтезирующую функцию, определяющую интегральный показатель, накладываются ограничения: $Q(0, \dots, 0) = 0$; $Q(1, \dots, 1) = 1$; $0 \leq Q \leq 1$. Простейшей синтезирующей функцией, используемой в данной работе, является линейная функция вида:

$$Q = Q(q; w) = Q(q_1, \dots, q_m; w_1, \dots, w_m) = \sum_{i=1}^m q_i w_i.$$

Этап 4. Задание весовых коэффициентов $w = (w_1, \dots, w_m)$ — неотрицательные веса, задающие приоритетность (важность, значимость) нормированных показателей для построения каждого субиндекса. Сумма весов в каждом субиндексе равна 1. Учет *ннн*-информации (экспертной информации) о весах:

1 — нечисловая, ординальная (порядковая) информация — *OI*:

$$OI = \{w_r > w_s, w_u = w_v, \dots r, s, u, v \in \{1, \dots, m\}\}.$$

2 — неточная, интервальная информация о весах — *II*:

$$II = \{0 \leq a_i \leq w_i \leq b_i \leq 1, i \in \{1, \dots, m\}\}.$$

3 — итоговая информация: $I = OI + II$.

Этап 5. Выполняется построение всех субиндексов и ИПЭС для левой и правой границ классов и для всех уровней свертки ИП. Векторы весовых коэффициентов $w = (w_1, \dots, w_n)$ определяют приоритет (значимость) нормированных показателей для интегральной оценки на всех уровнях свертки.

Этап 6. Переход к средним значениям интегральных показателей и оценка точности расчета ИПЭС выполняется по следующим формулам:

$$\bar{Q}^{(j)}(I) = \bar{Q}(q^{(j)}; I) = \bar{Q}(q^{(j)}, \bar{w}(I)) = \frac{1}{N(m, n; I)} \sum_{t=1}^{N(m, n; I)} Q^{(t)}(q^{(j)}),$$

$$[S^{(j)}(I)]^2 = \frac{1}{N(m, n; I)} \sum_{t=1}^{N(m, n; I)} [Q^{(t)}(q^{(j)}) - \bar{Q}^{(j)}(I)]^2.$$

Для оз. Суури оценка экологического статуса оценивалась по модели-классификации, приведенной на рис. 1, и по более ранней, приведенной в [14].

Результаты построения оценочных шкал ИПЭС для 5 разных вариантов учета приоритетов (весов) на последнем уровне свертки (ИПЭС = ИПТ + ИПК + ИПУ) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты построения оценочных шкал интегрального показателя экологического статуса (ИПЭС) для пяти вариантов учета приоритетов (весов) на последнем уровне свертки

Results of constructing the evaluation scales of the integral indicator of ecological status (IES) for five variants of taking into account priorities (weights) at the last level of convolution

1. Оценочная шкала ИПЭС для равновесных условий ИПТ = ИПК = ИПУ						
ИПТ	0,00—0,230	0,230—0,398	0,398—0,564	0,564—0,800	0,800—1,000	0,333
ИПК	0,000—0,145	0,145—0,308	0,308—0,429	0,429—0,648	0,648—1,000	0,333
ИПУ	0,000—0,137	0,137—0,262	0,262—0,471	0,471—0,735	0,735—1,000	0,333
ИПЭС	0,000—0,171	0,171—0,323	0,323—0,488	0,488—0,728	0,728—1,000	
2. Оценочная шкала ИПЭС для ИПТ > ИПК = ИПУ						
ИПТ	0,000—0,230	0,230—0,398	0,398—0,564	0,564—0,800	0,800—1,000	0,700
ИПК	0,000—0,145	0,145—0,308	0,308—0,429	0,429—0,648	0,648—1,000	0,150
ИПУ	0,000—0,137	0,137—0,262	0,262—0,471	0,471—0,735	0,735—1,000	0,150
ИПЭС	0,000—0,203	0,203—0,364	0,364—0,530	0,530—0,767	0,767—1,000	

Окончание табл. 1

3. Оценочная шкала ИПЭС для ИПК > ИПТ = ИПУ						
ИПТ	0,000—0,230	0,230—0,398	0,398—0,564	0,564—0,800	0,800—1,000	0,150
ИПК	0,000—0,145	0,145—0,308	0,308—0,429	0,429—0,648	0,648—1,000	0,700
ИПУ	0,000—0,137	0,137—0,262	0,262—0,471	0,471—0,735	0,735—1,000	0,150
ИПЭС	0,000—0,157	0,157—0,315	0,315—0,456	0,456—0,684	0,684—1,000	
4. Оценочная шкала ИПЭС для ИПУ > ИПТ = ИПК						
ИПТ	0,000—0,230	0,230—0,398	0,398—0,564	0,564—0,800	0,800—1,000	0,150
ИПК	0,000—0,145	0,145—0,308	0,308—0,429	0,429—0,648	0,648—1,000	0,150
ИПУ	0,000—0,137	0,137—0,262	0,262—0,471	0,471—0,735	0,735—1,000	0,700
ИПЭС	0,000—0,152	0,152—0,289	0,289—0,479	0,479—0,732	0,732—1,000	
5. Оценочная шкала ИПЭС для ИПУ > ИПК > ИПТ						
ИПТ	0,000—0,230	0,230—0,398	0,398—0,564	0,564—0,800	0,800—1,000	0,086
ИПК	0,000—0,145	0,145—0,308	0,308—0,429	0,429—0,648	0,648—1,000	0,277
ИПУ	0,000—0,137	0,137—0,262	0,262—0,471	0,471—0,735	0,735—1,000	0,636
ИПЭС	0,000—0,147	0,147—0,287	0,287—0,467	0,467—0,716	0,716—1,000	

Примечание. В последней колонке указан вес субиндекса в свертке при получении ИПЭС.

В табл. 2 приводятся результаты интегральной оценки ЭС оз. Суури при разных приоритетах свертки ИП на последнем уровне по рассмотренной выше классификации. Анализ таблицы показал, что при всех 5 рассмотренных вариантах изменения приоритетов водоем по величине ИПЭС попадает в II (варианты 2 и 3 — IIп) и III (вариант 1 — IIIл, 5 — IIIс, 4 — IIIп) классы экологического статуса. При этом субиндексы ИПТ и ИПК дают IIс, а вклад ИПУ — IVл. Интересно, что вариант 1 (равновесомость) отличается от варианта 5 (приоритет — устойчивость) на полкласса (IIIл и IIIс соответственно).

Таблица 2

Интегральный показатель экологического статуса (ИПЭС) для оз. Суури при разных приоритетах на последнем уровне свертки субиндексов трофности, качества, устойчивости

Integral indicator of ecological status (IIES) for Lake Suuri at different priorities at the last stage of convolution of sub-indices of productivity, quality, sustainability

Номер варианта и приоритет ИП	ИПЭС по вариантам ИПТ = 0,341 (IIс) ИПК = 0,238 (IIс) ИПУ = 0,509 (IVл)	Водоем первой категории I	Водоем второй категории II	Водоем третьей категории III	Водоем четвертой категории IV	Водоем пятой категории V
1. ИПТ = ИПК = ИПУ	0,341×0,333+ 0,238×0,333+ 0,509×0,333 = 0,362	0,000— 0,171	0,171—0,323	<u>0,323—0,488^л</u> 0,406 0,362(IIIл)	0,488— 0,728	0,728— 1,000
2. ИПТ > ИПК = ИПУ	0,341×0,700+ 0,238×0,150+ 0,509×0,150 = 0,351	0,000— 0,203	<u>0,203—0,364</u> 0,284 0,351(IIп)	0,364—0,530	0,530— 0,767	0,767— 1,000
3. ИПК > ИПТ = ИПУ	0,341×0,150+ 0,238×0,700+ 0,509×0,150 = 0,294	0,000— 0,157	<u>0,157—0,315</u> 0,236 0,294(IIIп)	0,315—0,456	0,456— 0,684	0,684— 1,000

Номер варианта и приоритет ИП	ИПЭС по вариантам ИПТ = 0,341 (IIIc) ИПК = 0,238 (IIIc) ИПУ = 0,509 (IVл)	Водоем первой категории I	Водоем второй категории II	Водоем третьей категории III	Водоем четвертой категории IV	Водоем пятой категории V
4. ИПУ > ИПТ = ИПК	0,341×0,150+ 0,238×0,150+ 0,509×0,700 = 0,443	0,000— 0,152	0,152—0,289	<u>0,289—0,479</u> 0,384 0,443(IIIп)	0,479— 0,732	0,732— 1,000
5. ИПУ > ИПК > ИПТ	0,341×0,086+ 0,238×0,277+ 0,509×0,636 = 0,419	0,000— 0,147	0,147—0,287	<u>0,287—0,467</u> 0,377 0,419(IIIc)	0,467— 0,716	0,716— 1,000

Примечание. 1) в первой строке таблицы даны левая и правая границы классов; ниже — середина класса; еще ниже — результат оценки ИПЭС. В скобках римской цифрой дан класс с указанием близости к левой (л), правой (п) границе или к середине (с) класса.

Оценка точности при моделировании весов w_i на основе задания нечисловой информации в вариантах 1—5 приведена в табл. 3.

Таблица 3

Оценка точности расчета w_i для пяти вариантов задания приоритетов при расчете интегральных показателей экологического статуса водоема
Assessment of accuracy of w_i calculation for five variants of prioritization in calculation of integral indicators of ecological status of a water body

Номер варианта и приоритет ИП	w_1	w_2	w_3
1. ИПТ = ИПК = ИПУ	0,333±0,253	0,333±0,253	0,333±0,253
2. ИПТ > ИПК = ИПУ	0,700±0,200	0,150±0,100	0,150±0,100
3. ИПК > ИПТ = ИПУ	0,150±0,100	0,700±0,200	0,150±0,100
4. ИПУ > ИПТ = ИПК	0,150±0,100	0,150±0,100	0,700±0,200
5. ИПУ > ИПК > ИПТ	0,086±0,076	0,277±0,102	0,636±0,139

В табл. 4 приведена точность расчета ИПЭС вариантов 1—5 для правых границ всех классов в оценочной классификации ИПЭС (этап 6).

В публикации [14] было показано, что в течение 5 лет оз. Суури было способно сохранить свой ЭС в пределах III класса, ближе к левой границе класса. Полученные в настоящей статье результаты подтверждают и уточняют данный вывод.

Таблица 4

Среднеквадратическое отклонение ИПЭС для правых границ классов в оценочных шкалах
Standard deviation of IIES for right class boundaries in the estimation scales

Номер варианта и приоритет ИП	Водоем первой категории I	Водоем второй категории II	Водоем третьей категории III	Водоем четвертой категории IV	Водоем пятой категории V
1. ИПТ = ИПК = ИПУ	0,023	0,030	0,030	0,033	0,000
2. ИПТ > ИПК = ИПУ	0,018	0,023	0,023	0,022	0,000
3. ИПК > ИПТ = ИПУ	0,008	0,004	0,018	0,024	0,000

Окончание табл. 4

Номер варианта и приоритет ИП	Водоем первой категории I	Водоем второй категории II	Водоем третьей категории III	Водоем четвертой категории IV	Водоем пятой категории V
4. ИПУ > ИПТ = ИПК	0,010	0,018	0,005	0,002	0,000
5. ИПУ > ИПК > ИПТ	0,007	0,012	0,008	0,009	0,000

Вторым ключевым объектом являлась Невская губа восточной части Финского залива. Результаты интегральной оценки ИПЭС для этого объекта приведены в табл. 5. При построении ИПЭС нами использовались рекогносцировочные данные для задания характеристик при расчетах субиндексов ИПТ, ИПК, ИПУ различных районов Невской губы. Было выполнено несколько вариантов оценочных расчетов, отличающихся заданием величин расчетных характеристик. Пример расчета приведен в табл. 5.

Таблица 5

Интегральный показатель экологического статуса для характерных условий района Невской губы Финского залива при разных приоритетах в свертки субиндексов
Integral indicator of ecological status for characteristic conditions of the Nevskaya Bay of the Gulf of Finland at different priorities in convolution of sub-indices

Номер варианта и приоритет ИП	Водоем первой категории I	Водоем второй категории II	Водоем третьей категории III	Водоем четвертой категории IV	Водоем пятой категории V
1. ИПТ = ИПК = ИПУ	0,000—0,171	0,171—0,323	0,323—0,488	0,488—0,728 ¹⁾ 0,608 0,495 (IVл)	0,728—1,000
2. ИПТ > ИПК = ИПУ	0,000—0,203	0,203—0,364	0,364—0,530 0,447 0,494 (IIIп)	0,530—0,767	0,767—1,000
3. ИПК > ИПТ = ИПУ	0,000—0,157	0,157—0,315	0,315—0,456 0,389 0,435 (IIIп)	0,456—0,684	0,684—1,000
4. ИПУ > ИПТ = ИПК	0,000—0,152	0,152—0,289	0,289—0,479	0,479—0,732 0,606 0,560 (IVл)	0,732—1,000
5. ИПУ > ИПК > ИПТ	0,000—0,147	0,147—0,287	0,287—0,467	0,467—0,716 0,592 0,561 (IVс)	0,716—1,000

Примечание. 1) в первой строке таблицы даны левая и правая границы классов; ниже — середина класса; еще ниже — результат оценки ИПЭС. В скобках римской цифрой дан класс с указанием близости к левой (л), правой (п) границе или к середине (с) класса

Из табл. 5 следует, что ИПЭС Невской губы для пяти вариантов задания приоритетов (весов) на последнем уровне свертки (ИПЭС = ИПТ + ИПК + ИПУ) в трех вариантах относится к левой границе — середине IV класса и в двух вариантах — к правой границе III класса. В последнем случае с учетом среднеквадратического отклонения ИПЭС также попадает в IV класс.

Заключение

Усовершенствованы теоретико-методологические представления об экологическом статусе водоема на основе:

— исследования способности водной экосистемы продуцировать органическое вещество;

— оценки изменения качества и токсического загрязнения воды;

— оценки устойчивости водного объекта к изменению параметров естественного и антропогенного режимов.

Потенциальная устойчивость водоема оценивалась на основе авторской методики оценки устойчивости к изменению естественного режима или устойчивости к изменению физико-географических условий, климатических и гидрологических особенностей объекта. В работе приведен опыт одновременного учета потенциальной устойчивости, продуктивности, качества и токсического загрязнения воды при построении интегрального показателя экологического статуса (ИПЭС) водоема. В оценку экологического статуса включены 11 критериев оценки трофности водоема (3 субиндекса ИПТ1, ИПТ2, ИПТ3), 14 критериев оценки качества и токсического загрязнения воды (3 субиндекса ИПК1, ИПК2, ИПК3), 30 критериев оценки потенциальной устойчивости водоема к изменению параметров естественного режима. При этом используются 15 критериев для оценки адаптационной устойчивости: ИП1а, ИП2а, ИП3а (3 субиндекса) и 15 — для оценки регенерационной устойчивости: ИП1р, ИП2р, ИП3р (3 субиндекса); субиндексы ИПУа, ИПУр, ИПУ и композитный индекс последнего уровня свертки ИПЭС. Получены и приведены в статье все оценочные шкалы рассчитанных субиндексов. Описаны этапы и технология построения ИП. Для построения субиндексов применялась АСПИД-методология (Анализ и Синтез Показателей при Информационном Дефиците) с учетом использования нечисловой информации для получения оценочных результатов. На примере малого озера в северо-западном Приладожье (оз. Суури) показано, что водоем в течение 6 лет сохранял свой экологический статус в пределах II—III классов по шкале ИПЭС при разных приоритетах учета субиндексов в оценке ИПЭС. Второй объект (Невская губа) оценен III—IV классами с наиболее вероятным попаданием в IV класс.

В результате выполненной работы показана возможность оценки экологического статуса водоема на основе построения композитных индексов с учетом использования нечисловой информации при моделировании весов (приоритетов) на последнем уровне свертки субиндексов. Выполнена оценка точности расчета приоритетов (весов) и значений ИПЭС в рассмотренных примерах и вариантах.

Список литературы

1. Studbooks.net: [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://studbooks.net/882915/pravo/ekologicheskiy_status_chast_konstitutsionnogo_statusa_grazhdanina (дата обращения: 02.05.2024).
2. Солнцев А. М. Защита экологических прав человека: учебное пособие. / 3-е изд., перераб. и доп. Москва: РУДН. 2021. 516 с.
3. Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года (утв. Президентом РФ 30.04.2012). 2012. 12 с.

4. Адамович Б. В. Трофический статус как важный показатель экологического состояния водных экосистем / Сахаровские чтения 2021 года: экологические проблемы XXI века: материалы 21-й международной научной конференции, 20—21 мая 2021 г., Минск, Республика Беларусь: в 2 ч. 2021. Ч. 2. С. 153—155.
5. Dodds W. K., Cole J. J. Expanding the concept of trophic state in aquatic ecosystems: It's not just the autotrophs // *Aquatic Science*. 2007. V. 69. P. 427—439.
6. Brousmichea D., Occellia F., Geninb M. et al. Spatialized composite indices to evaluate environmental health inequalities: Meeting the challenge of selecting relevant variables. *Ecological Indicators*. 2020;(111) 106023. URL.: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106023>. (дата обращения: 03.02.2020).
7. Осипов А. Г. Интегральная оценка устойчивости ландшафтов при создании сельскохозяйственных угодий природно-аграрных систем // *Вестник СПбГУ. Серия 7. Геология. География*. 2016. Вып. 3. С. 140—162. doi: 10.21638/11701/spbu07.2016.312.
8. Александрова Л. В., Васильев В. Ю., Дмитриев В. В. и др. Многокритериальные географо-экологические оценки состояния и устойчивости природных и урбанизированных систем. / Под ред. В. В. Дмитриева и Н. В. Хованова. Деп. ВИНТИ 01.09.2000, № деп.2342В00, 275 с.
9. Овсепян А. А., Панютин Н. А., Дмитриев В. В. Потенциальная устойчивость водоема: от балльно-индексных оценок к интегральной оценке на основе композитных индексов // *Международный студенческий научный вестник*. 2024. № 1. doi: 10.17513/msnv.21434.
10. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal L 327*, 22/12/2000. 73 p.
11. Istak A., Nibedita D., Jatan D. et al. Flood hazard zonation using GIS-based multi-parametric Analytical Hierarchy Process Geosystems and Geoenvironment Volume 3, Issue 2, May 2024, 100250. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772883823000730?via%3Dihub>.
12. Хованов Н. В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. СПб: Изд-во СПбГУ, 1996. 196 с.
13. Корников В. В., Хованов Н. В., Юдаева М. С. Многокритериальная классификация в условиях дефицита числовой информации // *Труды Карельского научного центра РАН* № 5. 2012. С. 38—43.
14. Архипов Д. Э., Едемский К. Е., Кожевникова С. И. и др. Развитие мониторинга водных объектов на основе интегральной оценки экологического статуса и моделирования экологических функций // *Европейский журнал естественной истории*. 2022. №2. С. 31—37.
15. Зырянова Д. С., Немчинова А. В., Дмитриев В. В. Пространственно-временная изменчивость химического и биологического состава и физических свойств водной экосистемы малого озера в северо-западном Приладожье // *Международный студенческий научный вестник*. 2024. № 1. doi: 10.17513/msnv.21433.
16. Почепко С. Ю., Каспин М. О., Дмитриев В. В. Оценка влияния факторов на экологические функции и продукционно-деструкционные отношения в водной экосистеме // *Международный студенческий научный вестник*. 2024. № 1. doi: 10.17513/msnv.21435.

References

1. Studbooks.net: [Electronic resource]. Access mode: https://studbooks.net/882915/pravo/ekologicheskij_status_chast_konstitutsionnogo_statusa_grazhdanina (access date: 02.05.2024).
2. Solntsev A. M. *Zashchita ekologicheskikh prav cheloveka: uchebnoye posobiye = Protection of environmental human rights: textbook*. / 3rd ed., revision and addendum. Moscow: PFUR, 2021: 516 p. (In Russ.)
3. Fundamentals of state policy in the field of environmental development of the Russian Federation for the period up to 2030 (approved by the President of the Russian Federation 30.04.2012). 2012; 12 p. (In Russ.)
4. Adamovich B. V. Trophic status as an important indicator of the ecological state of aquatic ecosystems / *Sakharov Readings 2021: environmental problems of the XXI century: proceedings of the 21st International Scientific Conference, May 20-21. 2021, Minsk, Republic of Belarus: in 2 parts. 2021; PART 2: (153—155)*. (In Russ.)

5. Dodds W. K., Cole J. J. Expanding the concept of trophic state in aquatic ecosystems: It's not just the autotrophs. *Aquatic Science*. 2007; (69): 427—439.
6. Brousmichea D., Occellia F., Geninb M. et al. Spatialized composite indices to evaluate environmental health inequalities: Meeting the challenge of selecting relevant variables. *Ecological Indicators*. 2020; (111) 106023. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.106023.
7. Osipov A. G. Integrated assessment of sustainability of landscapes in the creation of agricultural land natural agricultural systems. *Vestnik VGU, Seriya: Geology. Geography = VSU Bulletin, Series: Geology. Geography*, 2016; (3): (140–162). (In Russ.). doi: 10.21638/11701/spbu07.2016.312.
8. *Multicriteria geographic and ecological assessments of the state and sustainability of natural and urbanized systems*. Edited by V. V. Dmitriev and N. V. Hovanov. Deposited to VINITI on 01.09.2000, dep. 2342B00, 275 p. <https://proxy.library.spbu.ru:3693/item.asp?id=30689943> (дата обращения: 28.11.2020) (In Russ.).
9. Ovspeyan A. A., Panyutin N. A., Dmitriev V. V. Potential water body stability: from point-index assessments to integral assessment based on composite indices. *Mezhdunarodnyy studentcheskiy nauchnyy vestnik = International Student Scientific Bulletin*. 2024; 1. doi: 10.17513/msnv.21434 (in Russ.).
10. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal L*. 327, 22/12/2000. 73 p.
11. Istak A., Nibedita D., Jatan D. et al. Flood hazard zonation using GIS-based multi-parametric Analytical Hierarchy Process Geosystems and Geoenvironment 2024; 3(2): 100250. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772883823000730?via%3Dihub>
12. Hovanov N. V. *Analiz i sintez pokazateley pri informatsionnom defitsite = Analysis and synthesis of indicators for information deficit*. SPb. Publishing house of SPb University. 1996: 196 p. (In Russ.).
13. Kornikov B. V., Hovanov N. V., Yudaeva M. S. Multicriteria classification under conditions of numerical information deficit. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012; 5: (48—43). (In Russ.).
14. Arkhipov D. E., Edemsky K. E. E., Kozhevnikova S. I. et al. Development of monitoring of water bodies on the basis of integral assessment of ecological status and modeling of ecological functions. *Yevropeyskiy zhurnal yestestvennoy istorii = European Journal of Natural History*. 2022; (2): (31—37). (In Russ.).
15. Zyryanova D. S., Nemchinova A. V., Dmitriev V. V. Spatial and temporal variability of chemical and biological composition and physical properties of aquatic ecosystem of a small lake in the northwestern Priladozhye. *Mezhdunarodnyy studentcheskiy nauchnyy vestnik = International Student Scientific Bulletin*. 2024; 1. doi: 10.17513/msnv.21433 (in Russ.).
16. Pochepko S. Y., Kaspin M. O., Dmitriev V. V. Assessment of the influence of factors on ecological functions and production-destruction relations in aquatic ecosystem. *Mezhdunarodnyy studentcheskiy nauchnyy vestnik = International Student Scientific Bulletin*. 2024; 1. doi: 10.17513/msnv.21435 (in Russ.).

Информация об авторах

Василий Васильевич Дмитриев, доктор географических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, профессор, v.dmitriev@spbu.ru.

Виктор Юрьевич Третьяков, кандидат географических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, доцент, v_yu_tretyakov@mail.ru.

Дарья Сергеевна Зырянова, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, студент, evienche13@gmail.com.

Анайит Арамовна Овсеян, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, студент, annahit2002@mail.ru.

София Юрьевна Почепко, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, студент, roschepkosofia@gmail.com.

Анастасия Владимировна Немчинова, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, студент, st086233@student.spbu.ru.

Михаил Олегович Каспин, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, студент, st087575@student.spbu.ru.

Information about authors

Vasily V. Dmitriev, Doctor of Geographical Sciences, Professor, St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Professor, v.dmitriev@spbu.ru.

Victor Yu. Tretiakov, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Associate Professor, v_yu_tretyakov@mail.ru.

Daria S. Zyryanova, St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, student, evienche13@gmail.com.

Anayit A. Ovsepyan, St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, student, anna-hit2002@mail.ru.

Sofia Yu. Pochepko, St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, student, pochepko-sofia@gmail.com.

Anastasia V. Nemchinova, St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, student, st086233@student.spbu.ru.

Mikhail O. Kaspin, St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, student, st087575@student.spbu.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 01.05.2024

Принята к печати после доработки 30.05.2024

The article was received on 01.05.2024

The article was accepted after revision on 30.05.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 310—317.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(75):310—317.

ЭКОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 556.555.7(282.247.412)
doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-310-317

Многолетние изменения балансов химических веществ в Можайском водохранилище

Юрий Сергеевич Даценко, Валерий Владимирович Пуклаков

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, ФГБОУ, г. Москва,
Россия, yuri0548@mail.ru

Аннотация. На примере Можайского водохранилища анализируются многолетние изменения балансов биогенных веществ и органических веществ. Ряды длительностью 62 года (с момента создания водохранилища) созданы расчетами по имитационной гидроэкологической модели. Установлено снижение удерживающей способности водохранилища по фосфатам, органическому веществу, железу и марганцу, обусловленное изменением внутриводоемных составляющих баланса в результате увеличения объемов зон аноксии в гипolimнионе водохранилища.

Ключевые слова. Можайское водохранилище, балансы биогенных веществ, удерживающая способность водохранилища, зоны аноксии, трофность.

Для цитирования: Даценко Ю. С., Пуклаков В. В. Многолетние изменения балансов химических веществ в Можайском водохранилище // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 310—317. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-310-317.

ECOLOGY

Original article

Long-term changes of chemical balances in the Mozhask reservoir

Yuri S. Datsenko, Valery V. Puklakov

Lomonosov Moscow State University, FGBOU, Moscow, Russia, yuri0548@mail.ru

Summary. The long-term changes in the balances and retention capacity of biogenic and organic substances in a typical Mozhask valley reservoir, which carries out deep flow regulation and stratified in summer, the series of balance components of chemicals for the entire 62-year period of operation of the reservoir are analyzed by mathematical modeling using a simulated hydroecological model that allows calculating spatial and temporal changes of environmental characteristics with a daily step. The trends of decreasing the retention capacity of the reservoir in phosphates, iron, manganese, organic matter and its increase in nitrates have been established. The decrease in the retention capacity of the reservoir is due to changes in the oxygen regime of the hypolimnion of the reservoir. An increase in the volume of anoxia zones leads to an increase in the intensity of nutrient flows at the water-bottom sediment boundary. Due

© Даценко Ю. С., Пуклаков В. В., 2024

to these increases, the intra-reservoir component of the incoming part of the balance of substances in the reservoir increases and, accordingly, the difference between the intake and discharge of substances from the reservoir decreases, which manifests itself in a decrease in the retention capacity of the reservoir. According to long-term data, the relationship between the retention capacity of the reservoir for phosphate and iron with the volumes of anoxia zones in the reservoir has been established. The increase in nitrate consumption is due to a gradual increase in the primary productivity of the reservoir and its eutrophication. Model calculations have also obtained long-term changes in the primary production of the reservoir. The revealed tendency to decrease the ratio of phytoplankton production and biomass in the reservoir indicates a decrease in energy efficiency per unit of biomass during the development of the reservoir ecosystem.

Keywords. Mozhaisk reservoir, nutrient balances, reservoir retention capacity, anoxia zones, trophicity.

For citation: Datsenko Y. S., Puklakov V. V. Long-term changes of chemical balances in the Mozhaisk reservoir. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(75):310—317. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-310-317.

Введение

Оценка состояния и многолетних тенденций изменения экосистем водохранилищ представляет собой самостоятельное исследование вследствие исключительной сложности и многофакторности процессов, определяющих изменения в круговороте вещества и энергии с течением времени. Причины этих изменений связаны с нестационарностью гидрологического режима и внешнего воздействия в виде непредсказуемо меняющейся синоптической обстановки. При создании водохранилищ происходит трансформация химического стока рек под влиянием комплекса внутриводоемных физических, химических и биологических процессов. Определенное представление о характере этой трансформации и, следовательно, о степени влияния водохранилища на химический сток может быть получено анализом многолетних балансов химических веществ, суммарно учитывающих их поступление и сброс из водоема. Эти балансы могут существенно различаться в зависимости от особенностей внутриводоемных процессов под влиянием гидрометеорологических факторов и режима регулирования стока в разные годы. При этом интегральную характеристику влияния водохранилища на химический сток в системе «ландшафт водосбора реки — водные массы водохранилища — донные отложения» можно получить расчетами разницы поступления вещества и его расходования, отнесенной к величине поступления, называемой удерживающей способностью водохранилища (R , %). Однако анализ многолетних изменений удерживающей способности водоемов чрезвычайно затруднен из-за отсутствия надежной информации о составляющих баланса химических веществ на протяжении длительных периодов эксплуатации водохранилища. Альтернативным методом решения этой задачи может служить гидроэкологическое моделирование, с помощью которого можно рассчитать многолетние балансы химических веществ и тем самым учесть многообразие влияния внутриводоемных процессов на экосистему водохранилища в различные по гидрометеорологическим условиям годы.

Цель работы состоит в анализе многолетних изменений балансов органического вещества, минеральных форм азота и фосфора, железа и марганца в Можайском водохранилище — типичном долинном водохранилище многолетнего регулирования стока.

Материал и методика

Осуществляющее многолетнее регулирование стока с целью увеличения водных ресурсов московского источника водоснабжения г. Москвы Можайское водохранилище — типичный относительно глубокий морфологически простой водоем долинного типа (объем при НПУ — 0,24 км³, площадь — 31 км², максимальная глубина — 22 м), имеющий вытянутую в плане акваторию и замедленный водообмен (коэффициент водообмена — 1,15 1/год)

Для расчета балансов использовалась двумерная боксовая гидроэкологическая модель водохранилищ ГМВ-МГУ. Модель с суточным шагом воспроизводит физико-химико-биологические характеристики водных масс в отдельных участках водохранилища с учетом особенностей ложа и проточности в зависимости от ежедневно меняющихся погодных условий, притока воды с водосбора и ее сброса в нижний бьеф гидроузла. Подробное описание модели и оценки ошибок расчетов путем валидации результатов по гидролого-гидрохимическим съемкам водохранилища изложены в монографии [1]. Приходная часть химических балансов представляет собой приток веществ с речными водами, который рассчитывался по данным мониторинга качества воды водохранилища для разных фаз гидрологического режима по эмпирическим зависимостям концентраций химических веществ от расходов воды притоков. Расход веществ из водохранилища определялся по данным о сбросах воды в нижний бьеф и концентраций в сбросе, рассчитанных по модели, как результат их трансформации в водохранилище под влиянием внутриводоемных процессов.

Модельными расчетами были сформированы многолетние ряды годовых внешних балансов показателей органического вещества (по перманганатной окисляемости), концентраций железа, марганца, аммонийного азота, нитратов и фосфатов за весь 62-летний период эксплуатации водохранилища (1961—2022 гг.).

Результаты

Средне многолетние значения удерживающей способности Можайского водохранилища по рассмотренным показателям химического состава воды характеризуются положительными величинами. Однако только для железа положительное значение внешнего баланса наблюдалось во все рассмотренные годы, для остальных показателей были годы, когда сброс из водохранилища превышал приток. Многолетние колебания удерживающей способности водохранилища для рассматриваемых характеристик представлены на рис. 1.

Прямая линия представляет линейный тренд, значимость которого (вклад в дисперсию функции отклика) можно оценить по коэффициенту детерминации. Критическое значение R^2 на уровне значимости 0,05 определяется по формуле $R^2_{кр} = 4/(n+2)$. При $n = 62$ $R^2_{кр} = 0,062$. Из рис. 1 видно, что тренды являются значимыми за исключением тренда аммонийного азота.

Отчетливо выраженная тенденция снижения удерживающей способности водохранилища проявляется для железа, марганца, фосфатов и органического вещества. Влияние водохранилища на трансформацию аммонийного азота с течением

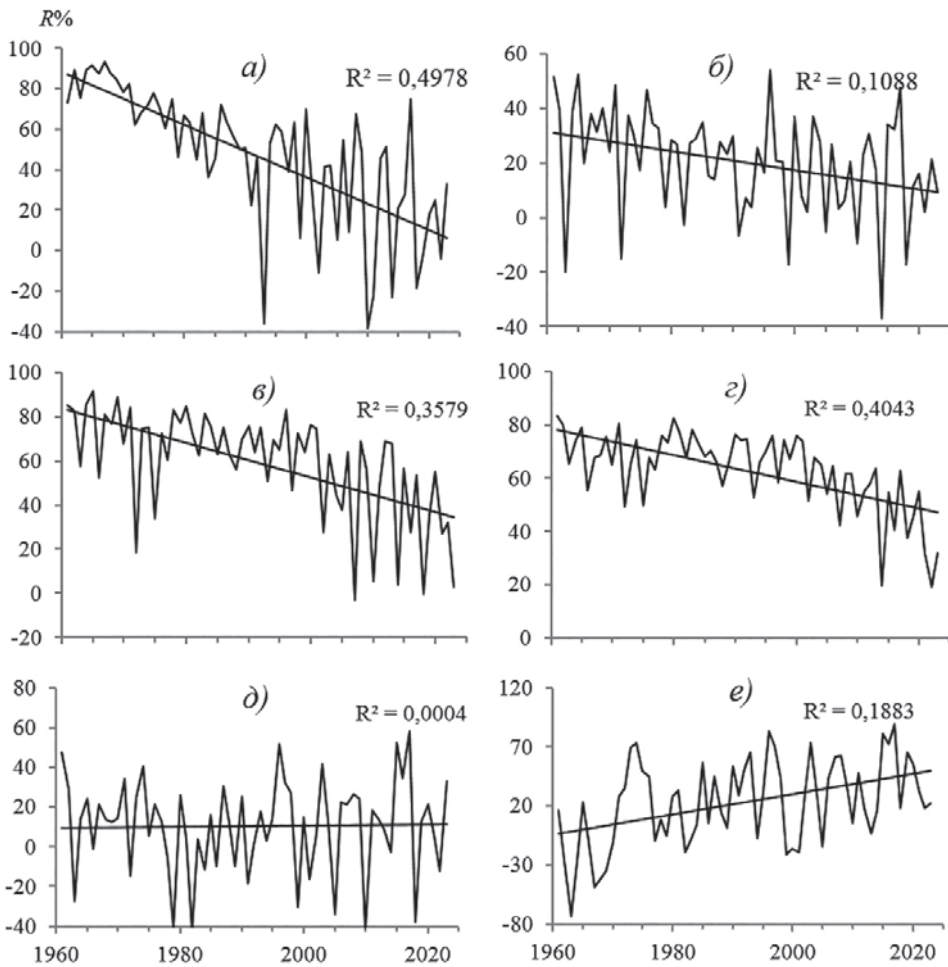


Рис. 1. Многолетние изменения удерживающей способности ($R\%$) Можайского водохранилища по а) фосфатам, б) перманганатной окисляемости (ПО), в) железу, г) марганцу, д) аммонийному иону, е) нитратам.

Fig. 1. Long-term changes in the retention capacity ($R\%$) of the Mozhaisk reservoir by а) phosphates, б) permanganate oxidizability, (PO), в) iron, г) manganese, д) ammonium ion, е) nitrates.

времени не изменяется, а для нитратов величина годового удержания постепенно увеличивается.

Высокие значения удерживающей способности водохранилища по железу и марганцу обусловлены образованием взвешенных форм этих элементов из растворенных закисных соединений с последующим осаждением в условиях замедления водообмена при доминировании окислительно-восстановительных

процессов, протекающих в водохранилище с участием микроорганизмов. Для балансов железа и марганца отмечено существование прямой зависимости удерживающей способности водохранилища от водности года, при этом в многоводные годы влияние водохранилища на сток этих веществ возрастает. Высокий коэффициент корреляции связи величин удерживающей способности железа и марганца подтверждает сходство механизмов трансформации этих элементов переменной валентности в водохранилище.

Отмеченные тенденции однозначно связаны с постепенными изменениями, происходящими с течением времени в экосистеме водохранилища, которые обусловлены главным образом энергетической основой круговорота вещества и энергии в водоеме — первичным продуцированием органического вещества. Ранее в Можайском водохранилище уже была отмечена многолетняя тенденция роста величины годовой первичной продукции [2]. Одним из важнейших следствий эвтрофирования является изменение режима растворенного кислорода и увеличения объемов и продолжительности существования зон аноксии в придонных слоях водохранилища [3]. Аноксия в придонных слоях оказывает большое влияние на процессы обмена на границе «вода — донные отложения», увеличивая интенсивность диффузионных потоков химических веществ из дна в водную толщу [4]. Потоки из донных отложений входят в приходную часть внутриводоемных составляющих баланса химических веществ. По-видимому, именно увеличение этой составляющей определяет снижение удерживающей способности водохранилища по веществам, в круговороте которых существенную роль играет внутренняя нагрузка. Это подтверждается существованием значимой зависимости удерживающей способности по фосфору и железу (рис. 2) и объемами зон аноксии (коэффициенты корреляции соответственно 0,72, $\alpha = 0,05$ и 0,74, $\alpha = 0,05$).

Тенденция уменьшения удерживающей способности по органическому веществу связана с увеличением общего содержания органического вещества

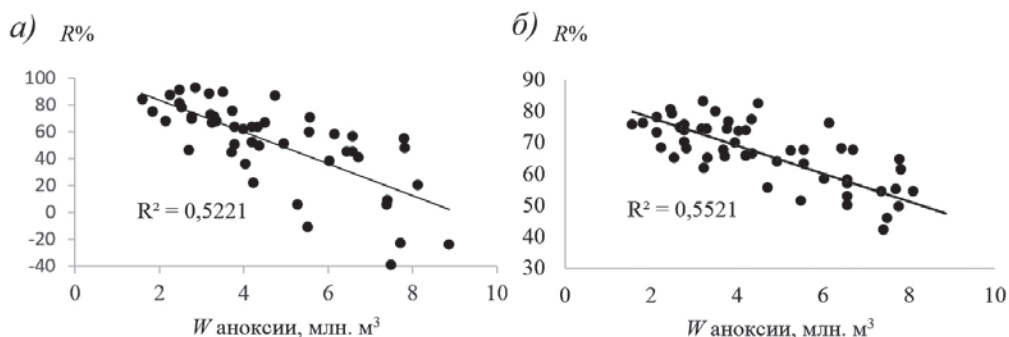


Рис. 2. Зависимость удерживающей способности водохранилища от объемов зон аноксии в гипolimнионе водохранилища по фосфатам (а) и железу (б).

Fig. 2. Dependence of the retention capacity of the reservoir on the volume of anoxia zones in the hypolimnion of the reservoir for phosphates (a) and iron (b).

в водохранилище в результате роста первичной продуктивности экосистемы водохранилища, что, видимо, проявилось даже для показателя стойкого органического вещества — перманганатной окисляемости.

Многолетние тенденции удерживающей способности минеральных азотных соединений имеют несколько иной характер. Удерживающая способность водохранилища по нитратам с течением времени увеличивается, а для аммонийного азота не изменяется. Это, вероятно, обусловлено возрастанием интенсивности потребления минерального азота в продукционных процессах при эвтрофировании водохранилища. Донные отложения во внутриводоемном круговороте азотных соединений имеют значительно меньшее значение, чем для фосфатов и железа. Для аммонийного азота возрастающее потребление при увеличении биомассы фитопланктона частично компенсируется потоками из дна, а для нитратов, практически не имеющих этого внутриводоемного источника, это не происходит, поэтому внешний баланс увеличивается.

Наконец, еще один аспект многолетних изменений показателей экологического состояния водоема заслуживает внимания в связи с эволюцией его экосистемы. В процессе эвтрофирования происходит снижение интенсивности фотосинтеза на единицу хлорофилла или снижение его ассимиляционной активности. В ходе развития экосистемы (сукцессии) уменьшается отношение продукция/биомасса (П/Б коэффициент). Это соответствует тому, что экосистема стремится к состоянию, когда на единицу доступной энергии приходится максимум биомассы [5]. Рассчитанные нами многолетние изменения соотношения П/Б в Можайском водохранилище (рис. 3) показали, хотя и слабую, но достаточно отчетливо выраженную тенденцию уменьшения этого соотношения, иллюстрирующую существующие теоретические представления о развитии экосистемы водохранилища.

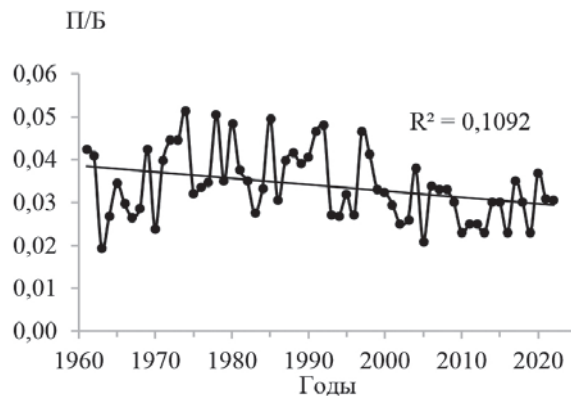


Рис. 3 Многолетние изменения П/Б коэффициента фитопланктона Можайского водохранилища.

Fig. 3 Long-term changes in the P/B coefficient of phytoplankton in the Mozhaisk reservoir.

Заключение

Анализом многолетних рядов внешних балансов биогенных и органических веществ в Можайском водохранилище установлены тенденции понижения удерживающей способности по органическому веществу, фосфатам, железу и марганцу и повышения по нитратам. Появление этих тенденций обусловлено изменениями в экосистеме водохранилища, связанными с ростом его первичной продуктивности. Эвтрофирование Можайского водохранилища привело к изменениям внутриводоемных составляющих баланса биогенных веществ, в частности увеличения потоков на границе «вода – донные отложения», что проявилось в снижении удерживающей способности водохранилища по рассмотренным веществам. Закономерности развития экосистемы водохранилища сопровождаются снижением количества энергии, расходуемой на единицу биомассы фитопланктона, что подтверждается установленной для водохранилища тенденцией уменьшения отношения продукции к биомассе за период его эксплуатации.

Список литературы

1. Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) / под ред. К. К. Эдельштейна. М.: Перо, 2015. 286 с.
2. Эдельштейн К. К., Даценко Ю. С., Пуклаков В. В. Цветение водохранилища многолетнего регулирования стока // Водные ресурсы, 2021. №2. С.164—172. DOI: 10.31857/S0321059621020048.
3. Даценко Ю. С., Пуклаков В.В. Анализ многолетних изменений зон аноксии в Можайском водохранилище по результатам модельных расчетов // Водные ресурсы, 2021. №1. С.34—41. DOI: 10.31857/S0321059621010132.
4. Даценко Ю. С. Методы оценки внутренней биогенной нагрузки водоемов (обзор) // Труды Карельского научного центра РАН. Серия: Лимнология и океанология. 2019. №9. С.116—124. DOI: 10.17076/lim1049.
5. Минеева Н. М. Первичная продукция планктона в водохранилищах Волги. Ярославль: Принтхаус, 2009. 278 с.

References

1. Hydroecologycheskii rejim vodohranilisch Podmoskovyya (nablyudeniya, diagnoz, prognoz). Hydroecological regime of reservoirs of Moscow region. Moscow. Pero. 2015: 286. [In Russian].
2. Edelshtein R. R., Datsenko Y. S., Puklakov V. V. Blooming reservoirs of long-term flow regulation. *Vodnye resursy = Water resources*. 2021; (2): (164—172). [In Russian]. DOI: 10.31857/S0321059621020048.
3. Datsenko Y. S., Puklakov V. V. Analysis of long-term changes in anoxia zones in the Mozhaik reservoir based on the results of model calculations. *Vodnye resursy = Water resources*. 2021; (1): (34—41). [In Russian]. DOI: 10.31857/S0321059621010132.
4. Datsenko Y. S. Methods for assessing the internal biogenic load of reservoirs (review). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya Limnologiya i okeanologiya = Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Limnology and Oceanology*. 2019; (9): (116—124). [In Russian]. DOI: 10.17076/lim1049.
5. Mineeva N. M. The primary production of plankton in the reservoirs of the Volga. *Yaroslavl. Prinhaus*. 2009: 79 p. [In Russian].

Сведения об авторах

Юрий Сергеевич Даценко, доктор географических наук, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, профессор кафедры гидрологии суши географического факультета, yuri0548@mail.ru.

Валерий Владимирович Пуклаков, кандидат географических наук, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, старший научный сотрудник кафедры гидрологии суши географического факультета.

Information about authors

Yuri Sergeevich Datsenko, Doctor of Geographical Sciences, Lomonosov Moscow State University, Professor of the Department of Hydrology, Faculty of Geography, yuri0548@mail.ru.

Valery Vladimirovich Puklakov, Candidate of Geographical Sciences, Lomonosov Moscow State University, Senior Researcher at the Department of Hydrology, Faculty of Geography.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 01.02.2024

Принята к печати после доработки 29.04.2024

The article was received on 01.02.2024

The article was accepted after revision on 29.04.2024

Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 318—327.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(75):318—327.

Научная статья
УДК [556.114.7:543.225](282.247.211)
doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-318-327

Обоснование показателей качества воды по содержанию металлов в Онежском озере

Григорий Тевелевич Фрумин¹, Евгения Сергеевна Негодина²

¹ Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена (РГПУ), Санкт-Петербург, Россия, gfrumin@mail.ru

² Санкт-Петербургский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии

Аннотация. В статье приведены результаты расчетов региональных предельно допустимых концентраций девяти металлов (железо, марганец, хром, никель, медь, цинк, кадмий, свинец, алюминий) в воде Онежского озера. Для расчётов использованы три различных метода: метод С. А. Патина, метод Д. Г. Замолдчикова и метод Е. В. Веницианова и соавторов. На основе принципа санитарного максимализма обоснован оптимальный метод расчёта региональных предельно допустимых концентраций металлов — метод, разработанный Е. В. Венициановым и соавторами. Установлена «весьма высокая» теснота связи между региональными предельно допустимыми концентрациями металлов и их кларками в земной коре.

Ключевые слова: Онежское озеро, металлы, предельно допустимые концентрации, кларки.

Для цитирования: Фрумин Г. Т., Негодина Е. С. Обоснование показателей качества воды по содержанию металлов в Онежском озере // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 318—327. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-318-327.

Original article

Justification of water quality indicators for metal content in Lake Onega

Grigory T. Frumin¹, Evgenia S. Negodina²

¹ Herzen State Pedagogical University of Russia

² St. Petersburg Branch of the Russian Federal Research Institute of Fishery and Oceanography

Summary. To correctly assess the degree of contamination of a water body with substances of dual origin, it is necessary to take into account the regional natural and climatic features of its catchment area. The most significant drawback of the federal fishery system of maximum permissible concentrations of harmful substances is the lack of consideration of the natural and climatic features of the catchment areas of specific water bodies (natural geochemical anomalies with different levels of natural compounds). The article presents the results of calculations of regional maximum permissible concentrations of nine metals (iron, manganese, chromium, nickel, copper, zinc, cadmium, lead, aluminum) in the water of the Lake Onega.

Three different methods were used for calculations: the method of S. A. Patina, D. G. method Zamolodchikov and the method of E. V. Venitsianov and co-authors. Based on the principle of sanitary maximalism, the optimal method for calculating regional maximum permissible concentrations of metals is substantiated — the method developed by E. V. Venitsianov and co-authors. The study used technology for calculating regional maximum permissible concentrations based on estimates of nonparametric statistical indicators. This technology, unlike other methodological approaches, makes it possible to take into account the volume of statistical samples under consideration and their variability. As a result of calculations, the following regional maximum permissible concentrations of metals in the water of the Lake Onega were determined: 129 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (iron), 4.7 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (manganese), 0.6 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (chrome), 0.9 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (nickel), 1.6 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (copper), 3.5 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (zinc), 0.04 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (cadmium), 0.4 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (lead), 230 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (aluminum). A «very high» close relationship has been established between the regional maximum permissible concentrations of metals in the water of the Lake Onega and their clarkes in the earth's crust.

Key words: Lake Onega, metals, maximum permissible concentrations, clarks.

For citation: Frumin G. T., Negodina E. S. Justification of water quality indicators for metal content in Lake Onega. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(75):318—327 (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-318-327.

Введение

В 1985 г. Верховный Совет СССР принял постановление, в котором различным министерствам и ведомствам было поручено провести комплекс научных исследований с целью перевода всей системы государственного контроля загрязнения окружающей среды в стране на экологическую основу. Предложено разработать принципиально новый экологический подход к нормированию антропогенных воздействий, которые в настоящее время основываются на предельно допустимых концентрациях (ПДК) загрязняющих веществ, имеющих для воды одного и того же объекта разные значения для различных водопользователей.

В течение длительного времени разрабатывались и используются два вида нормирования ПДК — гигиеническое и рыбохозяйственное. Как правило, второе много строже первого. Гигиенические нормативы ПДК предназначались для обеспечения безопасных условий водопользования для человека, а не для защиты экологического благополучия водоема.

Система контроля и регламентирования качества водной среды рыбохозяйственных водоемов основана на установлении ПДК загрязняющих веществ путем выполнения по определенной схеме экспериментов с гидробионтами. То есть, вредное воздействие определялось в лабораторных условиях на определенных, наиболее уязвимых организмах (планктонные ракообразные (главным образом дафнии), развивающаяся икра, личинки и молодь рыб, одноклеточные водоросли); предполагалось, что и остальные члены сообщества будут реагировать на токсиканты подобным образом.

Однако установлено, что последствия одновременного воздействия нескольких токсикантов неэквивалентны сумме последствий их индивидуального влияния. Такой эффект, как правило, обусловлен тем, что организм подвергается дополнительному влиянию продуктов, образующихся в результате химических реакций между токсикантами. Взаимовлияние может проявляться в различных формах, терминологически известных как антагонизм, синергизм, сенсibiliзация.

К сожалению, действующая система нормирования качества природных вод не обеспечивает сокращение антропогенной нагрузки на водную среду, поэтому неудивительно, что к настоящему времени к ней накопилось достаточно много претензий [1].

Примерно с 1990-х годов система предельно допустимых концентраций вредных веществ в водных объектах, имеющих рыбохозяйственное значение (ПДК_{РХ}), подвергается аргументированной критике, подробно изложенной в ряде работ [2—10].

Оценка качества поверхностных вод на основе общенациональных ПДК полностью игнорирует не только уникальность водосборов, но и их естественное природное разнообразие [11].

В идеале ПДК_{РХ} должны иметь региональный характер и могут отличаться на 3—7 порядков [1].

Цель исследования заключалась в обосновании региональных предельно допустимых концентраций металлов в Онежском озере — ПДК_{РЕГ}.

Отличие принятого нами подхода к установлению ПДК_{РХ} от традиционного заключается в том, что он основывается на конкретных данных мониторинга и не использует проведение лабораторных экспериментов с гидробионтами.

Материалы и методы исследования

Онежское озеро расположено в зоне Европейского Севера России, между 60°55'–62°55' с.ш., 34°14'—36°30' в.д. Административно акватория озера принадлежит трем субъектам Российской Федерации — Ленинградской, Вологодской областям и Республике Карелия (рис. 1).

Онежское озеро — крупнейший после Ладожского озера пресный водоем Европы и европейского северо-запада России. Оно представляет собой объект широкого комплексного использования: служит источником питьевого, коммунально-бытового и промышленного водоснабжения, является водохранилищем Верхне-Свирской ГЭС, воднотранспортной магистралью, приемником сточных вод, имеет большое рыбохозяйственное и рекреационное значение.

Площадь зеркала — 9720 км², максимальная глубина — 120 м, средняя глубина — 30 м, объем водной массы — 292 км³ [12].

Для расчетов ПДК_{РЕГ} были использованы первичные данные гидрохимического мониторинга, заимствованные из статей [13—15]. В этих публикациях приведены концентрации девяти металлов (железа, марганца, хрома, никеля, меди, цинка, кадмия, свинца и алюминия), то есть веществ двойного (естественного и техногенного) генезиса в различных районах Онежского озера (Большое Онего, Малое Онего, Южное Онего, Центральное Онего и т.д.) в различные сезоны 2019—2021 гг.

Расчеты ПДК_{РЕГ} для железа проведены только для открытой части озера.

Для расчетов ПДК_{РЕГ} использованы три различных метода, разработанных С. А. Патиным [16], Д. Г. Замолодчиковым [17] и Е. В. Венициановым с соавторами [18] (табл. 1).



Рис. 1. Карта-схема Онежского озера.

Fig. 1. Scheme map of the Lake Onega.

Таблица 1

Математические модели для расчетов
региональных предельно допустимых концентраций

Mathematical models for calculating regional maximum allowable concentrations

Авторы метода	Модель ПДК _{РЕГ}
С. А. Патин	$ПДК_{РЕГ} = C_{СР} + 2\sigma$, $C_{СР}$ — средняя концентрация, мкг/дм ³ , σ — стандартное отклонение
Д. Г. Замолодчиков	$ПДК_{РЕГ} = ВК + 1,5(ВК - НК)$, ВК и НК — верхний и нижний квар- тили распределения
Е. В. Веницианов и соавторы	$ПДК_{РЕГ} = ВК - 2,9\sigma/\sqrt{N}$, где N — объем выборки

Результаты исследования

Значения N , C_{CP} , σ , ВК и НК для металлов в Онежском озере представлены в табл. 2. Для расчетов использован пакет прикладных программ Excel.

Таблица 2

Исходные показатели для расчетов региональных предельно допустимых концентраций металлов в Онежском озере, мкг/дм^3

Initial indicators for calculating regional maximum allowable concentrations of metals in the Lake Onega, $\mu\text{g/dm}^3$

Металл	N	C_{CP}	НК	ВК	σ
Fe	67	104	68,3	89	117,1
Mn	106	35,2	14	26	75,5
Cr	190	0,68	0,4	0,69	0,54
Ni	216	0,85	0,53	0,96	0,56
Cu	216	1,44	0,97	1,80	0,78
Zn	216	3,27	1,96	3,91	2,31
Cd	216	0,045	0,01	0,05	0,07
Pb	214	0,32	0,15	0,42	0,26
Al	62	194	30	296,6	180

По формулам, приведенным в табл. 1, тремя методами были рассчитаны величины $\text{ПДК}_{\text{РЕГ}}$ металлов в Онежском озере (табл. 3). В табл. 3 для последующего анализа добавлены значения ПДК металлов для рыбохозяйственных водных объектов ($\text{ПДК}_{\text{РХ}}$) и среднее содержание металлов в земной коре (кларки) [19].

Таблица 3

Региональные предельно допустимые концентрации металлов в Онежском озере, мкг/дм^3

Regional maximum allowable concentrations of metals in the Lake Onega, $\mu\text{g/dm}^3$

Авторы метода/металл	Fe	Mn	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Al
С. А. Патин	495	186	1,8	2,0	3,0	7,9	0,2	0,8	554
Д. Г. Замолодчиков	279	44	1,1	1,6	3,0	6,8	0,1	0,8	697
Е. В. Веницианов и соавторы	129	4,7	0,6	0,9	1,6	3,5	0,04	0,4	230
$\text{ПДК}_{\text{РХ}}$, мкг/дм^3	100	10	20	10	1	10	1	6	40
Кларк, мг/кг	40600	770	92	50	39	75	0,64	17	76100

Приведенные в табл. 3 результаты расчетов $\text{ПДК}_{\text{РЕГ}}$ показывают существенные различия этих величин в зависимости от метода расчета. Например, $\text{ПДК}_{\text{РЕГ}}$ марганца в Онежском озере равна 186 мкг/дм^3 при расчете методом С. А. Патина и $4,7 \text{ мкг/дм}^3$ при расчете методом Е. В. Веницианова с соавторами, то есть различие составляет 39,6 раз. Как следует из табл. 3, наименьшие величины $\text{ПДК}_{\text{РЕГ}}$ зафиксированы для каждого из девяти рассмотренных металлов при использовании метода Е. В. Веницианова с соавторами.

Центральное место при регламентации воздействия вредных веществ на человека и гидробионтов занимает «принцип санитарного максимализма»: когда все

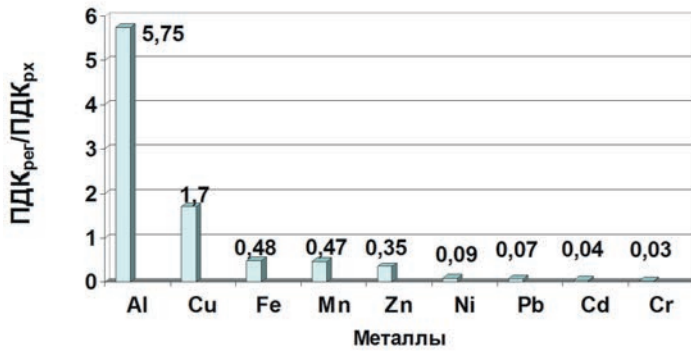


Рис. 2. Отношение региональных предельно допустимых концентраций металлов в Онежском озере к предельно допустимым концентрациям металлов для рыбохозяйственных водоемов.

Fig. 2. Ratio of regional maximum allowable metal concentrations in the Lake Onega to maximum allowable metal concentrations for fishery reservoirs.

неоднозначно, все неопределенно, нормативы трактуются в сторону ужесточения, то есть в сторону снижения показателя [20].

Иными словами, в качестве оптимального метода расчетов ПДК_{РЕГ} следует рассматривать метод, разработанный Е. В. Венициановым и соавторами.

В то же время действующая методика расчета такого широко обсуждаемого норматива как НДВ (норматив допустимого воздействия), наоборот, требует ослабления норматива, то есть, чем меньше имеем информации о состоянии водного объекта, тем менее жесткие нормативы предлагаются для него.

В исследовании использована технология расчетов региональных ПДК на основе оценок непараметрических статистических показателей. Данная технология, в отличие от других методических подходов, позволяет учитывать объем рассматриваемых статистических выборок и их изменчивость.

По данным табл. 3 рассчитаны отношения ПДК_{РЕГ}/ПДК_{РХ} (рис. 2).

Приведенные на рис. 2 данные свидетельствуют о том, что ПДК_{РЕГ}, рассчитанные методом Е. В. Веницианова и соавторов, для алюминия и меди больше общефедеральных величин ПДК_{РХ}, а для других металлов — меньше.

Соотношение между натуральными логарифмами ПДК_{РЕГ} и натуральными логарифмами кларков металлов в земной коре представлено на рис. 3.

Линия регрессии, приведенная на рис. 3, описывается следующей формулой:

$$\ln \text{ПДК}_{\text{РЕГ}} = -2,674 + 0,674 \ln(\text{кларк}), \quad (1)$$

$$n = 9; r = 0,971; r^2 = 0,942; \sigma = 0,665; F_p = 113,61; F_T = 5,32; F_p/F_T = 21,4$$

n — количество металлов, r — коэффициент корреляции, r^2 — коэффициент детерминации, σ — стандартная ошибка, F_p — расчетное значение критерия Фишера, F_T — табличное значение критерия Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

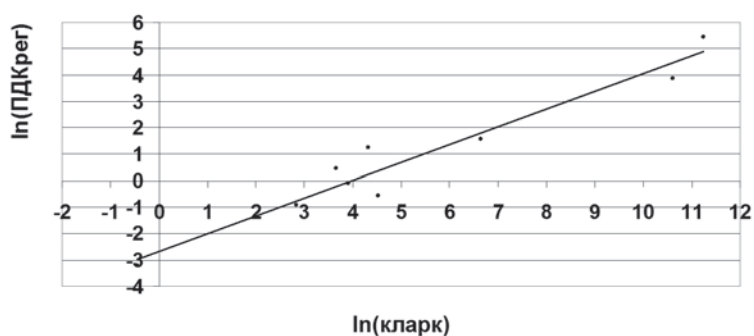


Рис. 3. Соотношение между натуральными логарифмами региональных предельно допустимых концентраций металлов в Онежском озере и кларками металлов в земной коре.

Fig. 3. Correlation between natural logarithms of regional maximum allowable concentrations of metals in the Lake Onega and clarks of metals in the Earth's crust.

Приведенные статистические характеристики позволяют оценить адекватность формулы (1) и ее пригодность для прогнозирования величин ПДК_{рег} для других металлов.

Согласно шкале Чеддока, соотношение между величинами ПДК_{рег} и кларками характеризуется «весьма высокой» теснотой связи между переменными ($r > 0,9$) [21]. Зависимость (1) адекватна ($F_p > F_T$) и полезна для предсказания величин ПДК_{рег} для других металлов ($F_p/F_T > 4$) [22].

Выводы

1. Для корректной оценки степени загрязненности водного объекта веществами двойного генезиса необходимо учитывать региональные природно-климатические особенности его водосбора. Наиболее существенный недостаток федеральной системы рыбохозяйственных предельно допустимых концентраций вредных веществ — отсутствие учета природно-климатических особенностей водосборов конкретных водных объектов (естественные геохимические аномалии с различным уровнем содержания природных соединений).

2. Различными авторами предложены методы расчётов региональных предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водных объектах (ПДК_{рег}). Для расчётов ПДК_{рег} металлов в Онежском озере использованы три наиболее популярных метода: метод С. А. Патина, метод Д. Г. Замолодчикова и метод Е. В. Веницианова и соавторов. Следуя принципу санитарного максимализма, установлено, что в качестве оптимального метода расчётов ПДК_{рег} следует рассматривать метод, разработанный Е. В. Венициановым и соавторами.

3. Обоснованы региональные предельно допустимые концентрации девяти металлов (железа, марганца, хрома, никеля, меди, цинка, кадмия, свинца и алюминия) в воде Онежского озера.

4. Теснота связи между натуральными логарифмами региональных предельно допустимых концентраций шести металлов в воде Онежского озера и натуральными логарифмами их кларков по шкале Чеддока характеризуется как «весьма высокая».

Список литературы

1. Тимофеева Л. А., Фрумин Г. Т. Проблемы нормирования качества поверхностных вод // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2015. № 38. С. 215—229.
2. Волков И. В., Заличева И. Н., Шустова Н. К., Ильмаст Т. Б. Есть ли экологический смысл у общенациональных рыбохозяйственных ПДК? // Экология. 1996. № 5. С. 350—354.
3. Дмитриев В. В., Фрумин Г. Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. Учебное пособие. СПб.: Наука. 2004. 295 с.
4. Левич А. П., Терехин А. Т. Метод расчета экологически допустимых уровней воздействия на пресноводные экосистемы // Водные ресурсы. 1997. № 3. С. 328—335.
5. Гагарина О. В. Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы. Учебно-методическое пособие. Ижевск: Удмуртский университет. 2012. 199 с.
6. Рисник Д. В., Беляев С. Д., Булгаков Н. Г. и др. Подходы к нормированию качества окружающей среды. Методы, альтернативные существующей системе нормирования в Российской Федерации // Успехи современной биологии. 2013. Т. 133. С. 3—18.
7. Строков А. А. Особенности нормирования качества воды при разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты // Вестник РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2014. № 3. С. 105—109.
8. Моисеенко Т. И. Оценка качества вод и «здоровье» экосистем с позиций экологической парадигмы // Водное хозяйство России. 2017. № 3. С. 104—124. doi: 10.35567/1999—4508—2017—3—7.
9. Фрумин Г. Т. Оценка состояния водных объектов и экологическое нормирование. СПб.: Синтез, 1998. 96 с.
10. Фрумин Г. Т. Экологически допустимые концентрации металлов в реках Санкт-Петербурга // Экологическая химия. 2015. № 24(2). С. 105—110.
11. Фрумин Г. Т., Негодина Е. С. Региональные предельно допустимые концентрации металлов в Псковском озере // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 66—72. doi: 10.17076/lim1760.
12. Румянцев В. А., Драбкова В. Г., Измайлова А. В. Озера европейской части России. СПб.: ЛЕМА. 2015. 392 с.
13. Lake Onega water chemical composition based on seasonal field surveys in 2019—2021 2022: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://data.mendeley.com/datasets/k4f59fyhmy> (дата обращения: 25.04.2024). doi: 10.1016/j.dib.2022.108079.
14. Санин А. Ю., Строков А. А., Терский П. Н. Оценка влияния природных процессов на содержание тяжелых металлов в воде Онежского озера // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2020. Т. 65. Вып. 1. С. 146—171. doi: 10.21638/spbu07.2020.108.
15. Санин А. Ю., Строков А. А., Кошовский Т. С. Распределение металлов в прибрежной зоне Онежского озера в зависимости от типа берега // География и природные ресурсы. 2022. №2. С. 34—43. doi: 10.15372/GIPR20220204.
16. Патин С. А. Влияние загрязнения на биологические ресурсы и продуктивность Мирового океана. М.: Пищевая промышленность. 1979. 304 с.
17. Замолотчиков Д. Г. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. Т. 15. С. 214—233.
18. Веницианов Е. В., Мирошниченко С. А., Лепихин А. П., Губернаторова Т. Н. Разработка и обоснование региональных показателей качества воды по содержанию тяжелых металлов для водных объектов бассейна Верхней Камы // Водное хозяйство России. 2015. № 3. С. 50—64.
19. Григорьев Н. А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: Уро РАН, 2009. 382 с.

20. Возняк А. А., Лепихин А. П. Разработка региональных ПДК: необходимость, методика, пример // Географический вестник. 2018. № 2(45). С. 103—114.
21. Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика. 2002. 368 с.
22. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика. 1986. 366 с.

References

1. Timofeeva L. A., Frumin G. T. Problems of standardization of surface water quality. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2015; (38): (215—229). (In Russ.).
2. Volkov I. V., Zalicheva I. N., Shustova N. K., Ilmast T. B. Does the federal fishery MPC make any ecological sense? *Ekologiya = Ecology*. 1996; (5):(350—354). (In Russ.).
3. Dmitriev V. V., Frumin G. T. *Ekologicheskoye normirovaniye i ustoychivost' prirodnykh system. Uchebnoye posobiye = Environmental regulation and sustainability of natural systems. Tutorial. SPb.: Science, 2004; 295 p.* (In Russ.).
4. Levich A. P., Terekhin A. T. A method for calculating environmentally acceptable levels of impact on freshwater ecosystems. *Vodnyye resursy = Water Resources*. 1997; (3):(328—335). (In Russ.).
5. Gagarina O. V. *Otsenka i normirovaniye kachestva prirodnykh vod: kriterii, metody, sushchestvuyushchiye problemy. Uchebno-metodicheskoye posobiye = Assessment and regulation of the quality of natural waters: criteria, methods, existing problems: Study guide*. Izhevsk: Udmurtskii universitet, 2012; 199 p. (In Russ.).
6. Risnik D. V., Belyaev S. D., Bulgakov N. G. et al. Approaches to standardization of environmental quality. Methods alternative to the existing system of regulation in the Russian Federation. *Uspekhi sovremennoy biologii = Successes of Modern Biology*. 2013; (133): (3—18). (In Russ.).
7. Stokov A. A. Features of water quality regulation in the development of standards for permissible impact on water bodies. *Vestnik RUDN. Ser. Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Bulletin of RUDN University. Ser. Ecology and Life Safety*. 2014; (3):(105—109). (In Russ.).
8. Moiseenko T. I. Assessment of water quality and the “health” of ecosystems from the standpoint of the ecological paradigm. *Vodnoye khozyaystvo Rossii = Water Management of Russia*. 2017; (3):(104—124). (In Russ.) doi: 10.35567/1999—4508—2017—3—7.
9. Frumin G. T. *Otsenka sostoyaniya vodnykh ob'yektov i ekologicheskoye normirovaniye = Assessment of the state of water bodies and environmental regulation*. St. Petersburg: Sintez, 1998; 96 p. (In Russ.).
10. Frumin G. T. Environmentally acceptable concentrations of metals in the rivers of St. Petersburg. *Ekologicheskaya khimiya = Ecological Chemistry*. 2015; (2):(105—110). (In Russ.).
11. Frumin G. T., Negodina E. S. Regional maximum permissible concentrations of metals in Pskov Lake. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2023; (6): (66—72). (In Russ.) doi: 10.17076/lim1760.
12. Rumyantsev V. A., Drabkova V. G., Izmailova A. V. *Ozera yevropeyskoy chasti Rossi = Lakes of the European part of Russia*. SPb.: LEMA, 2015; 392 p. (In Russ.).
13. Lake Onega water chemical composition based on seasonal field surveys in 2019—2021 2022: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://data.mendeley.com/datasets/k4f59fyhmy> (дата обращения: 25.04.2024). doi: 10.1016/j.dib.2022.108079.
14. Sanin A. Yu., Stokov A. A., Tersky P. N. Assessment of the influence of natural processes on the content of heavy metals in the water of Lake Onega. *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle = Bulletin of St. Petersburg State University. Geosciences*. 2020; (65):(146—171). (In Russ.) doi: 10.21638/spbu07.2020.108.
15. Sanin A. Yu., Stokov A. A., Koshovsky T. S. Distribution of metals in the coastal zone of Lake Onega depending on the type of shore. *Geografiya i prirodnyye resursy = Geography and natural resources*. 2022; (2):(34—43). (In Russ.) doi: 10.15372/GIPR20220204.
16. Patin S. A. *Vliyaniye zagryazneniya na biologicheskiye resursy i produktivnost' Mirovogo okeana = Impact of pollution on biological resources and productivity of the World Ocean*. Moscow: Food industry, 1979; 304 p. (In Russ.).
17. Zamolodchikov D. G. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem = Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993; Vol. 15. P. 214—233. (In Russ.)

18. Venitsianov E. V., Miroshnichenko S. A., Lepikhin A. P., Gubernatorova T. N. Development and substantiation of regional indicators of water quality in terms of the content of heavy metals for water bodies of the Upper Kama basin. *Vodnoye khozyaystvo Rossii = Water Management of Russia*. 2015; (3):(50—64). (In Russ.)
19. Grigoriev N. A. Raspredeleniye khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinental'noy kory = *Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust*. Ekaterinburg: Uro RAS, 2009; 382 p. (In Russ.)
20. Voznyak A. A., Lepikhin A. P. Development of regional MACs: necessity, methodology, example. *Geograficheskiy vestnik = Geographic Bulletin*. 2018;(2):(103—114). (In Russ.)
21. Makarova N. V., Trofimets V. Ya. *Statistika v Excel = Statistics in Excel*. Moscow: Finance and statistics, 2002; 368 p. (In Russ.)
22. Draper N., Smith G. *Prikladnoy regressionnyy analiz = Applied regression analysis*. Moscow: Finance and statistics, 1986; 366 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Григорий Тевелевич Фрумин, доктор химических наук, профессор, Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории факультета географии, gfrumin@mail.ru.

Евгения Сергеевна Негодина, Санкт-Петербургский филиал «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга), аспирант, 10020092@rambler.ru.

Information about authors

Grigory Tevelevich Frumin, Doctor of Chemical Sciences, professor, Herzen State Pedagogical University of Russia, leading researcher at the research laboratory of the Faculty of Geography, gfrumin@mail.ru.

Evgenia Sergeevna Negodina, St. Petersburg branch of “VNIRO” (“GosNIORH” named after L. S. Berg), graduate student, 10020092@rambler.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 22.12.2023

Принята к печати после доработки 29.04.2024

The article was received on 22.12.2023

The article was accepted after revision on 29.04.2024

ГИДРОЛОГИЯ. В ПОРЯДКЕ ДИСКУССИИ

Научная статья

УДК [556.555.8+556.555.4](282.247.212)

doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-328-344

Связаны ли параметры устойчивой плотностной стратификации с температурой поверхности Ладожского озера?

Михаил Арсеньевич Науменко, Вадим Викторович Гузиватый

Институт озероведения Российской академии наук (ИНОЗ РАН), Санкт-Петербургский
Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН),
г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: m.a.naumenko@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются разработанные авторами регрессионные зависимости для определения параметров вертикальной стратификации в центральной части Ладожского озера для периодов нагревания и охлаждения воды. Четыре критерия согласия подтвердили приемлемость этих зависимостей для исследования термических процессов в озере. Получено эмпирическое уравнение, связывающее температуру поверхности озера с глубинами границ слоя скачка. Установлены количественные соотношения между скоростями изменения температуры воды, заглубления границ слоя скачка и температурой поверхности воды. Впервые выявлен гистерезис параметров слоя скачка в период открытой воды в Ладожском озере и показана возможность оценки параметров вертикальной стратификации Ладожского озера дистанционными методами.

Ключевые слова: Ладожское озеро, температура поверхности воды, параметры слоя скачка, климатические соотношения, гистерезис.

Благодарности. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания СПб ФИЦ РАН (ИНОЗ РАН) FFZF-2024-0001 «Экосистемы Ладожского озера, водоемов его бассейна и прилегающих территорий в условиях воздействия природных и антропогенных факторов на фоне климатических изменений».

Для цитирования: Науменко М. А., Гузиватый В. В. Связаны ли параметры устойчивой плотностной стратификации с температурой поверхности Ладожского озера? // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 328—344. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-328-344.

Original article

Are the parameters of stable density stratification related to the surface temperature of Lake Ladoga?

Mikhail A. Naumenko, Vadim V. Guzivaty

Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences (IL RAS), St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg, 196105, Russia

Summary. Establishing the relationship between the surface temperature of a large lake and its vertical distribution is important both from the point of view of theoretical developments and will contribute to the assessment of in-water processes using remote sensing methods. Vertical temperature stratification in the largest European dimictic Lake Ladoga is formed after the passage of the spring frontal zone (thermobar), when the surface temperature begins to exceed the maximum density temperature by 4 °C. The physically based regression dependences, previously developed by the authors to determine the parameters of vertical stratification for the central part of Lake Ladoga, were verified using independent data for the heating and cooling period. Four criteria of agreement confirmed the acceptability of these dependencies for the study of thermal processes in the lake. An empirical equation relating lake surface temperature to the depths of the thermocline layer boundaries was derived. Quantitative relations between the rates of change of water temperature, depth of the thermocline layer boundaries and water surface temperature have been established. They indicate that the deepening of the surface mixed layer (epilimnion) and the thermocline layer from the moment of its occurrence until it reaches the bottom does not proceed linearly with time, accelerating in late autumn. Empirical dependencies can be the basis for verifying one-dimensional models of the seasonal evolution of vertical water temperature profiles in lakes.

The hysteresis of the thermocline layer parameters during the period of open water in Lake Ladoga was revealed for the first time and the possibility of estimating the parameters of vertical stratification of Lake Ladoga using remote sensing methods was shown.

Keywords: surface water temperature, parameters of the thermocline layer, climatic relationships, hysteresis, dimictic lake, Lake Ladoga.

Acknowledgments. Financial support of the research was mainly provided by the federal budget funds for the state task FFZF-2024-0001 “Ecosystems of Lake Ladoga, water bodies of its basin and adjacent territories under the influence of natural and anthropogenic factors against the background of climatic changes”.

For citation: Naumenko M. A., Guzivaty V. V. Are the parameters of stable density stratification related to the surface temperature of Lake Ladoga? *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(75):328—344 (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-328-344.

Введение

Озёра являются репрезентативными индикаторами изменения климата, которые выражаются в вариациях термических и динамических условий, влияющих на биотические процессы [1]. В современный климатический период, начиная с девяностых годов прошлого века, обнаруживаются разномасштабные быстрые и нерегулярные вариации температуры поверхности воды и водной толщи крупных озёр мира, в том числе межгодовые [2]. Чрезвычайно важно фиксировать и оценивать термические изменения относительно их средноклиматического хода, что позволит использовать данные в диагнозе экологической ситуации в озере.

Известно, что температурные вариации влияют на процессы эвтрофирования, усвоение биогенных элементов, развитие микроводорослей и т. п. Установление взаимосвязи между температурой поверхности крупного озера и её вертикальным распределением имеет большое значение, как с точки зрения теоретических разработок, так и будет способствовать оценкам внутриводных процессов с использованием дистанционных методов.

Настоящая статья является продолжением статьи [3], в которой на основе методических разработок и анализа большого объёма данных с 1897 г. по 2017 г. нами был определен среднеклиматический сезонный ход восьми основных параметров, характеризующих вертикальное распределение температуры в период стратификации в центральной части Ладожского озера, а именно:

- 1) температуры верхнего квазиоднородного слоя ВКС (эпилимниона) T_w ;
- 2) толщины верхнего квазиоднородного слоя h_w (верхней границы слоя скачка);
- 3) максимального градиента плотности в слое скачка G_{\max} ;
- 4) глубины максимального значения градиента плотности в слое скачка $h_{G_{\max}}$;
- 5) температуры на глубине максимума градиента плотности в слое скачка $T_{G_{\max}}$;
- 6) глубины нижней границы слоя скачка (металимниона) h_l ;
- 7) температуры на нижней границе слоя скачка T_{hl} ;
- 8) температуры у дна T_b .

Эти параметры будут использованы ниже.

Среднеклиматический сезонный ход параметров устойчивой вертикальной стратификации закономерно изменяется с начала весенней стратификации до полного осеннего перемешивания в центре крупнейшего европейского озера — Ладожского [4].

В настоящее время существует несколько одномерных моделей, используемых в качестве исследовательского инструментария для оценки сезонной эволюции вертикальных профилей температуры воды в озерах в зависимости от атмосферного форсинга [5—9]. Сложность моделирования среднеклиматической изменчивости вертикальной термической структуры озера и ее влияния на динамику экосистем требует соответствующих упрощений, поэтому был использован анализ более 1000 вертикальных профилей температуры воды и статистический подход конструирования для временной аппроксимации основного сезонного цикла выбранных параметров стратификации центральной части Ладожского озера с глубинами от 50 м до 70 м.

Физически обоснованные эмпирические временные зависимости были разработаны для нескольких указанных параметров с высокими коэффициентами детерминации (более 0,85). Для среднеклиматического сезонного хода температуры поверхности озера T (верхнего квазиоднородного слоя T_w) и температуры на глубине максимума градиента плотности в слое скачка $T_{G_{\max}}$ было использовано следующее уравнение:

$$T(t) = a_1 \times t^d \times e^{ct}, \quad (1)$$

где $t = x/100$, x — количество суток от начала года (рис. 1 а). Разность температуры между верхней T и нижней границей ВКС не превышала 0,5 °С [3].

Для среднеклиматической временной зависимости изменения глубины границ слоя скачка в период весенне-летней стратификации использовалась показательная функция:

$$h(t) = a_2^{t+r}. \quad (2)$$

Глубину каждой из трех границ слоя скачка: верхней границы слоя скачка h_w , максимального градиента плотности воды $h_{G_{\max}}$ и нижней границы слоя скачка h_l , с конца июня до начала ноября можно определить на основе (2) (рис. 1 б). Эволюция климатического режима термической структуры водной толщи озера в период устойчивой стратификации указывает на нелинейную зависимость заглубления ВКС и слоя скачка от момента его возникновения до достижения дна и является основой для верификации одномерных моделей сезонной эволюции вертикальных профилей температуры воды в озерах.

Целью настоящей статьи заключается в нахождении (установлении) климатических зависимостей между температурой поверхности воды Ладожского озера и параметрами устойчивой весенне-летней стратификации для двух потенциально отличных режимов: нагревания и охлаждения озера.

Верификация эмпирических зависимостей

Количество, разнообразие и сложность математических и вычислительных моделей климатических, гидрологических и экологических систем за последние несколько десятилетий увеличилось. Одновременно возрастает интерес к сравнению и объективной оценке моделей для определения, какие модели являются более точными, т. е. наиболее соответствующими проведенным надежным измерениям [10]. Верификация любых моделей природных процессов, тем более эмпирических, необходима как для возможного прогнозирования, так и для количественной оценки неизвестных параметров на основе известных предикторов, а также для совершенствования климатических моделей. Обычно модель верифицируется с использованием статистических подходов для сравнения модельных оценок с независимыми наблюдаемыми значениями.

На рис. 1 приведены климатические кривые сезонного хода температуры поверхности и температуры слоя скачка, а также трех глубин слоя скачка для периодов нагревания и охлаждения, рассчитанные по формулам (1) и (2).

Климатические кривые достаточно хорошо соответствуют максимальным значениям температуры поверхности (отличаясь не более 1 °С) и датам её возникновения, приведенным в атласе Ладожского озера [11].

Важный параметр — среднеклиматическая продолжительность устойчивой стратификации в центральной части Ладожского озера с очевидностью определяется по рис. 1 а. Это временной интервал между крайними вертикальными штриховыми прямыми, указывающими на весеннюю и осеннюю вертикальную изотермию. Он составляет 142 суток и может служить климатической нормой (репером) при анализе возможных межгодовых колебаний.

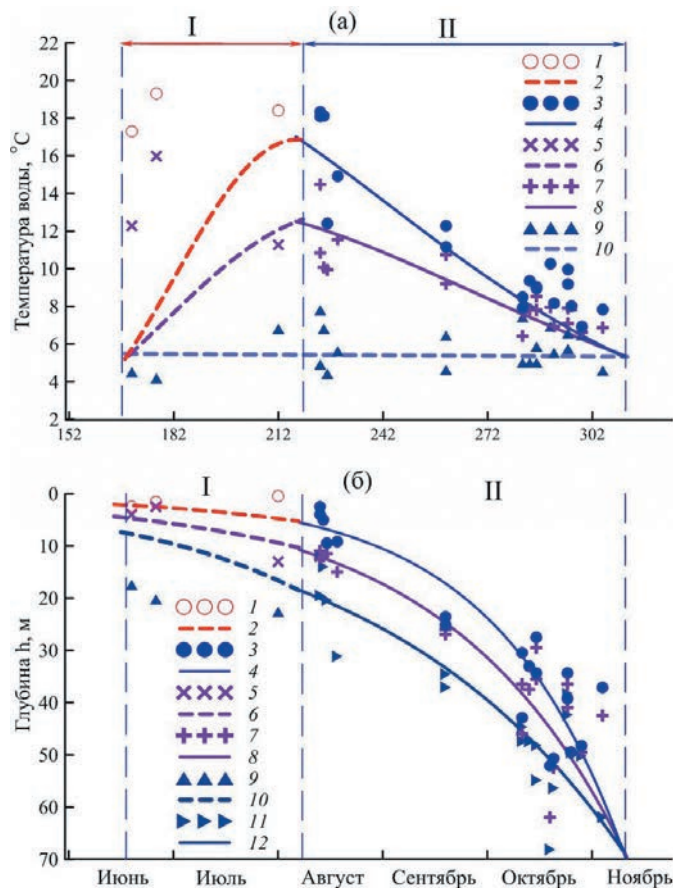


Рис. 1. Климатические зависимости сезонного хода параметров устойчивой стратификации с точками независимых наблюдений для периодов нагревания и охлаждения (I, II) в центральной части Ладожского озера:

a) температура поверхности T_w (2, 4) и независимые наблюдения (1, 3); температура в слое скачка $T_{G_{max}}$ (6, 8) и независимые наблюдения (5, 7); температура на нижней границе T_{hl} (10) и независимые наблюдения (9); *б)* глубина верхнего квазиоднородного слоя h_w (2, 4) и независимые наблюдения (1, 3); глубина максимального градиента плотности воды G_{max} (6, 8) и независимые наблюдения (5, 7); глубина нижней границы слоя скачка h_l (10, 12) и независимые наблюдения (9, 11).

Fig. 1. Climatic dependences of the seasonal courses of stable stratification parameters with points of independent observations for heating and cooling periods (I, II) in the central part of Lake Ladoga:

a) surface temperature T_w (2, 4) and independent observations (1, 3); temperature in the depth of the maximum water density gradient $T_{G_{max}}$ (6, 8) and independent observations (5, 7); temperature at the lower boundary of the thermocline layer T_{hl} (10) and independent observations (9); *b)* depth of the upper quasi-homogeneous layer h_w (2, 4) and independent observations (1, 3); depth of the maximum water density gradient G_{max} (6, 8) and independent observations (5, 7); depth of the lower boundary of the thermocline layer h_l (10, 12) and independent observations (9, 11).

Разработанные ранее физически обоснованные регрессионные зависимости с известными эмпирическими коэффициентами для центральной части Ладожского озера [3] были в настоящей статье верифицированы с использованием независимых данных для периода наблюдений с 2018 г. по 2022 гг. (рис. 1). Для этого были использованы четыре безразмерные критерия, характеризующие степень связи между измеренными параметрами $X_{изм}$ и модельными величинами $X_{мод}$. Результаты приведены в таблице.

Индекс согласия Уиллмотта WS [10] указывает на абсолютное соответствие модели измерениям при $WS = 1$, при $WS = 0$ нет никакого соответствия между измеренными и модельными величинами, однако индекс чувствителен к экстремальным значениям.

$$WS = 1 - \frac{\sum (X_{мод} - X_{изм})^2}{\sum (|X_{мод} - \bar{X}_{изм}| + |X_{мод} - \bar{X}_{изм}|)^2}. \quad (3)$$

Усовершенствованный индекс Уиллмотта d_r [12], по мнению авторов, в целом более рационально связан с точностью модели и ограничен значениями $-1,0$ и $1,0$.

$$d_r = 1 - \frac{\sum |X_{мод} - X_{изм}|}{c \sum |X_{изм} - \bar{X}_{изм}|}. \quad (4)$$

Третий критерий, использованный при верификации трехмерной модели течений озера Мичиган [13] и озера Онтарио [14], указывает на лучшее соответствие модельных значений измеренным при меньших величинах F_n .

$$Fn = \left(\frac{\sum |X_{мод} - X_{изм}|^2}{\sum |X_{изм}|^2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Четвертый критерий k_d — это коэффициент детерминации, который представляет процент объясненной дисперсии между исследуемыми параметрами, при $k_d = 1$ связь идеальная.

Всего было верифицировано двенадцать эмпирических зависимостей для глубины и температуры трех границ слоя скачка для периодов нагревания и охлаждения поверхности Ладожского озера (табл. 1). Очевидно, что для периода нагревания каждый из четырех критериев указывает на меньшее соответствие между модельными величинами и измерениями, что объясняется непредсказуемостью динамического воздействия атмосферы, приводящей к вынужденной конвекции при создании эмпирических климатических зависимостей. В период охлаждения, как уже подчеркивалось выше, конвективное перемешивание за счёт архимедовых сил постоянно воздействует на вертикальное распределение температуры, происходит заглупление ВКС, что в климатическом аспекте приводит к лучшему

соответствию между измеренными и модельными величинами [15]. Обращает внимание, что результаты расчета по формулам 3 и 5 (табл. 1) указывают на удовлетворительное соответствие постоянства температуры воды ($5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) как в период нагревания, так и в период охлаждения на нижней границе слоя скачка, хотя k_d — практически 0. В результате блокирующей роли слоя скачка, затрудняющего обмен теплом с нижележащими слоями, температура воды на нижней границе слоя скачка практически не реагирует на изменения поверхностной температуры.

Таблица 1

Индексы согласия и коэффициенты детерминации между аналитическими зависимостями $X_{\text{мод}}$ и независимыми измерениями $X_{\text{изм}}$
Indices of agreement and coefficients of determination between analytical dependencies $X_{\text{мод}}$ and independent measurements of $X_{\text{изм}}$

Граница	Параметр	*	Формула (3)	Формула (4)	Формула (5)	Коэф. детерминации
верхнего квазиоднородного слоя	Глубина	н	0,46	0,61	0,60	0,44
		о	0,99	0,78	0,24	0,77
	Температура	н	0,27	-1,72	0,35	0,15
		о	0,69	0,47	0,29	0,85
максимального градиента плотности	Глубина	н	0,74	0,68	0,37	0,73
		о	0,93	0,78	0,21	0,77
	Температура	н	0,40	-0,45	0,38	0,13
		о	0,92	0,70	0,13	0,74
нижней границы слоя скачка	Глубина	н	0,50	0,03	0,62	0,47
		о	0,93	0,78	0,17	0,76
	Температура	н	0,42	0,18	0,20	—
		о	0,37	0,49	0,19	—

*н — период нагревания, о — период охлаждения.

Таким образом, верификация регрессионных зависимостей подтверждает правомерность их использования для оценки параметров стратификации в центральной части Ладожского озера.

Зависимости между температурой поверхности и глубинами трех границ слоя скачка для периода стратификации

Вертикальная температурная стратификация в Ладожском озере формируется после прохождения весенней фронтальной зоны (термобара), когда температура поверхности начинает превышать температуру наибольшей плотности $3,98\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4, 16]. Сроки наступления стратификации в различных районах озера являются важным индикатором климатических изменений [17, 18]. Критериями для выбора начальных вертикальных профилей для анализа параметров слоя скачка может быть температура поверхности более $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и минимальное значение вертикального градиента плотности воды $0,05\text{ кг/м}^4$ [19]. В центре Ладожского озера с глубинами, изменяющимися от 50 до 70 м для средноклиматических условий, стратификация

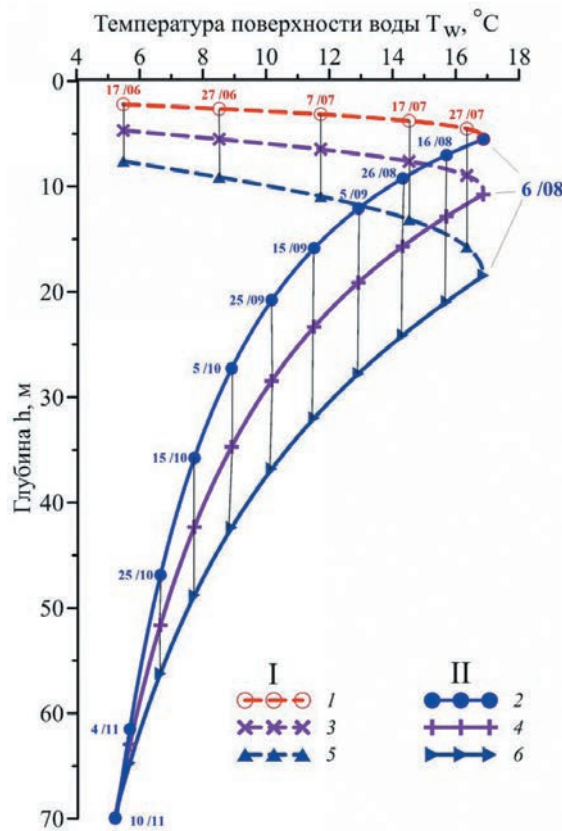


Рис. 2. Климатические зависимости трех границ слоя скачка в центральной части Ладожского озера от температуры поверхности воды T_w для периода нагревания и охлаждения (I, II): глубины верхней границы слоя скачка h_w (толщины верхнего квазиоднородного слоя (1, 2); максимального градиента плотности воды G_{max} (3, 4) и нижней границы слоя скачка h_l (5, 6). Тонкие вертикальные прямые показывают соответствие дат.

Fig. 2. Climatic dependences of the three boundaries of the thermocline layer in the central part of Lake Ladoga on water surface temperature T_w for the heating and cooling periods (I, II): the depth of the upper boundary of the thermocline layer h_w (thickness of the upper quasi-uniform layer (1, 2); the maximum water density gradient G_{max} (3, 4) and the lower boundary of the thermocline layer h_l (5, 6). The thin vertical straight lines show the correspondence of the dates.

возникает с 15 июня (170-ые сутки с начала года), а переход от нагревания поверхности озера к охлаждению — 6 августа (рис. 1 и рис. 2).

Для установления связей между хорошо определяемым единственным входным параметром: температурой поверхности T_w (ВКС) озера и глубинами трех искомых границ слоя скачка решим систему уравнений из двух эмпирических

зависимостей (1) и (2). В результате получено трансцендентное уравнение для каждой границы слоя с известными регрессионными коэффициентами a_1 , d , c , a_2 , r .

$$h = a_2 \left(r + \frac{d}{c} \times \mathbf{W} \left(\frac{c}{d} \times \left(\frac{T_w}{a_1} \right)^{\frac{1}{d}} \right) \right) \quad (6)$$

В полученное уравнение входит многозначная функция Ламберта \mathbf{W} [20]. При расчетах при среднеклиматических условиях для периода нагревания (верхние ветви рис. 2) следует использовать \mathbf{W}_0 до 6 августа, для периода охлаждения (нижние ветви рис. 2) после 6 августа — \mathbf{W}_{-1} . Решение данного уравнения может быть получено в системе статистических вычислений R [21]. Полученные эмпирические результаты полностью соответствуют теоретическим представлениям одномерной модели сезонного термоклина Крауса—Тернера [9].

С момента начала устойчивой стратификации в период нагревания глубина границ слоя скачка изменяется незначительно, не более чем на 10 метров за полтора месяца (рис. 2).

С начала периода охлаждения поверхности озера тепло из верхних слоев начинает постоянно поступать в глубинные слои посредством свободной конвекции. Три границы слоя скачка, указанные выше, в том числе глубина максимального градиента плотности слоя скачка, продолжают погружаться и за три месяца достигают дна. Пересечение кривых (трех границ слоя скачка) при осеннем перемешивании в одной точке при температуре поверхности (5,5 °C) указывает на возникновение изотермии по вертикали, когда конвекция достигает дна и, следовательно, эпилимнион занимает все пространство от поверхности до дна. В этот период (первой декаде ноября) температура эпилимниона становится равной температуре придонной воды, достигшей своего максимума.

Зависимость (6), приведенная на рисунке 2, позволяет оценить климатические параметры глубины трех границ слоя скачка в зависимости от температуры поверхности Ладожского озера, что расширяет использование дистанционных ИК-измерений для анализа термического состояния Ладожского озера.

Температура поверхности, скорости изменения температуры воды и скорости погружения границ слоя скачка

Годовой цикл температурных изменений в озере тесно связан с сезонными колебаниями теплообмена «атмосфера—поверхность воды» и динамическими процессами в водной толще [22]. Процессы турбулентного обмена теплом в период стратификации во время нагревания и охлаждения поверхности протекают различно [23]. В период нагревания большая часть тепла, поступающая на поверхность озера, перераспределяется в верхнем квазиоднородном слое и приводит к повышению его температуры. В августе, после того, как температура поверхности воды достигает максимума, начинается регулярное понижение температуры

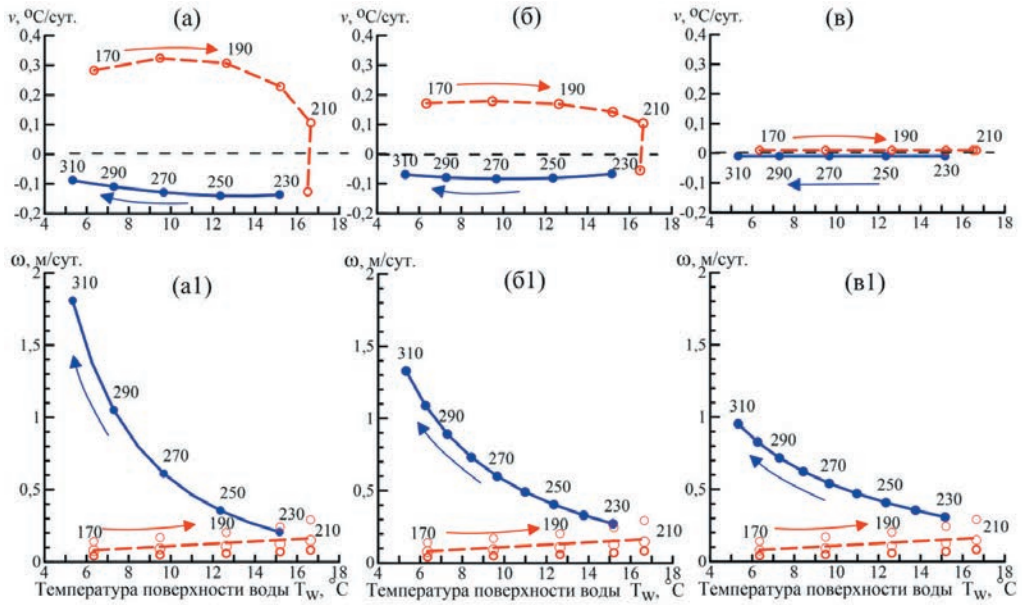


Рис. 3. Скорости изменения параметров стратификации для центральной части Ладожского озера в зависимости от температуры поверхности воды T_w для периода нагревания (красная линия) и охлаждения (синяя линия): температуры (а) и глубины ВКС (а1); температуры (б) и глубины (б1) максимального градиента температуры (плотности); температуры (в) и глубины (в1) нижней границы слоя скачка. Цифры у точек — сутки от начала года.

Fig. 3. Rates of change of stratification parameters for the central part of Lake Ladoga as a function of water surface temperature T_w for the heating (red line) and cooling (blue line) periods: temperature (a) and depth of the upper quasi-uniform layer (а1); temperature (б) and depth (б1) of the maximum temperature (density) gradient; temperature (в) and depth (в1) of the lower boundary of the thermocline layer.

Numbers at the points are days from the beginning of the year.

поверхности, определяющее возникновение и развитие свободного конвективно-го перемешивания. Вместе с вынужденной конвекцией это приводит к увеличению толщины квазиоднородного слоя и заглублению слоя скачка.

Дифференцируя выражения (1) и (2), можно получить количественные оценки скоростей изменения температуры воды v ($^{\circ}$ /сутки) и скорости погружения ω (м/сутки) трех границ слоя скачка в зависимости от температуры поверхности воды для среднеклиматических условий.

Наибольшие скорости увеличения температуры поверхности воды наблюдаются на поверхности Ладожского озера в период нагревания, переход к остыванию поверхности и свободной конвекции происходит в первую — вторую декаду августа. Очевидно, согласно рис. 3, что скорости уменьшения температуры

поверхности в период охлаждения примерно в три раза меньше, чем скорость увеличения при нагревании. Наибольшая температура на глубине максимального градиента плотности на 30 % меньше, чем на поверхности.

Как уже было отмечено, скорость погружения трех слоев в период нагревания примерно одинакова (около 0,1—0,2 м/сутки) без значительного заглубления верхней границы слоя скачка, тогда как в период охлаждения эти скорости резко увеличиваются и для верхней границы слоя скачка они наибольшие до 1,5—1,8 м/сутки в первой декаде ноября, когда свободная конвекция достигает дна.

Средняя граница слоя скачка (глубина максимального градиента плотности воды) погружается в период охлаждения поверхности с меньшими скоростями, но аналитическая форма выражения для скорости погружения, соответствующая показательной функции одна и та же для трех границ слоя скачка. Как видно на рис. 3 *в1*, наименьшие скорости погружения относятся к нижней границе слоя скачка, температура которой остается неизменной во времени (рис. 3 *в*).

Подводя итог этому разделу, можно подчеркнуть, что количественные оценки временных изменений температуры и глубин параметров слоя скачка могут быть получены на основе температуры поверхности озера в период стратификации для нагревания и охлаждения.

Особенности изменчивости параметров слоя скачка в течение периода устойчивой стратификации

В статьях [24, 25] показано, что в озерах с ярко выраженным сезонным ходом температуры воды существует явление гистерезиса. Возвращение величины лимнического параметра, находящегося в начале периода нагревания, к той же самой величине в период охлаждения не происходит в обратной последовательности по одной и той же временной траектории. На рис. 4 приведен временной ход трех параметров слоя скачка в зависимости от температуры поверхности Ладожского озера. Вертикальная штриховая прямая на совмещенных графиках показывает пример различий между параметрами слоя скачка при одной и той же температуре (10,7 °С) для периода нагревания и охлаждения. Стрелки указывают направления изменений при нагревании и охлаждении.

Средние максимальные вертикальные градиенты температуры воды в термоклине G_{\max} (осредненные за декаду для устранения случайных колебаний) изменяются нелинейно от минимального (нулевого значения) в момент возникновения стратификации до максимальной величины в период нагревания, причем максимальное значение градиента достигается до возникновения максимума температуры поверхности воды. В период охлаждения градиенты изменяются линейно до наступления изотермии в первой декаде ноября. Вертикальный градиент температуры (плотности) меняется в зависимости от периода нагревания (охлаждения) поверхности и, следовательно, меняется степень вертикального турбулентного обмена.

Температура поверхности максимального градиента температуры (плотности) в термоклине $T_{G_{\max}}$ при нагревании (рис. 4 *б*) ниже, чем при охлаждении

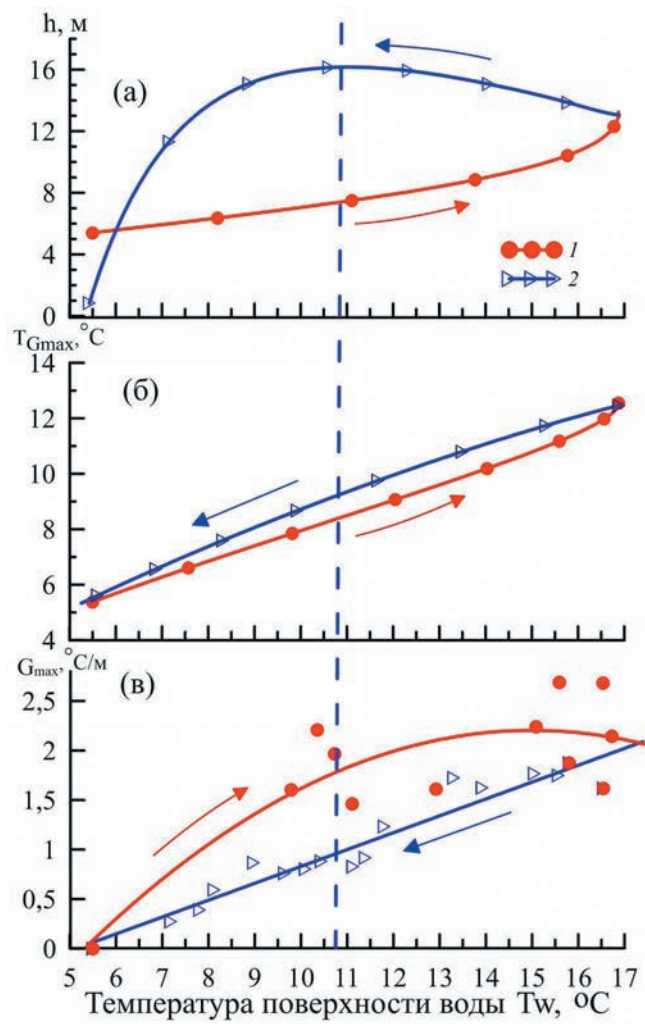


Рис. 4. Изменение параметров слоя скачка в период устойчивой стратификации для периода нагрева (красная линия и символы) и охлаждения (синяя линия и символы) в зависимости от температуры поверхности воды T_w :

a) толщина слоя скачка h ; *б)* температура поверхности максимального градиента температуры (плотности) $T_{G_{max}}$; *в)* максимальный вертикальный градиент температуры воды в термоклине G_{max} .

Fig. 4. Variation of thermocline layer parameters during the period of stable stratification for the heating (red line and symbols) and cooling (blue line and symbols) periods as a function of water surface temperature T_w :

a) thickness of the thermocline h ; *б)* surface temperature of the maximum temperature (density) gradient $T_{G_{max}}$; *в)* maximum vertical gradient of water temperature in the thermocline G_{max} .

при одной и той же температуре поверхности воды озера. Максимум температуры в термоклине наступает практически одновременно при достижении максимума температуры ВКС, однако разность между ними составляет более 4,5 °С. В период охлаждения поверхности озера в результате воздействия свободной конвекции, переносящей тепло с поверхности вглубь, возникает гистерезисный характер изменения температуры термоклина. Температура термоклина выше, чем в период нагревания при одной и той же температуре поверхности озера.

Толщина слоя скачка $h = h_l - h_w$ непостоянна в сезонном цикле. На рис. 4 в очевиден гистерезисный характер изменения толщины слоя скачка. В период нагревания, начиная с нескольких метров, толщина достигает 12 м при максимальной температуре поверхности озера и продолжает увеличиваться в период охлаждения до 16 м при температуре поверхности воды около 10,7 °С. Далее толщина уменьшается до 0 м в период осенней изотермии при той же температуре поверхности, что и в начале периода нагревания. Учёт конечной толщины слоя скачка, несомненно, позволит уточнить количественные характеристики обмена количеством движения и тепла между эпи — и гипolimнионом.

Итак, три рассмотренные параметра слоя скачка в центральной части Ладожского озера могут быть оценены на основе дистанционного определения температуры поверхности воды с явным явлением гистерезиса (рис. 4).

Заключение

Эволюция термической структуры водной толщи центральной части Ладожского озера от начала возникновения устойчивой плотностной стратификации в середине июня до возникновения осенней гомотермии в первой декаде ноября охарактеризована различными параметрами вертикального распределения температуры: температурой и вертикальными градиентами температуры слоя скачка, его толщиной, скоростями изменения температуры воды и скорости погружения границ слоя скачка [26]. Такой подход послужил основой для разработки физически обоснованных эмпирических формул для оценки среднеклиматической взаимосвязи температуры поверхности воды озера с параметрами стратификации, в том числе с учетом гистерезисного характера изменений параметров. На независимых наблюдениях эти зависимости верифицированы, что подтвердило их приемлемость и перспективность в использовании дистанционной информации для изучения внутриозерных процессов и для верификации термогидродинамических моделей Ладожского озера.

Для практических оценок климатических параметров вертикальной структуры водной толщи в Ладожском озере целесообразно использовать установленные эмпирические зависимости, соответствующие физическим закономерностям для периода нагревания и охлаждения. Получены новые характеристики термоклина в Ладожском озере, которые ранее не оценивались и не воспроизводились с использованием одномерных моделей стратификации.

Систематические в период открытой воды отклонения от разработанных зависимостей будут указывать на возможные климатические вариации [27].

Действительно, изменения глубины и величины вертикальных градиентов в термоклине, а также сроки его возникновения и диссипации будут не только индцировать внутригодовые изменения, но и оказывать влияние на экологические процессы в озере [28].

Список литературы

1. Adrian R., O'Reilly C. M., Zagarese H. et al. Lakes as sentinels of climate change // *Limnol. Oceanogr.* 2009. V. 54 (6). P. 2283—2297. doi: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283.
2. O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D. K. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // *Geophysical Research Letters*. 2015. V. 42 (24). P. 10773—10781. doi: org/10.1002/2015GL066235.
3. Naumenko M. A., Guzivaty, V. V. Methodological Approaches and Results of an Analysis of the Climatic Seasonal Course of Stable Stratification Parameters of a Dimictic Lake (Case Study of the Central Part of Lake Ladoga) // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022. V. 58 (1). P. 44—53. doi: 10.1134/S0001433822010108.
4. Тихомиров А. И. Термика крупных озер. Л.: Наука 1982. 232 с.
5. Sundaram T. R., Rehm R. G. The seasonal thermal structure of deep temperate lakes // *Tellus*. 1973. V. 25 (2). P.157—167. doi: 10.1111/j.2153-3490.1973.tb01602.x.
6. McCormik M. J., Scavia D. Calculation of Vertical Profiles of Lake-Averaged Temperature and Diffusivity in Lakes Ontario and Washington // *Water Resources Research*. 1981. V. 17 (2). P. 305—310. doi:10.1029/WR017i002p00305.
7. Fang X., Stefan H. G. Long-term lake water temperature and ice cover simulations/measurements // *Cold Reg Sci Tech*. 1996. V. 24 (3). P. 289—304. doi: org/10.1016/0165-232X(95)00019-8.
8. Kirillin G., Hochschild J., Mironov D. et al. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage // *Environmental Modelling Software*. 2011. V. 26 (5). P. 683—684. doi: org/10.1016/j.envsoft.2010.12.004.
9. Kraus E. B., Turner J. S. A one-dimensional model of the seasonal thermocline. II. The general theory and its consequences // *Tellus*. 1967. V. 1. P.98—106.
10. Willmott C. J. On the validation of models // *Phys. Geogr.* 1981. V. 2. P. 184—194.
11. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Под. ред. В. А. Румянцева. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.
12. Willmott C. J., Robeson S. M., Matsuura K. A refined index of model performance // *Int. J. Climatol.* 2012. V. 32. P. 2088—2094. doi: org/10.1002/joc.2419.
13. Beletsky D., Schwab D. Modeling circulation and thermal structure in Lake Michigan: Annual cycle and interannual variability // *J. Geoph. Res.* 2001. V. 106. № C 9. P. 19745—19771. doi: 10.1029/2000JC000691.
14. Huang A., Rao Y. R., Lu Y., Zhao J. Hydrodynamic modeling of Lake Ontario: An intercomparison of three models // *J. Geoph. Res.* 2010. V. 115. C12076. doi:10.1029/2010JC006269.
15. Bouffard D., Wuest A. Convection in Lakes // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2019. 51(1). P. 189—215. doi: org/10.1146/annurev-fluid-010518-040506.
16. Науменко М. А. Особенности климатических соотношений температуры поверхности воды и приводного слоя воздуха в период весеннего прогрева Ладожского озера // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14. № 2. С.78—88. doi: 10.7868/S2073667321020076.
17. Kraemer B. M., Anneville O., Chandra S. et al. Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change // *J. Geoph. Res. Let.* 2015. № 42. P. 4981—4988.
18. Piccolroaz S. M., Toffolon M., Majone B. The role of stratification on lakes' thermal response: The case of Lake Superior // *Water Resour. Res.* 2015. V 51. № 10. P. 7878—7894.
19. Молчанов И. В. Ладожское озеро. М.—Л.: Гидрометеониздат, 1945. 558 с.
20. Дубинов А. Е., Дубинова И. Д., Сайков С. К. W-функция Ламберта и ее применение в математических задачах физики. Учебное пособие для вузов. Саров: Российский федеральный ядерный центр. 2006. 160 с.

21. The R Project for Statistical Computing. Available at: <https://www.r-project.org/> (дата обращения: 03.05.2024).
22. Imberger J., Patterson J. C. Physical limnology. *Adv. Appl. Mech.* 27. 1990. 303—475.
23. Winslow L. A., Read J. S., Hansen G. J. et al. Seasonality of change: Summer warming rates do not fully represent effects of climate change on lake temperatures // *Limnol. Oceanogr.* 2017. V. 62. P. 2168—2178. doi: 10.1002/lno.10557.
24. Форш-Меншуткина Т. Б. Кислородный гистерезис в олиготрофных озерах. Вопросы современной лимнологии / Под. ред. С. В. Калесника. Л.: Наука. 1973. С. 94—101.
25. Naumenko M. A., Guzivaty V. V. Climate Relationships between Air Temperature and Water Temperatures in the Different Limnetic Zones of Lake Ladoga // *Geography and Natural Resources.* 2022. V. 43 (1). P. 69—76. doi: 10.1134/S1875372822010097.
26. Naumenko M. A., Guzivaty V. V. Seasonal evolution of stable thermal stratification in central area of Lake Ladoga. *Limnological Review.* 2023. 23 (3). P. 177—189.
27. Woolway R. I., Sharma S., Weyhenmeyer G. A. et al. Phenological shifts in lake stratification under climate change // *Nat Commun.* 2021. V. 12. P. 2318. doi: org/10.1038/s41467-021-22657-4.
28. Edlund M. B., Almendinger J. E., Fang X. et al. Effects of Climate Change on Lake Thermal Structure and Biotic Response in Northern Wilderness Lakes // *Water.* 2017. V. 9. P. 678. doi: org/10.3390/w9090678.

References

1. Adrian R., O'Reilly C. M., Zagarese H. et al. Lakes as sentinels of climate change. *Limnol. Oceanogr.* 2009; 54(6): 2283—2297. doi: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283.
2. O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D.K. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters.* 2015; 42(24): 10773—10781. doi: org/10.1002/2015GL066235.
3. Naumenko M. A., Guzivaty, V. V. Methodological Approaches and Results of an Analysis of the Climatic Seasonal Course of Stable Stratification Parameters of a Dimictic Lake (Case Study of the Central Part of Lake Ladoga). *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2022; 58(1): 44—53. doi: 10.1134/S0001433822010108.
4. Tikhomirov A. I. Termika krupnikh ozer = *Thermal state of large lakes*. Leningrad: Nauka, 1982: 232 p. (In Russ.).
5. Sundaram T. R., Rehm R. G. The seasonal thermal structure of deep temperate lakes. *Tellus.* 1973; 25(2): 157—167. doi: 10.1111/j.2153-3490.1973.tb01602.x.
6. McCormik M. J., Scavia D. Calculation of Vertical Profiles of Lake—Averaged Temperature and Diffusivity in Lakes Ontario and Washington. *Water Resources Research.* 1981; 17(2): 305—310. 10.1029/WR017i002p00305.
7. Fang X., Stefan H. G. Long-term lake water temperature and ice cover simulations/measurements. *Cold Reg. Sci. Tech.* 1996; 24(3): 289—304. doi: org/10.1016/0165-232X(95)00019-8.
8. Kirillin G., Hochschild J., Mironov D. et al. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage. *Environmental Modelling & Software.* 2011; 26(5): 683—684. doi: org/10.1016/j.envsoft.2010.12.004.
9. Kraus E. B., Turner J. S. A one-dimensional model of the seasonal thermocline. II. The general theory and its consequences. *Tellus.* 1967; 1: P. 98—106.
10. Willmott C. J. On the validation of models. *Phys. Geogr.* 1981; 2: 184—194.
11. *Ladozhskoye ozero i dostoprimechatel'nosti yego poberezh'ya. Atlas.* = *Lake Ladoga and the sights of its coast. Atlas.* Ed. Rumyantsev V.A. St.Petersburg: Nestor-History, 2015; 200 p. (In Russ.).
12. Willmott C. J., Robeson S.M., Matsuura K. A refined index of model performance. *Int. J. Climatol.* 2012; 32: 2088—2094. doi: org/10.1002/joc.2419.
13. Beletsky D., Schwab D. Modeling circulation and thermal structure in Lake Michigan: Annual cycle and interannual variability. *J. Geoph. Res.* 2001; 106(C9): 19745—19771. doi: 10.1029/2000JC000691.
14. Huang A., Rao Y. R., Lu Y., Zhao J. Hydrodynamic modeling of Lake Ontario: An intercomparison of three models. *J. Geoph. Res.* 2010; 115: C12076. doi: 10.1029/2010JC006269.

15. Bouffard D., Wuest A. Convection in Lakes. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2019; 51: 189—215. doi: org/10.1146/annurev-fluid-010518-040506.
16. Naumenko M. A. Features of climatic relationships between surface water-air temperature during vernal heating period in Lake Ladoga. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika = Fundamental and applied hydrophysics.* 2021; 14(2): (78—88). doi: 10.7868/S2073667321020076. (In Russ.).
17. Kraemer B. M., Anneville O., Chandra S. et al. Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change. *J. Geoph. Res. Let.* 2015; 42: 4981—4988.
18. Piccolroaz S. M., Toffolon M., Majone B. The role of stratification on lakes' thermal response: The case of Lake Superior. *Water Resour. Res.* 2015; 51(10): 7878—7894.
19. Molchanov I. V. *Ladozhskoye ozero = Lake Ladoga.* Moskva—Leningrad: Hydrometeoizdat, 1945; 558 p. (In Russ.).
20. Dubinov A. E., Dubinova I. D., Saikov S. K. *W-funktsiya Lamberta i yeye primeneniye v matematicheskikh zadachakh fiziki = Lambert's W-function and its application to mathematical problems in physics.* Textbook for universities. Sarov: Russian Federal Nuclear Center. 2006; 160 p. (In Russ.).
21. The R Project for Statistical Computing. Available at: <https://www.r-project.org/> (date of the application: 03.05.2024).
22. Imberger J., Patterson J. C. Physical limnology. *Adv. Appl. Mech.* 1990; 27: 303—475.
23. Winslow L. A., Read J. S., Hansen G. J. et al. Seasonality of change: Summer warming rates do not fully represent effects of climate change on lake temperatures. *Limnol. Oceanogr.* 2017; 62: 2168—2178. doi: 10.1002/lno.10557.
24. Forsh-Menshutkina T. B. *Kislorodnyy gisterezis v oligotrofnnykh ozerakh. = Oxygen hysteresis in oligotrophic lakes.* Issues of modern limnology. Ed. Kalesnik S.V. Leningrad: Nauka Press. 1973; C. 94—101. (In Russ.).
25. Naumenko M. A., Guzivaty V. V. Climate Relationships between Air Temperature and Water Temperatures in the Different Limnetic Zones of Lake Ladoga. *Geography and Natural Resources.* 2022; 43(1): 69—76. doi: 10.1134/S1875372822010097.
26. Naumenko M. A., Guzivaty V.V. Seasonal evolution of stable thermal stratification in central area of Lake Ladoga. *Limnological Review.* 2023; 23(3): 177—189. doi: org/10.3390/limnolrev23030011.
27. Woolway R. I., Sharma S., Weyhenmeyer G. A. et al. Phenological shifts in lake stratification under climate change. *Nat Commun.* 2021; 12: 2318. doi:org/10.1038/s41467-021-22657-4.
28. Edlund M. B., Almendinger J. E., Fang X. et al. Effects of Climate Change on Lake Thermal Structure and Biotic Response in Northern Wilderness Lakes. *Water.* 2017; 9: 678. doi: org/10.3390/w9090678.

Информация об авторах

Михаил Арсеньевич Науменко, доктор географических наук, профессор, руководитель Лаборатории географии и гидрологии, Институт озероведения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук», m.a.naumenko@mail.ru.

Вадим Викторович Гузиватый, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Лаборатории географии и гидрологии, Институт озероведения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук», guzivaty@gmail.com.

Information about authors

Mikhail Arsenievich Naumenko, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Geography and Hydrology, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences (IL RAS), St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), m.a.naumenko@mail.ru.

Vadim Viktorovich Guzivaty, Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Geography and Hydrology, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences (IL RAS), St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), guzivaty@gmail.com.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 20.09.2023

Принята к печати после доработки 14.05.2024

The article was received on 20.09.2023

The article was accepted after revision on 14.05.2024

УДК 551.5(063)

**Всероссийская научно-практическая конференция
«Гидрометеорология и физика атмосферы:
современные достижения и тенденции развития»**

В Российском государственном гидрометеорологическом университете с 20 по 22 марта 2024 года прошла вторая Международная научно-практическая конференция «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития». Как и в прошлом году, участники конференции обсуждали роль гидрометеорологических данных, наблюдений и моделирования в оценке амплитуды и временных масштабов изменения климата и глобального потепления, а также мониторинг, моделирование и прогнозирование процессов, вызванных взаимодействием суши и атмосферы. Большая часть докладов была посвящена



Приветственное слово декана метеорологического факультета,
доктора физ.-мат. наук Я. В. Дробжевой

численным моделям прогнозирования гидрометеорологических явлений в разных временных масштабах.

С приветственным словом в начале работы конференции выступил директор Департамента науки, технологий и инноваций РГГМУ Игорь Геннадьевич Мясников.

Участниками конференции стали сотрудники из более чем 35 университетов и научно-исследовательских организаций РФ, а также Белоруссии, Армении и Узбекистана. География участников обширна: Санкт-Петербург, Ташкент, Минск, Пермь, Владивосток, Воронеж, Иркутск, Казань, Москва, Обнинск, Ростов-на-Дону, Мурманск, Томск, Красноярск, Саратов, Сыктывкар и Владивосток. Работа проходила в гибридном формате с возможностью дистанционного участия с помощью онлайн подключения. Этот формат удобен участникам, так как позволяет учесть часовые пояса и делает участие в конференции более комфортным.

В рамках конференции проведено пленарное заседание и организована работа четырех секций, две из которых были посвящены студенческим научным изысканиям. В первый день проведения научно-практической конференции состоялось её торжественное открытие и пленарное заседание. В ходе заседания были заслушаны доклады об актуальных исследованиях мирового уровня, проводимых как в стенах Российского государственного гидрометеорологического университета, так и в университетах Санкт-Петербурга, Казани, Перми.

Работа конференции во второй день и третий день была организована в формате параллельного функционирования двух секций. Сразу после окончания



Доклад доктора физ.-мат. наук С. П. Смышляева на пленарном заседании

пленарного заседания началась работа первой секции «*Математическое моделирование окружающей среды*», которая была посвящена результатам применения методов вычислительной математики и информационных технологий в гидрометеорологии. За время работы секции было заслушано 19 устных докладов.

Как и в прошлом году наибольший интерес вызвали исследования, представленные в работе второй секции «*Анализ и прогноз атмосферных процессов разных пространственно-временных масштабов*». В докладах отражена большая практическая значимость улучшения качества прогнозов погоды. Различным аспектам прогнозирования было посвящено 23 устных и 3 стендовых докладов.

Задача третьей секции «*Современные методы наблюдений и системы обработки гидрометеорологических данных*» заключалась в обмене опытом в области сбора и обработки глобальной или региональной гидрометеорологической информации, включая данные со спутников. Было 17 докладов, большая часть из которых — дистанционные.

По результатам исследований в области океанологии и гидрологии было заслушано 14 докладов в рамках работы четвертой секции «*Фундаментальные и прикладные проблемы океанологии и гидрологии*».

Авторы докладов отмечали, что в ближайшие годы прогресс в науках об атмосфере будет необходим для улучшения понимания основных процессов и их моделирования; это потребует совершенствования существующих наблюдательных, концептуальных и технологических подходов. Проявленный интерес к конференции и результаты обсуждений показали, что в настоящее время по-прежнему



Участники конференции



Работа волонтеров

актуальны задачи, связанные с наблюдениями и усвоением данных, задачи, охватываемые традиционными дисциплинами (физика и химия атмосферы, динамика атмосферы и прогнозирование погоды) и многие другие.

Накануне Всемирного метеорологического дня, который отмечается 23 марта, проводились две студенческие секции: *«Исследование окружающей среды»* и *«Первые шаги в науке»*.

С приветственным словом на первой студенческой секции выступила декан метеорологического факультета, доктор физ.-мат. наук Яна Викторовна Дробжева, отметив важность проведения такого рода конференций и участия в них студентов.

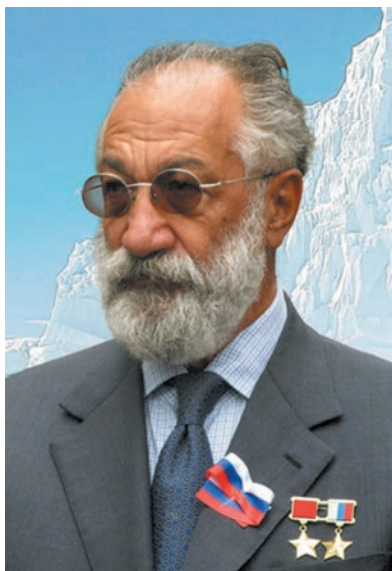
В обеих секциях было сделано 58 устных и стендовых докладов. В первой секции подавляющее большинство из 43 устных и 7 стендовых докладов представили студенты РГТМУ. Для студентов младших курсов была организована работа второй студенческой секции. Здесь также были представлены работы школьников.

Отдельного внимания заслуживает волонтерская работа студентов, которая была достойным образом организована сотрудниками деканата метеорологического факультета.

В заключение следует отметить, что все участники конференции высоко оценили уровень организации ее работы и выразили глубокую благодарность руководству Российского государственного гидрометеорологического университета, программному и организационному комитетам.

УДК 001(092)

Памяти Артура Николаевича Чилингарова



1 июня 2024 года на восемьдесят пятом году жизни после тяжелой болезни скончался Почётный Президент РГГМУ, депутат Госдумы, доктор географических наук, член-корреспондент РАН, Президент Ассоциации полярников, Герой Советского Союза, Герой России, лауреат общественной награды «Достояние Севера», заслуженный метеоролог РФ, заслуженный географ РФ Артур Николаевич Чилингаров.

Жизнь А. Н. Чилингарова тесно связана с городом на Неве. Здесь он родился в 1939 году, провел детство в блокадном городе, окончил арктический факультет Ленинградского высшего инженерного морского училища имени адмирала С. О. Макарова в 1963 году, начал работать в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте, навсегда связав свою жизнь с Арктикой, ставшей его призванием. В 1969 году его назначили начальником молодежной экспедиции на дрейфующую станцию Северный полюс — 19 (СП—19). Артур Николаевич Чилингаров рассказывал, как в начале 1970 годов льдина, на которой полярники проводили измерения, напоролась на мель и начала разрушаться. В воду ушла техника, палатки, провизия. Только смекалка и быстрая реакция помогли избежать человеческих жертв. В последующие два месяца экспедиции выяснилось, что Северный морской путь может использоваться круглогодично.

За свою карьеру он несколько раз сталкивался со смертью и чуть было не погиб, поэтому, как только видел людей в беде, сразу же старался им помочь. Спасал людей с застрывшего во льдах исследовательского судна «Михаил Сомов»,

помогал в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской атомной электростанции.

По признанию А.Н. Чилингарова, он обладал авантюрным характером. Он стал одним из первых, кто долетел до Антарктиды на «тяжёлом» самолёте в 1991 г., а в 2000 г. уже добрался до нее на легкомоторном самолёте. В 1987 году возглавил поход атомного ледокола «Сибирь», достигшего в свободном плавании Северного полюса. «Это была, возможно, самая трудная экспедиция, с шансами 70 на 30. 70 — что мы не вернёмся. Это единственный раз, когда я писал завещание. Я там написал жене, кто мне сколько должен. Шучу, конечно!» — рассказывал Чилингаров.

Став депутатом Государственной Думы, А. Н. Чилингаров продолжал организовывать и возглавлять полярные экспедиции, занимался развитием арктического туризма. Так, он руководил сверхдальним перелетом многоцелевого вертолета Ми-26, показавшим возможность его эксплуатации в центральных районах Северного Ледовитого океана. При содействии А. Н. Чилингарова была открыта долговременная дрейфующая станция «Северный полюс — 32».

Артур Николаевич является автором более 50 научных публикаций, доктором географических наук, членом-корреспондентом РАН. Как первый в мире человек, который в течение шести месяцев побывал на Южном и Северном полюсах, Чилингаров занесен в Книгу рекордов Гиннеса. Награжден орденами Ленина, Трудового Красного Знамени, знаком Почета, орденом «За морские заслуги» и многими медалями. В 2010 году награжден орденом Почетного легиона (Франция).

Отдельная страница жизни А. Н. Чилингарова была связана с Государственной Полярной академией, становление которой, начиная с 1991 г., проходило при его активной поддержке. В 1990 годы А. Н. Чилингаров и знаменитый исследователь Арктики, директор Центра Арктических исследований Франции Жан Малори обсуждали русско-французский проект учебного заведения, целью которого будет подготовка специалистов, занимающихся вопросами сохранения культур малочисленных народов Севера, а также эффективных направлений природопользования в Арктическом регионе. И такое учебное заведение было создано в Санкт-Петербурге. В книге Почетных гостей А. Н. Чилингаров написал: «Я счастлив, что есть такая академия — Полярная, что здесь учатся дети моих товарищей-полярников, которые трудятся на Крайнем Севере, Дальнем Востоке, работают на наше Отечество. Счастья Вам в учебе, жизни, счастья в будущей работе. Буду все делать, чтобы помогать Вам». В 1998 году А. Н. Чилингаров был назначен Председателем Попечительского совета Государственной Полярной академии, а спустя 10 лет, 11 ноября 2008 г., был избран почетным профессором. 3 июня 2009 г. А. Н. Чилингаров был избран первым президентом Государственной Полярной академии.

В 2012 году представленную федеральным агентством по образованию на должность специального представителя президента Российской Федерации по международному сотрудничеству в Арктике и Антарктике кандидатуру А. Н. Чилингарова ученый совет вуза поддержал единогласно. Отвечая на вопросы СМИ

в связи с назначением, А. Н. Чилингаров подчеркнул, что он «долго не раздумывал, когда поступило соответствующее обращение из федерального агентства», поскольку «кадровая политика в арктическом Заполярье, на территории российского Севера и Дальнего Востока, подготовка специалистов были всегда близки, понятны». «В государственных вопросах образовательной политики применительно к Арктике я никогда не оставался безучастным», — добавил он.

После присоединения Государственной Полярной академии в качестве структурного подразделения к Российскому государственному гидрометеорологическому университету А. Н. Чилингаров способствовал подготовке кадров для территории Арктики. С 2017 г. вплоть до своей кончины являлся Президентом, а затем Почетным Президентом РГГМУ.

«Артур Николаевич оставил неоспоримый след в истории страны и освоения Арктики. Искренний, отзывчивый и преданный своему делу человек, который мог решать, порой, невероятные задачи. Это человек, который всегда стремился к новым и новым открытиям», — отметил ректор РГГМУ Валерий Леонидович Михеев.

Светлая память Артуру Николаевичу — Человеку с большой буквы.

Ректорат, сотрудники университета

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 75

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Литературный редактор Л. В. Кипнес, канд. пед. наук, доцент
Технический редактор М. В. Иванова

Подписано в печать 25.06.2024. Выход в свет 02.07.2024. Формат 70×100 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,35. Тираж 50 экз. Заказ № 1474. Цена свободная.
Адрес издателя, редакции и типографии: РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет
