

Научный журнал

Учредитель и издатель:

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения
Российской академии наук

Издаётся с января 2017 г.

Периодичность издания 4 раза в год

Scientific journal

Founder and Publisher:

Institute of Marine Geology and Geophysics
of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences

Published since January 2017

Periodicity: Quarterly

Основная задача журнала – информирование научной общественности, российской и зарубежной, о результатах изучения геосистем переходных зон Земли и связанных с ними проблем геофизики, геологии, геодинамики, сейсмологии, геоэкологии и других наук.

The main objective of the journal is informing of scientific community, Russian and foreign, about the results of researches in geosystems of the Earth's transition zones and related problems of geophysics, geology, geodynamics, seismology, geoecology and other sciences.

Журнал:

- включен в **Единый государственный перечень научных изданий** – «Белый список», уровень 2;
- индексируется в **Russian Science Citation Index (адрес РИНЦ)**;
- регистрируется в системе **CrossRef**. Научным публикациям присваивается идентификатор – DOI;
- включен в каталог **Ulrich's Periodicals Directory**;
- индексируется в международной базе научных журналов открытого доступа – **Directory of Open Access Journals (DOAJ)**;
- включен в **Перечень ВАК** – Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

- 1.6.1. Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика (*геолого-минералогические*)
- 1.6.3. Петрология, вулканология (*геолого-минералогические*)
- 1.6.9. Геофизика (*геолого-минералогические; физико-математические*)
- 1.6.14. Геоморфология и палеогеография (*географические*)
- 1.6.17. Океанология (*географические; геолого-минералогические; физико-математические*)
- 1.6.20. Геоинформатика, картография (*физико-математические*)
- 1.6.21. Геоэкология (*географические; геолого-минералогические*)
- 1.5.15. Экология (*биологические*)
- 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела (*технические; физико-математические*).

The Journal is:

- included in the **Unified State List of Scientific Publications – "White List", Level 2**;
- indexed in **Russian Science Citation Index (RISC core)**;
- registered in the **CrossRef** system. Scientific publications are assigned an individual identifier DOI;
- included in the **Ulrich's Periodicals Directory** database;
- indexed in the **Directory of Open Access Journals (DOAJ)**;
- included in the **VAK List** – the List of peer reviewed scientific journals, in which main scientific results of dissertations for the Candidate of Sciences and Doctor of Sciences degrees in the following scientific specialties and corresponding branches of science should be published:

- 1.6.1. General and Regional Geology. Geotectonics and Geodynamics (*Geological and Mineralogical*)
- 1.6.3. Petrology and Volcanology (*Geological and Mineralogical*)
- 1.6.9. Geophysics (*Geological and Mineralogical; Physical and Mathematical*)
- 1.6.14. Geomorphology and Paleogeography (*Geographical*)
- 1.6.17. Oceanology (*Geographical; Geological and Mineralogical; Physical and Mathematical*)
- 1.6.20. Geoinformatics and Cartography (*Physics and Mathematics*)
- 1.6.21. Geoecology (*Physical and Mathematical*)
- 1.5.15. Ecology (*Biological*)
- 1.1.8. Mechanics of deformable solids (*Physical and Mathematical; Engineering*).

Адрес учредителя и издателя

ИМГиГ ДВО РАН
ул. Науки, 16, Южно-Сахалинск, 693022
Тел./факс: (4242) 791517
E-mail: gtrz-journal@mail.ru
Сайт: <http://journal.imgg.ru>

Postal address

IMGG FEB RAS
1B, Nauki Str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022
Tel. / Fax: (4242) 791517
E-mail: gtrz-journal@mail.ru
Website: <http://journal.imgg.ru>

© ИМГиГ ДВО РАН, 2026

Редакционная коллегия*Главный редактор*

Завьялов Петр Олегович, член-корреспондент РАН, д-р геогр. наук, заместитель директора, руководитель лаборатории взаимодействия океана с водами суши и антропогенных процессов, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Заместитель главного редактора

Богомолов Леонид Михайлович, д-р физ.-мат. наук, директор, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

Ответственный секретарь

Прытков Александр Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

- **Алексанин Анатолий Иванович**, д-р техн. наук, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
- **Быков Виктор Геннадьевич**, д-р физ.-мат. наук, Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск
- **Закупин Александр Сергеевич**, канд. физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск – *зам. главного редактора*
- **Ковалев Дмитрий Петрович**, д-р физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск
- **Кочарян Геворг Грантович**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт динамики геосфер РАН, Москва
- **Куркин Андрей Александрович**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород
- **Лабай Вячеслав Степанович**, д-р биол. наук, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск
- **Левин Владимир Алексеевич**, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток; Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
- **Лучин Владимир Александрович**, д-р геогр. наук, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток
- **Марапулец Юрий Валентинович**, д-р физ.-мат. наук, доцент, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, Паратунка
- **Огородов Станислав Анатольевич**, профессор РАН, д-р геогр. наук, чл.-корр. РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
- **Плехов Олег Анатольевич**, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
- **Разжигаяева Надежда Глебовна**, д-р геогр. наук, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток
- **Ребецкий Юрий Леонидович**, д-р физ.-мат. наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва
- **Родкин Михаил Владимирович**, д-р физ.-мат. наук, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва
- **Рыбин Анатолий Кузьмич**, д-р физ.-мат. наук, Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия

Editorial Board*Editor-in-Chief*

Peter O. Zav'yalov, Corr. Member of the RAS, Dr. Sci. (Geography), Deputy Director, Head of the Laboratory of land-ocean interactions and the anthropogenic impact, P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

Deputy Editor-in-Chief

Leonid M. Bogomolov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Director, Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Executive Secretary

Alexander S. Prytkov, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk

- **Anatoly I. Alexanin**, Dr. Sci. (Eng.), The Institute of Automation and Control Processes of the FEB RAS, Vladivostok
- **Victor G. Bykov**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics of the FEB RAS, Khabarovsk
- **Alexander S. Zakupin**, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk – *Deputy Editor-in-Chief*
- **Dmitry P. Kovalev**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk
- **Gevorg G. Kocharyan**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Institute of Geosphere Dynamics of the RAS, Moscow
- **Andrei A. Kurkin**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod
- **Vyacheslav S. Labay**, Dr. Sci. (Biology), Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk
- **Vladimir A. Levin**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Institute of Automation and Control Processes of the FEB RAS, Vladivostok; Lomonosov Moscow State University, Moscow
- **Vladimir A. Luchin**, Dr. Sci. (Geogr.), V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the FEB RAS, Vladivostok
- **Yuri V. Marapulets**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation of the FEB RAS, Kamchatka Region
- **Stanislav A. Ogorodov**, Professor of RAS, Dr. Sci. (Geogr.), Corr. Member of the RAES, Lomonosov Moscow State University, Moscow
- **Oleg A. Plekhov**, Corr. Member of RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the RAS, Perm'
- **Nadezhda G. Razjigaeva**, Dr. Sci. (Geogr.), Pacific Institute of Geography of the FEB RAS, Vladivostok
- **Yuri L. Rebetskiy**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow
- **Mikhail V. Rodkin**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of the RAS, Moscow
- **Anatoly K. Rybin**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek City, Bishkek, Kyrgyzstan

Редакционная коллегия

- **Сергеева Ирина Вячеславовна**, д-р биол. наук, профессор, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии
- **Такахаши Хироаки**, профессор, Институт сейсмологии и вулканологии Университета Хоккайдо, Саппоро, Япония
- **Троицкая Юлия Игоревна**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород; Нижегородский гос. университет им Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
- **Шакиров Ренат Белалович**, д-р геол.-минер. наук, доцент, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток
- **Шевченко Георгий Владимирович**, д-р физ.-мат. наук, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск
- **Шеменда Александр Ильич**, профессор исключительного класса, Университет Ниццы София-Антиполис, Ницца, Франция
- **Ярмолюк Владимир Викторович**, академик РАН, д-р геол.-минер. наук, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

Editorial Board

- **Irina V. Sergeeva**, Dr. Sci. (Biology), Professor, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov
- **Hiroaki Takahashi**, Professor, Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, Sapporo, Japan
- **Yuliya I. Troitskaya**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhniy Novgorod; Lobachevsky University, Nizhniy Novgorod
- **Renat B. Shakirov**, Dr. Sci. (Geol. and Miner.), Associate Professor, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the FEB RAS, Vladivostok
- **Georgy V. Shevchenko**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk
- **Alexandre I. Chemenda (Shemenda)**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professeur des Universités de Classe Exceptionnelle, Université de Nice Sophia Antipolis, Nice, France
- **Vladimir V. Yarmolyuk**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Geol. and Miner.), Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the RAS, Moscow

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. (Регистрационный номер ПИ № ФС 77-73243 от 13.07.2018 г.). Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Переводчик **Чера Анастасия Дмитриевна**
Редакторы **Казаков Артем Иванович, Жердева Ольга Андреевна**
Компьютерная верстка **Филимонкина Анна Александровна**
Дизайн **Леоненкова Александра Викторовна**

Адрес редакции журнала и типографии:
 693022, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б.
 gtrz-journal@mail.ru

Формат 60 × 84 /8. Усл. печ. л. 17.2.
 Тираж 150 экз. Заказ 8110. Свободная цена.
 Дата выхода в свет 24.09.2026.

Подписной индекс в Объединенном интернет-каталоге «Пресса России» (www.pressa-rf.ru) – 80882.
 По вопросам распространения обращаться также в редакцию.

Translator **Anastasiya D. Chera**
Editors **Artem I. Kazakov, Olga A. Zherdeva**
Desktop publishing **Anna A. Filimonkina**
Design **Alexandra V. Leonenkova**

Postal address of the Editorial Office and printing house:
 1B, Nauki Str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022.
 gtrz-journal@mail.ru

Sheet size 60 × 84 /8. Conv. print. sheets 17.2.
 Number of copies 150. Order no. 8110. Free price.
 Date of publishing 24.09.2026.

Subscription index in the United web-catalogue "Press of Russia" (www.pressa-rf.ru) – 80882.
 Please also contact the Editorial Office for distribution.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

Петрология, вулканология

А.И. Малышев, Л.К. Малышева. Серная лава вулкана Головнина 1979 г. (остров Кунашир, Южные Курильские острова) ... 265

Океанология

Г.В. Шевченко, Ж.Р. Цхай. Пространственно-временная изменчивость колебаний уровня океана по данным IMMOAD SSHA после дополнительной коррекции приливной составляющей ... 289

К.В. Кириллов. Условия усиления инфрагравитационных колебаний в районе пролива Красноармейский (юго-восточный Сахалин) ... 299

И.В. Шумилов, И.В. Никулина, Д.А. Ващенко, В.М. Пищальник, В.А. Романюк. О внутрисезонных и межсезонных связях ледовых режимов Берингова и Чукотского морей ... 309

Геоэкология

А.Ю. Озеров, Д.А. Боброва, Д.В. Мельников. Комплексная оценка лавинной опасности бассейна р. Паратунка (п-ов Камчатка) ... 330

Е.А. Архипов, С.И. Зотов, Т.А. Яковчук, М.И. Колягина. Сезонное и пространственное распределение химического загрязнения водотоков урбанизированной территории с рекреационной специализацией (на примере города Светлогорска Калининградской области) ... 347

Экология

Е.А. Евсеева, Я.О. Тимофеева. Влияние использования консорциума эффективных микроорганизмов на биологические свойства и содержание гумуса в почвах трех контрастных агроэкосистем ... 358

Е.А. Летунова, А.В. Скорик, В.Н. Филатов. Анализ воздействия погодных факторов на поведение пелагических промысловых рыб и возможность обнаружения их косяков и скоплений с использованием беспилотных летательных аппаратов ... 371

А.А. Шестёра, К.Р. Масалева, А.В. Литвиненко, М.М. Донец, М.А. Беланов, А.Д. Боровкова, Н.Д. Василенко, А.Г. Болдескул, В.Ю. Цыганков. Территориальные и видовые особенности накопления микроэлементов в промысловых рыбах Охотского моря ... 380

От редакции

ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЕ УЧЕНЫЕ

О.В. Веселов. Памяти Иннокентия Константиновича Туезова ... 399

А.В. Дегтерев, И.П. Кремнева, П.Ю. Ковтунович, Л.М. Богомолов, Д.Н. Козлов. Памяти Рафаэля Владимировича Жаркова ... 405

Petrology and Volcanology

A.I. Malyshev, L.K. Malysheva. Sulfur lava from Golovnin volcano in 1979 (Kunashir Island, Southern Kuril Islands) ... 265

Oceanology

G.V. Shevchenko, Zh.R. Tskhai. Spatiotemporal variability of sea level fluctuations according to IMMOAD SSHA data after additional correction of the tidal component ... 289

K.V. Kirillov. Conditions for amplification of infragravity oscillations in the Krasnoarmeysky Strait area (south-eastern Sakhalin) ... 299

I.V. Shumilov, I.V. Nikulina, D.A. Vashchenko, V.M. Pishchalnik, V.A. Romanyuk. On the intraseasonal and interseasonal relationships between the ice regimes of the Bering and Chukchi Seas ... 309

Geoecology

A.Yu. Ozerov, D.A. Bobrova, D.V. Melnikov. Comprehensive assessment of avalanche hazard in the Paratunka river basin (Kamchatka peninsula) ... 330

E.A. Arkhipov, S.I. Zotov, T.A. Iakovchuk, M.I. Kolyagina. Seasonal and spatial distribution of chemical pollution of watercourses in an urbanized area with a recreational specialization (using the example of Svetlogorsk, Kaliningrad Region) ... 347

Ecology

E.A. Evseeva, Ya.O. Timofeeva. Effects of applying an effective microorganism consortium on the biological properties and humus content of soils in three contrasting agroecosystems ... 358

E.A. Letunova, A.V. Skorik, V.N. Filatov. Analysis of the impact of weather factors on the behavior of pelagic commercial fish and the possibility of detecting their schools and aggregations using unmanned aerial vehicles ... 371

A.A. Shestera, K.R. Masaleva, A.V. Litvinenko, M.M. Donets, M.A. Belanov, A.D. Borovkova, N.D. Vasilenko, A.G. Boldeskul, V.Yu. Tsygankov. Spatial and species-specific features of trace element accumulation in commercial fish of the Sea of Okhotsk ... 380

From the Editorial Board

FAR EASTERN SCIENTISTS

O.V. Veselov. In memory of Innokenty Konstantinovich Tuezov ... 399

A.V. Degterev, I.P. Kremneva, P.Yu. Kovtunovich, L.M. Bogomolov, D.N. Kozlov. In memory of Rafael Vladimirovich Zharkov ... 405

© Авторы, 2026 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2026.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.21+550.4+552.13

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.3.265-288>
<https://www.elibrary.ru/slbktr>

Серная лава вулкана Головнина 1979 г. (остров Кунашир, Южные Курильские острова)

А. И. Малышев, Л. К. Малышева

Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Резюме. В августе 1979 г. на вулкане Головнина произошли три эпизода излияний серных лав. Активные потоки серы наблюдаются крайне редко, поэтому их изучение остается актуальным. Недостатком наблюдения серных лав в 1979 г. до сих пор было отсутствие описания их вещественного состава. Мы обнаружили остатки серного лавового потока в сентябре 2024 г. на месте, соответствующем излиянию 26 августа 1979 г. В работе описывается структура и вещественный состав лавы, анализируются условия образования серного расплава и его эволюция. В составе лавы обнаружен ранее неизвестный природный гексасульфид мышьяка (AsS_6), доминирующий среди микровключений и являющийся результатом самоочищения мышьяковистой серы при ее кристаллизации. Полученные в работе результаты сравниваются с имеющимися сведениями об излиянии серной лавы на вулкане Ластаррия (северное Чили) в 2019 г. Исследования показывают, что изучение вещества серных лав имеет большое значение для понимания геохимической эволюции литосферы в эпитермальном ($T < 400^\circ\text{C}$) диапазоне температур и не менее важно, чем исследования магматических пород для более высокотемпературных условий.

Ключевые слова: вулкан Головнина, серная лава, самородная сера, конденсация, эпитермальное породообразование, гексасульфид мышьяка, вулкан Ластаррия

Sulfur lava from Golovnin volcano in 1979 (Kunashir Island, Southern Kuril Islands)

Aleksandr I. Malyshev, Lidiia K. Malysheva

Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Three episodes of sulfur lava effusion occurred at Golovnin volcano in August 1979. Active sulfur flows are extremely rare, and their study therefore remains relevant. The limitation of observations of sulfur lavas in 1979 has so far been the lack of a description of their material composition. We discovered the remnants of a sulfur lava flow in September 2024 at a site corresponding to the effusion on August 26, 1979. This paper describes the structure and material composition of lava and analyzes the conditions of formation of sulfur melt and its subsequent evolution. A previously unknown natural arsenic hexasulfide, Lastarria volcano (AsS_6) was found in the lava, which dominates among the microinclusions and is the result of self-purification of arsenic sulfur during its crystallization. The results obtained in this work were compared with the available data on the effusion of sulfur lava at Lastarria volcano (northern Chile) in 2019. Studies show that the investigation of the material composition of sulfur lavas is of great importance for understanding the geochemical evolution of the lithosphere in the epithermal ($T < 400^\circ\text{C}$) temperature range and is no less important than the study of igneous rocks for higher temperature conditions.

Keywords: Golovnin volcano, sulfur lava, native sulfur, condensation, epithermal rock formation, arsenic hexasulfide, Lastarria volcano

Финансирование и благодарности

Исследования проведены в рамках государственного задания Института геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН (№ 124020400013-1) с использованием совместного исследовательского центра «Геоаналитик» ИГТ УрО РАН.

Авторы выражают благодарность Н.С. Чебыкину, Л.В. Леоновой за помощь в работе со сканирующим электронным микроскопом; В.И. Силаеву за консультации по минералогии; администрации и сотрудникам Курильского заповедника за помощь в проведении исследований.

Funding and Acknowledgements

The studies are carried out as a part of the IGG UB RAS state assignment (No. 124020400013-1) using the “Geo-analitik” shared research facility of the IGG UB RAS.

The authors express their gratitude to N.S. Chebykin and L.V. Leonova for their assistance in working with a scanning electron microscope; to V.I. Silaev for his advice on mineralogy and to the administration and staff of the Kuril Reserve for their help in conducting research.

Для цитирования: Малышев А.И., Малышева Л.К. Серная лава вулкана Головнина 1979 г. (остров Кунашир, Южные Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 3, с. 265–288. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.3.265-288>; <https://www.elibrary.ru/slbktr>

For citation: Malyshev A.I., Malysheva L.K. Sulfur lava from Golovnin volcano in 1979 (Kunashir Island, Southern Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 3, p. 265–288. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.3.265-288>; <https://www.elibrary.ru/slbktr>

Введение

В августе 1979 г. на вулкане Головнина (рис. 1) произошли три эпизода излияний серных лав [1]. Последнее из них наблюдали студенты Ташкентского университета Е.П. Трофимов, Е.Б. Глущенко и Т.В. Коржаева. Какие бы то ни было сведения о вещественном составе этих лав отсутствуют. В сентябре 2024 г. в размывах временными водотоками пляжа на южном побережье озера Горячего нами обнаружены остатки серного лавового потока, соответствующие месту последнего излияния серной лавы 26 августа 1979 г. (рис. 1 d–e). Это позволяет изучить структуры и состав лавы.

Первое описание излияния серной лавы принадлежит Т. Ватанабэ [2]. В 1936 г. он наблюдал серный поток длиной 1400 м на вулкане Сиретоко-Иозан, Япония. Описания излияний серных лав содержатся в работах [3–13]. Представленный в обзоре [14] перечень из 55 вулканов [14, табл. 2], на которых наблюдались проявления серного вулканизма, может быть дополнен вулканом Менделеева (о. Кунашир, Россия) и вулканом Берутарубе (о. Итуруп, Россия), на которых Р.Е. Остроумовым, Н.И. Массеровым и Г.М. Власовым [15] наблюдались небольшие многократно изливающиеся потоки серы. Помимо этого, недавно появились новые детальные наблюдения [16] излияний серных лав на вулкане Ластаррия (север Чили) в январе 2019 г.

Образование расплавленной серы исследователи обычно связывают с плавлением и ремобилизацией фумарольных отложений. Появление расплавленной серы рассматривается [14, 16] как свидетельство физико-химических возмущений внутри вулканической системы, являющееся возможным предвестником эруптивной активности вулкана. Активные потоки серы наблюдаются крайне редко [2, 13, 16]. Поэтому опубликованные Е.К. Мархининым [1] наблюдения студентов Ташкентского университета по-прежнему актуальны, однако их существенным недостатком до сих пор было отсутствие описания вещественного состава серных лав. Этот недостаток мы постараемся восполнить в данной работе. Более того, в рамках данного сообщения мы постараемся показать, что изучение вещества серных лав имеет такое же большое значение для понимания эпитепимального ($T < 400$ °C) породо- и рудообразования, как и исследования магматических пород для более высокотемпературных условий.

Методы

Микроструктуру серной лавы исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA LANS с приставками EMF и DORE INCA Energy350X-Max50 и NordlysNano (Oxford Instruments). Состав

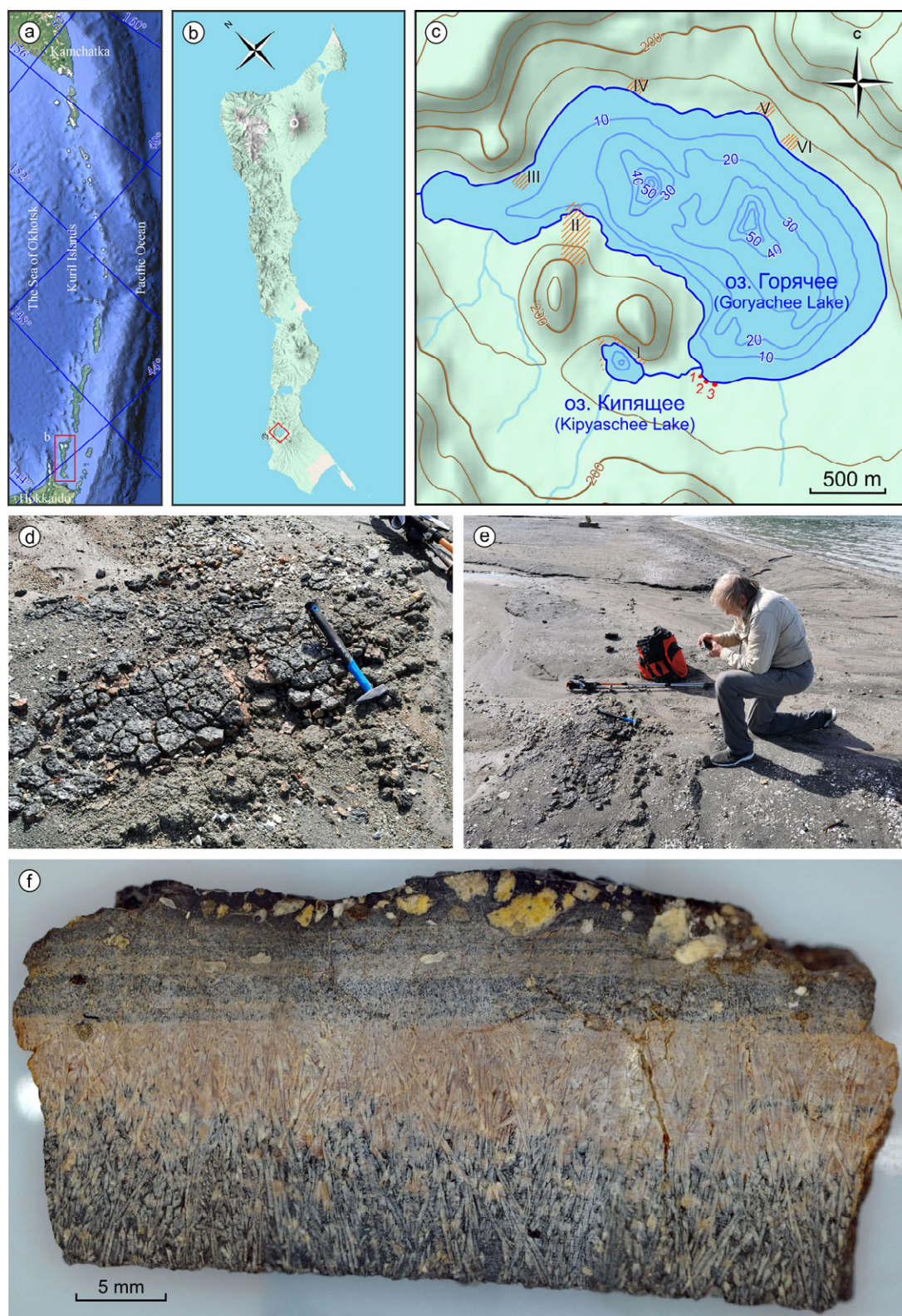


Рис. 1. Курильские острова (a), остров Кунашир (b), кальдера Головнина и точки излияния серной лавы (c) в 1979 г., остатки серного потока (d–e) в его современном состоянии (фото – сентябрь 2024 г.) и поперечное сечение серной лавы (f). 1–3 – точки серных излияний в начале августа (1), в ночь с 18 на 19 (2) и днем 26 (3) августа 1979 г.; I–VI термальные поля: Центральное Восточное (I), Центральное Западное (II), Подводное (III), Безымянное (IV), Набоковское (V) и Черепახовое (VI).

Fig. 1. Kuril Islands (a), Kunashir Island (b), Golovnin caldera, and sulfur lava effusion points (c) in 1979; remnants of the sulfur flow (d–e) in its current state (photo from September 2024) and a cross-section of sulfur lava (f). 1–3 – points of sulfur effusions in early August (1), on the night of August 18–19 (2), and in the afternoon of August 26 (3), 1979; I–VI, thermal fields: Central East (I), Central West (II), Podvodnoe (III), Bezymiannoe (IV), Nabokovskoe (V), and Cherepakhovoe (VI).

лавы определяли при помощи спектрального сканирования. Изучение спектров при помощи сканирующего электронного микроскопа имеет ограничения для количественного определения легких элементов с низким числом электронов в электронной оболочке (элементы I–II периодов). В связи с этим, в частности, в составе вещества не определяется водород. Углерод используется для проводящей зоны на поверхности образца, при расчете спектральных составов он не учитывается. Низка точность количественных определений кислорода, в расчетах его содержания предусмотрена возможность использования стехиометрии. Спектральное разрешение обычно ниже разрешения электронного изображения. Поэтому определение спектра мелких деталей изображения приводит к погрешности, связанной с частичным захватом спектра окружающих веществ. Максимальное разрешение спектра на используемой аппаратуре соответствует кругу диаметром около 6 микрон. Несмотря на эти ограничения, метод оптимален для изучения состава и микроструктуры образцов с целью геохимических реконструкций их генезиса. В теоретической части обсуждения результатов используется молекулярно-химическое моделирование, подробно рассмотренное в [17].

Вулканологическая обстановка

Вулкан Головнина (48.87 N, 145.50 E, 547 м, самый южный вулканический центр Курильской островной дуги) представляет собой кальдеру, которая возникла ~38 тыс. лет назад [18] и имеет диаметр около 6 км. В посткальдерный период образовались 5 андезит-дацитовых куполов [19] – 4 внутри и 1 снаружи кальдеры. В кальдере расположены два вулканических озера (рис. 1 с) [20–22].

Кипящее озеро (135 м н.у.м., площадь 0.05 км²) расположено у южного подножия Центрального Восточного купола и занимает часть кратера, образовавшегося в результате последнего сильного извержения вулкана.

Средняя температура воды на поверхности озера составляет 35–37 °С. Вода Кипящего озера стекает в озеро Горячее по ручью длиной около 400 м. Общий сток из озера в основном обеспечивается горячими источниками, бьющими со дна озера [23, 24]. Максимальная глубина озера составляет 25 м [24]. Дно озера имеет форму кратерной воронки с крутосклонной центральной частью и пологим мелководным обрамлением. Есть свидетельства существования расплава серы на его дне [17, 25].

Горячее озеро (128 м н.у.м., площадь 2,94 км²) расположено в северо-восточной части кальдеры. Температура поверхностного слоя воды в озере в сентябре составляет 17–18 °С. Средняя глубина озера 20 м. В западной и восточной частях озера находятся два подводных кратера глубиной около 60 м. Эхолотное профилирование [26] показало, что оба кратера проявляют газо-гидротермальную активность. Река Озерная вытекает из озера на западе и через 2 км впадает в Охотское море.

Последнее сильное извержение, образовавшее воронку озера Кипящего, произошло около 1300–1420 гг. нашей эры [27] у южного подножия Центрального Восточного купола. Вулкан время от времени демонстрирует эпизодическую эффузивную активность: в августе 1979 г. произошли рассматриваемые в данном сообщении излияния серных лав [1], в сентябре 2022 г. были обнаружены серно-опаловый поток и излияние геля кремниевой кислоты [25]. Есть косвенные свидетельства выбросов газа: летом 1980 г. лес погиб полосой шириной более 100 м, протянувшейся на несколько километров от побережья оз. Горячее на юго-запад [1].

В последнее десятилетие отмечается [24, 28]* тенденция к нарастанию газо-гидротермальной активности вулкана. В частности, с 2024 г. в составе гидротермальной пены Кипящего озера после многих лет отсутствия вновь появились крупные пустотелые шарики самородной серы [28]. Это свидетельствует об изменении температуры донного серного расплава в сторону повышения его полимер-

* Малышев А.И., Малышева Л.К. 2026. Газо-гидротермальная активность вулкана Головнина в 2021–2025 гг. *Вулканология и сейсмология* (принята к печати).

ности. Пик полимерности серы приходится на температуру 187 °С, тогда как температура конденсации воды на дне кратерной воронки оз. Кипящее и контактирующего с ней серного расплава составляет 138.5 °С [17]. Следовательно, происходит повышение температуры донного серного расплава под воздействием глубинной газовой активности.

В 2025 г. пустотелые шарики серы существенно потемнели [28] из-за загрязнения серы веществом из глубинных газовых потоков. Потемнение серы обусловлено рассеянным мышьяком в ее составе, количество которого за год увеличилось с 1.87 до 3.45 вес. %, т.е. в 1.8 раза. Почти в 3 раза (с 0.42 до 1.21 вес. %) увеличилось количество кремния в виде опаловых включений, в 2.5 раза (с 0.54 до 1.34 вес. %) железа, почти в 4 раза (с 0.08 до 0.31 вес. %) цинка в виде сульфидов и в 1.6 раза (с 0.13 до 0.21 вес. %) алюминия в составе глинистых минералов. В целом чистота серы снизилась с 97.0 вес. % в 2024 г. до 93.6% в 2025 г. Все это также свидетельствует о росте активности глубинных газов и делает возможными новые излияния серных лав и/или газовые выбросы аналогично событиям 1979–1980 гг.

Поскольку наблюдения активных серных потоков редки, и информация об излияниях серных лав сохраняет актуальность, мы воспроизводим наблюдения студентов Ташкентского университета по [1] с небольшими правками и сокращениями. Первое истечение серы произошло в начале августа 1979 г. на южном берегу Горячего озера в 160–170 м к востоку от устья, вытекающего из Кипящего озера. Жидкая сера залила тонким (до 10 см, в среднем 5 см) участок песчано-пемзового пляжа размером 15 × 15 м. Объем излившейся серы оценивается в 11.25 м³. Второе истечение серы произошло в ночь с 18 на 19 августа 1979 г. у кромки воды Горячего озера в 33 м к востоку от первого. Длина участка, залитого серой, составила 18 м, ширина – 10 м, местами языки серы стекли под воду по дну озера на 1.5–2 м. При средней толщине серного покрова 5 см объем излившейся серы составил около 9 м³.

Третье истечение серы происходило 26 августа 1979 г. на глазах студентов Ташкентского университета Е. П. Трофимова, Е. Б. Глущенко и Т. В. Коржаевой в 51 м к востоку от второго серного покрова. Истечение серы началось в 13:15 местного времени и продолжалось 2 ч 15 мин. На поверхности светлых песчано-пемзовых озерных отложений сначала появились отдельные темные пятна диаметром 2–10 см. Их становилось все больше. Эти темные пятна представляли собой центры просачивания жидкой серы. Просачивающаяся во многих местах жидкая сера образовала сплошной покров длиной 20 м вдоль берега озера, шириной 8 м и несколькими языками стекала в озеро. Объем ее составил 8–10 м³.

Истечение жидкой серы сопровождалось интенсивным выделением со всей ее поверхности сернистого газа. Местами на поверхности серного покрова возникали небольшие воронки, в которых жидкая сера бурлила под действием выделяющихся газов. Застывание серного покрова проходило динамично, благодаря чему на его поверхности образовывались мелкие серные башенки, пирамидки, грибки, а внутри многочисленные газовые полости. Часто поверхность имела гляцевидный характер. На контакте застывшей серы наблюдался 1–2-сантиметровый слой плотносцементированного озерного песка. Наблюдатели и Е.К. Мархинин считают вероятным, что температура жидкой серы была близкой к ее температуре кипения. Об этом, по их мнению, говорит тот факт, что опущенная в жидкую серу палка сразу же воспламенялась, а также то обстоятельство, что по пологому дну кальдерного озера, преодолевая сопротивление холодной воды, тонкие языки серы смогли продвинуться на расстояние до 3 м.

Результаты

Сохранившийся фрагмент серных лав (рис. 1 d) находится на песчано-пемзовом пляже южного берега оз. Горячего в предполагаемом районе серного излияния 26 августа 1979 г. и имеет площадь около 2 м².

Он обнажился после прошедших в конце августа 2024 г. сильных дождей в размыве на краю временного водотока, впадающего в озеро Горячее (рис. 1 е). Лава имеет неровную черную гляцевую поверхность со следами интенсивного газоотделения – порами и многочисленными округлыми впадинами. Серный покров сильно фрагментирован многочисленными (вероятно, контракционными) трещинами, в которых видна коричневая самородная сера.

Толщина покрова серной лавы около 2.5 см, однако местами она возрастает до 5 см из-за повторного натека серной лавы на ранее излитый покров. В вертикальном разрезе лавы выделяются четыре слоя (рис. 1 ф, рис. 2 а). Приповерхностный слой (3–4 мм) имеет черный цвет основной массы, в которой присутствуют многочисленные включения песка белого и желтоватого цвета размером до 2 мм. Ниже, во втором слое толщиной около 5 мм, крупные включения практически исчезают, лава приобретает неявно выраженную в оттенках серого цвета субгоризонтальную слоистость, связанную с колебаниями количества микровключений и примесей в сере. Еще ниже расположен 3-й слой толщиной 8–12 мм – коричневая самородная сера, практически лишенная темноцветных включений. Здесь появляется субвертикальная неоднородность, связанная с формированием кристаллического агрегата игольчатой моноклинной серы. Поскольку моноклинная сера при температуре ниже 95.3 °C переходит в ромбическую, то в настоящее время эта неоднородность представлена псевдоморфозами ромбической серы по моноклинной.

В четвертом, подошвенном, слое толщиной 4–8 мм вновь появляются включения песка размером до 1 мм, а также обильные микровключения, окрашивающие этот слой в черный цвет. Однако в этом слое, в отличие от двух верхних слоев, микровключения концентрируются в межкристаллическом пространстве игольчатой серы, подчеркивая ее субвертикальную ориентировку.

Повторное натекаание серной лавы на ранее излитый покров приводит к более сложной

слоистости. Три верхних слоя нового покрова аналогичны описанной выше слоистости одиночного покрова, тогда как подошвенный слой верхнего покрова объединяется с двумя верхними слоями более раннего нижнего покрова и образует многочисленные локальные проседания сквозь слой коричневой самородной серы нижнего покрова. Подошвенный слой нижнего покрова за счет этого осаждения обогащается дополнительным песчаным материалом из собственных верхних слоев и подошвенного слоя нового покрова. Игольчатая раскристаллизация серной лавы объединенного покрова имеет сквозной характер, распространяясь от подошвы нижнего покрова до верха слоя коричневой серы в перекрывающем натеке.

Фрагменты силикатных минералов редки. В полосе сканирования рис. 2 b обнаружено лишь 4 небольших фрагмента Fe-Mg-Ca силикатов (пироксенов) размером от 110 до 325 мкм. Присутствуют отдельные (3 шт. на полосу сканирования рис. 2 а, b) песчинки вулканической пемзы (рис. 2 j, t) размером около 1 мм. Они выделяются высокой и, как правило, незаполненной пористостью, а также достаточно однородным алюмосиликатным составом вулканического стекла – 70.5 % Si, 15.9 % Al, 5.9 % Na, 3.7 % Ca, 3.2 % Fe, 0.8 % K (здесь и далее в ат. % без учета кислорода). В стекле присутствуют микролиты размером 3–10 мкм. По составу они отличаются от стекла отсутствием Na и K, пониженным содержанием Si (52.8 %) и Al (5.7 %), наличием Mg (20.6 %) и повышенными содержаниями Fe (12.4 %) и Ca (8.5 %).

Аналогичное по составу алюмосиликатное предположительно вулканическое стекло, но без микролитов, присутствует во многих включениях песчанистого материала. Часто оно формирует губчатые формы с порами, полностью заполненными серой (рис. 2 r), вплоть до образования крупных ажурных конструкций размером до 3 мм (рис. 2 s). В состав этих образований наряду с предположительно вулканическим стеклом входят блоки чистого кремнезема (рис. 2 r) и фрагменты Fe-Mg-Ca силикатов (рис. 2 s).

Наиболее сложную структуру имеют песчанистые включения в верхнем слое серного покрова (рис. 2 с, л). Предположительно вулканическое стекло в них постоянно демонстрирует переходы в чистый опал (рис. 2 с), иногда имеющие довольно сложную пространственную форму (рис. 2 л). В заполнении пор помимо самородной серы участвует сульфид мышьяка (рис. 2 х). В одной из заполненных серой пор обнаружено пластинчатое (скелетное) выделение TiO_2 (рис. 2 г).

В песчанистых включениях, не имеющих в своем составе вулканического стекла, доминирует кремнезем (опал) – рис. 2 ф, и, м, п, q. Размеры опаловых включений обычно не превышают 1.5 мм. В них присутствуют более мелкие выделения TiO_2 в виде отдельных зерен (рис. 2 q) или дендритовидных выделений (рис. 2 ф, и), алюмосиликаты с атомарным соотношением $\text{Al/Si} \approx 1$ без примеси щелочных металлов (каолинит – $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$, рис. 2 ф, и, q), а также алюмонатрокалиевые квасцы (рис. 2 м, п). Природная калиевая разность этих квасцов, образующая промышленные скопления, известна как алуни́т – $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$. В дальнейшем для простоты мы будем использовать это название с уточнением при необходимости реальных атомарных соотношений K и Na. В случае алуни́та в опаловом включении на рис. 2 м, п атомарное соотношение $\text{K}/(\text{Na} + \text{K})$ варьирует от 0.19 до 0.42 при среднем значении 0.32.

Среди микровключений вулканическое стекло отсутствует. Доминируют опал, сульфиды железа и мышьяка. В подчиненном количестве встречаются алуни́т (рис. 2 о, u, v), выделения TiO_2 (как самостоятельные – рис. 2 v, так и пластинчато-решетчатые скелетные формы в сере или опале – рис. 2 г, w, y), зерна сульфида цинка (сфалерит ZnS , рис. 2 d, u, w), каолинит (рис. 2 w, y). Изредка встречаются очень мелкие выделения барита (BaSO_4).

Микровключения опала имеют округлую комковатую форму с неровной волнистой поверхностью (признак коагуляции). Сколы или иные признаки дробления отсутствуют. По составу опал обычно представлен чистым SiO_2 ,

но иногда содержит незначительную примесь алюминия (Al/Si до 0.03). Микровключения опала могут содержать выделения титана, каолинита, алуни́та (рис. 2 u, v, w), либо сами могут входить в состав более крупных агрегатов алуни́та (рис. 2 п, o).

В свою очередь, включения алуни́та могут содержать в своем составе каолинит и сульфиды железа (рис. 2 o). Наиболее мелкие включения алуни́та имеют округлую форму (рис. 2 u). Встречается как кристаллический алуни́т (рис. 2 o, p), так и, чаще, бесформенный (ангедральный). Иногда они образуют совместные агрегаты. Соотношение K и Na во включениях алуни́та не влияет на кристалличность или ангедральность, демонстрируя полный спектр от чисто натриевых до чисто калиевых разностей при среднем соотношении $\text{K}/(\text{Na} + \text{K}) \approx 0.4$.

Каолинит ($\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$) обычно образует мелкие округлые включения или более сложные их агрегаты в сере, опале или алуни́те.

Выделения диоксида титана присутствуют и в сере (рис. 2 г, v, y; рис. 3 а–с), и в опале (рис. 2 ф, и, q, w; рис. 3 d–f) в виде как бесформенных плотных образований (рис. 2 q, v; рис. 3 а), так и пластинчато-решетчатых агрегатов (рис. 2 г, w, y; рис. 3 b–d). Помимо этого, TiO_2 присутствует в опале в форме дендритовидных выделений (рис. 2 ф, и; рис. 3 e–f).

Изображения с большим увеличением (поле зрения 20–100 мкм) показывают, что реальные пластинчато-решетчатые структуры выделений TiO_2 образуются только в сере (рис. 3 b, c). В опале (рис. 3 d) эти структуры формируются игольчатыми выделениями TiO_2 размером менее 2 мкм. Скопления иголок расположены пунктиром вдоль линий, образующих решетчатую структуру. Но сами иголки ориентированы перпендикулярно этим линиям. В дендритовидных выделениях TiO_2 в опале (рис. 3 e, f) перпендикулярность игольчатых выделений линиям их пространственной концентрации сохраняется, но поскольку сами линии произвольно изогнуты, то создают впечатление дендритовидности.

В плотных выделениях TiO_2 в сере (рис. 3 а) кроме Ti содержится 10.2 ат. % S и

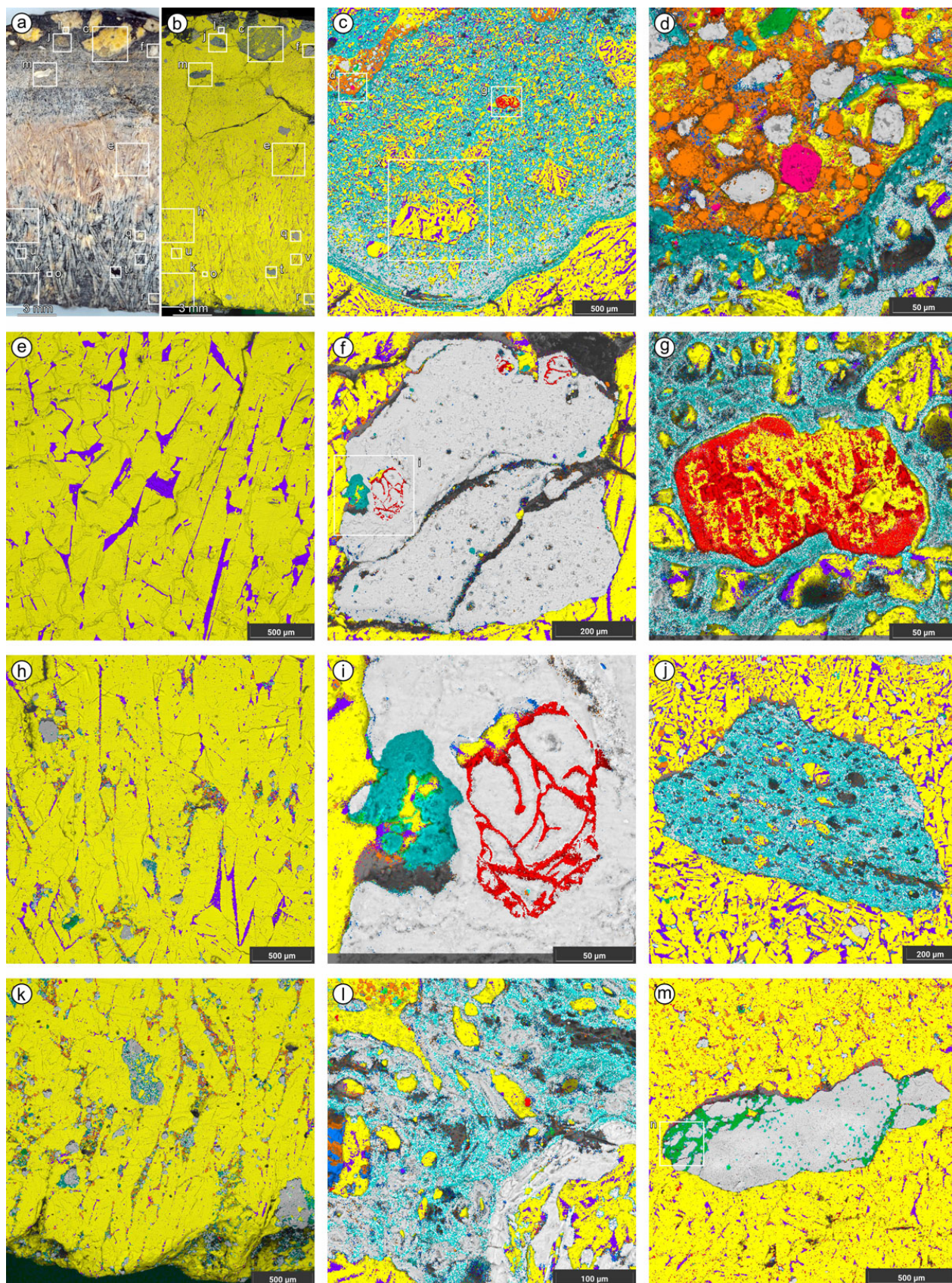


Рис. 2. Структура серной лавы в естественном цвете (а), на BSE-изображениях (р, х) и в условных цветах спектрального картирования (б–о, q–w, у): желтый – самородная сера, светло-серый – SiO_2 (опал), красный – TiO_2 , малиновый – ZnS (сфалерит), голубой – алюмосиликаты, синий – Fe-Mg-Ca силикаты, зеленый – сульфаты, оранжевый – сульфиды железа, фиолетовый – сульфиды мышьяка, от темно-серого до черного – спектральные тени. Пояснения см. в тексте.

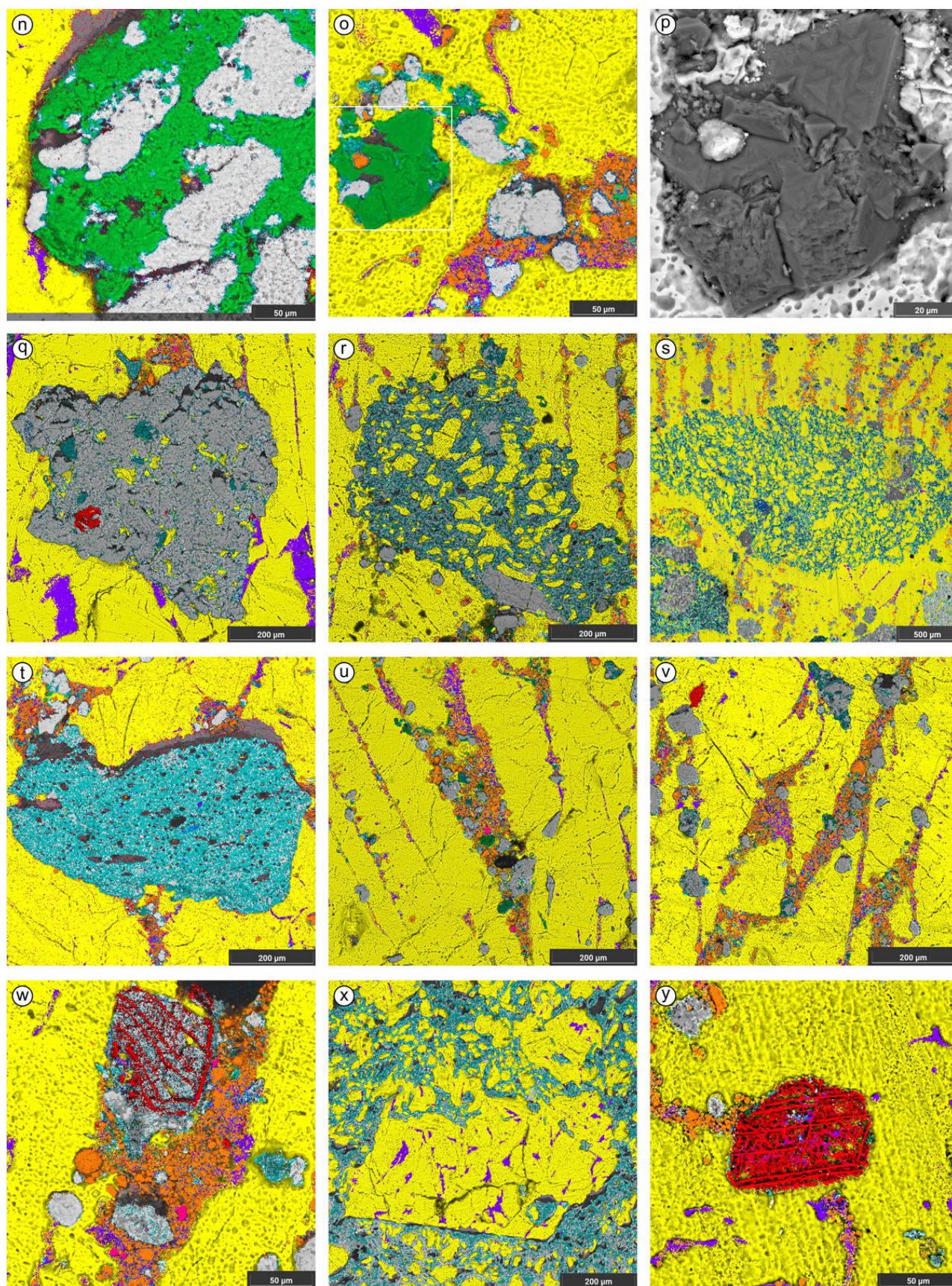


Fig. 2. The structure of sulfur lava in natural color (a), on BSE images (p, x), and in the conventional colors of spectral mapping (b–o, q–w, y): yellow, native sulfur; light gray, SiO_2 (opal); red, TiO_2 ; dark red, ZnS (sphalerite); light blue, aluminosilicates; blue, Fe-Mg-Ca silicates; green, sulfates; orange, iron sulfides; purple, arsenic sulfides; dark gray to black, spectral shadows.

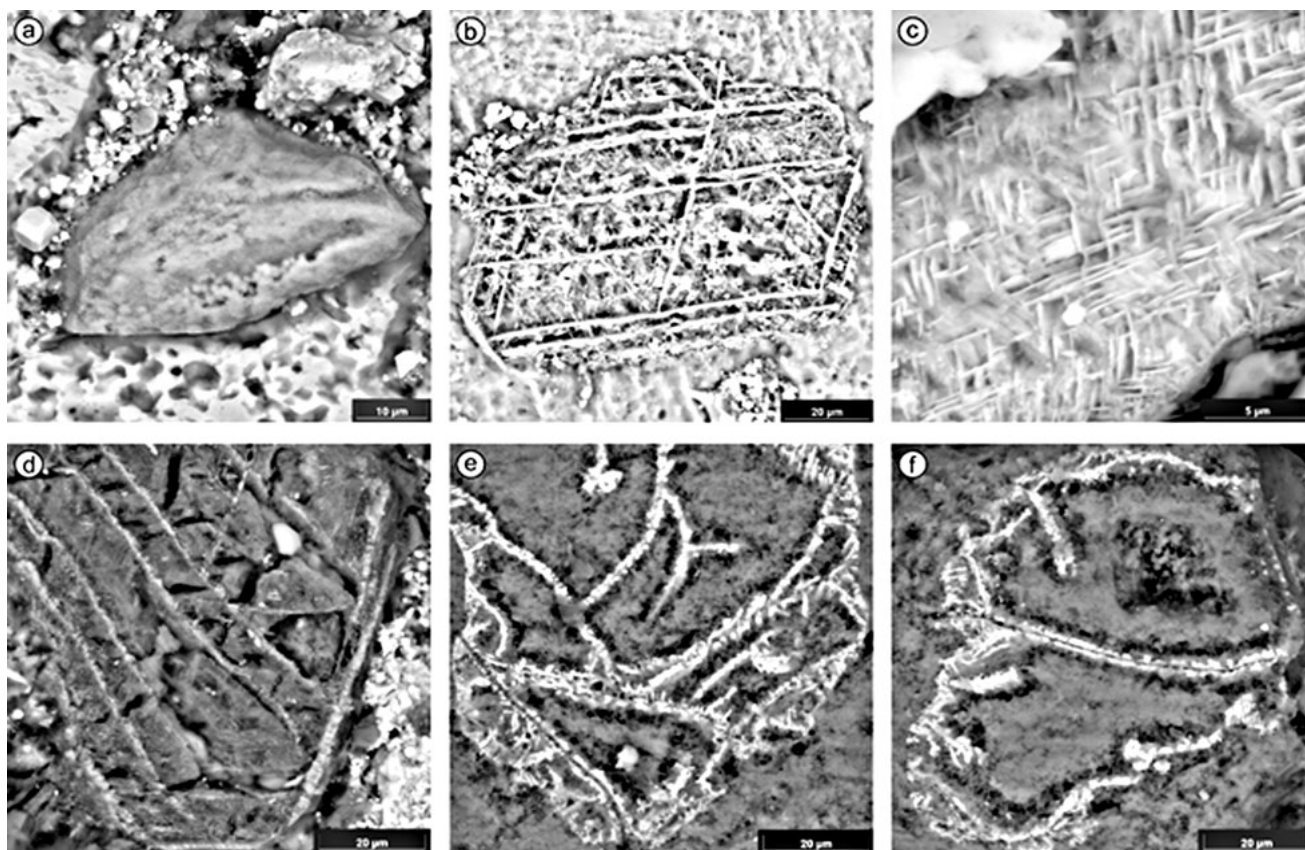


Рис. 3. Микровключения TiO_2 в сере (а), пластинчато-решетчатые агрегаты TiO_2 в сере (b–c) и опале (d), дендритовидные выделения TiO_2 в опале, BSE-изображения. Пояснения см. текст.

Fig. 3. Microinclusions of TiO_2 in sulfur (a), plate-lattice aggregates of TiO_2 in sulfur (b–c) and opal (d), and dendritic secretions of TiO_2 in opal, BSE images.

1.7 % As, т.е. примесь мышьяково-сульфидной фазы AsS_6 (см. описание ниже). Вариации состава в пластинчато-решетчатых выделениях TiO_2 в сере не прослеживаются из-за высокой концентрации пластинок, превышающих разрешение спектральных определений. По спектрам атомарный состав этих выделений без учета кислорода – 39.1 % S, 33.9 % Ti, 17.5 % Fe, 4.2 % Si, 2.8 % Mg, 1.3 % Mn, 0.6 % Al, 0.5 % As. Судя по атомарным соотношениям, сера в данном случае полностью сульфидизирована с образованием дисульфида железа FeS_2 и мышьяково-сульфидной фазы AsS_6 .

В составе дендритовидных выделений TiO_2 в опале (рис. 3 e, f) спектральные определения показывают кроме самого диоксида титана лишь присутствие вмещающего кремнезема с небольшой примесью глинозема ($\text{Al/Si} \sim 0.01\text{--}0.02$). Состав пластинчато-решетчатых выделений TiO_2 в опале более сложен. Расстояние между пластинами решетки в выделении TiO_2 ,

показанном на рис. 3 d, достаточно для оценки вариаций состава на пластинах и между ними. На линиях решетки доминирует Ti – 63.4 ат. % без учета кислорода. Кремний в подчиненном количестве (20.1 % Si). Присутствуют S (11.5 %), Fe (2.0 %), Al (1.6 %) и As (1.4 %). Между пластинами доминирует Si – 42.6 %. Ti в подчиненном количестве (26.4 %), при увеличении в межпластинном пространстве просматриваются рассеянные игольчатые образования, аналогичные выделениям TiO_2 на пластинах. Кроме повышенных содержаний S (18.4 %), Al (5.5 %), Fe (4.0 %) и As (1.8 %) присутствует небольшое количество Mg (1.3 %).

Среди сульфидных включений в лаве преобладают пленочные и трубчатые выделения ранее неизвестного природного гексасульфида мышьяка AsS_6 (рис. 4, рис. 5, табл. 1), располагающиеся в межкристаллическом пространстве моноклинной серы. Это единственные включения, присутствующие в слое коричне-

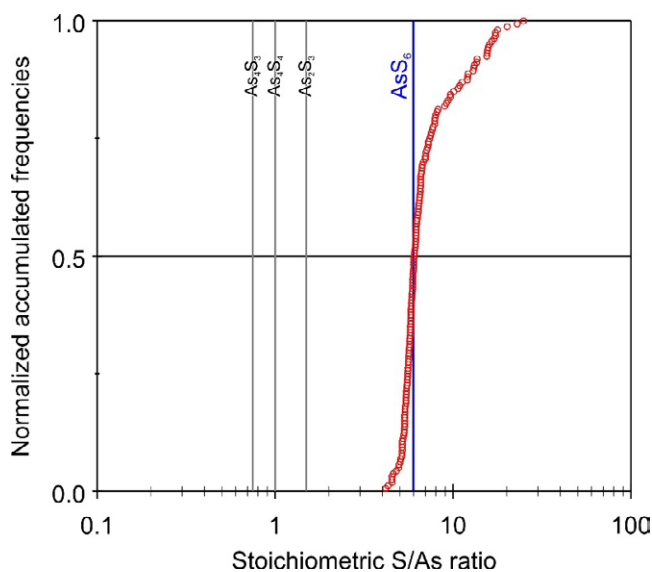


Рис. 4. Кумулята стехиометрического соотношения S/As в гексасульфиде мышьяка AsS_6 серной лавы. As_2S_3 (аурипигмент), As_4S_4 (реальгар), As_4S_3 (диморфит) – известные природные сульфиды мышьяка.

Fig. 4. Cumulative stoichiometric S/As ratio in arsenic hexasulfide AsS_6 of sulfur lava. As_2S_3 (auripigment), As_4S_4 (realgar), and As_4S_3 (dimorphite) are known natural arsenic sulfides.

вой самородной серы (3-й слой). Они отличаются от серы на BSE-изображениях (рис. 5) повышенной яркостью из-за более высокой электронной плотности As.

По данным, приведенным в табл. 1, медианное значение стехиометрического коэффициента $\text{S/As} = 5.988$, по более полной выборке из всех 160 определений (рис. 4) медианное значение $\text{S/As} = 6.072$, что соответствует точке пересечения уровня 0.5 накопленных нормализованных частот с кумулятой на рис. 4. Это показывает соответствие химического состава гексасульфида мышьяка AsS_6 . В то же время отмечается логнормальная асимметрия распределения в сторону высоких содержаний серы относительно медианных значений – среднее стехиометрическое соотношение по всей выборке составляет $\text{S/As} = 7.544$ при высоком среднеквадратическом отклонении $\sigma = 3.693$. По нашему мнению, это искажение распре-

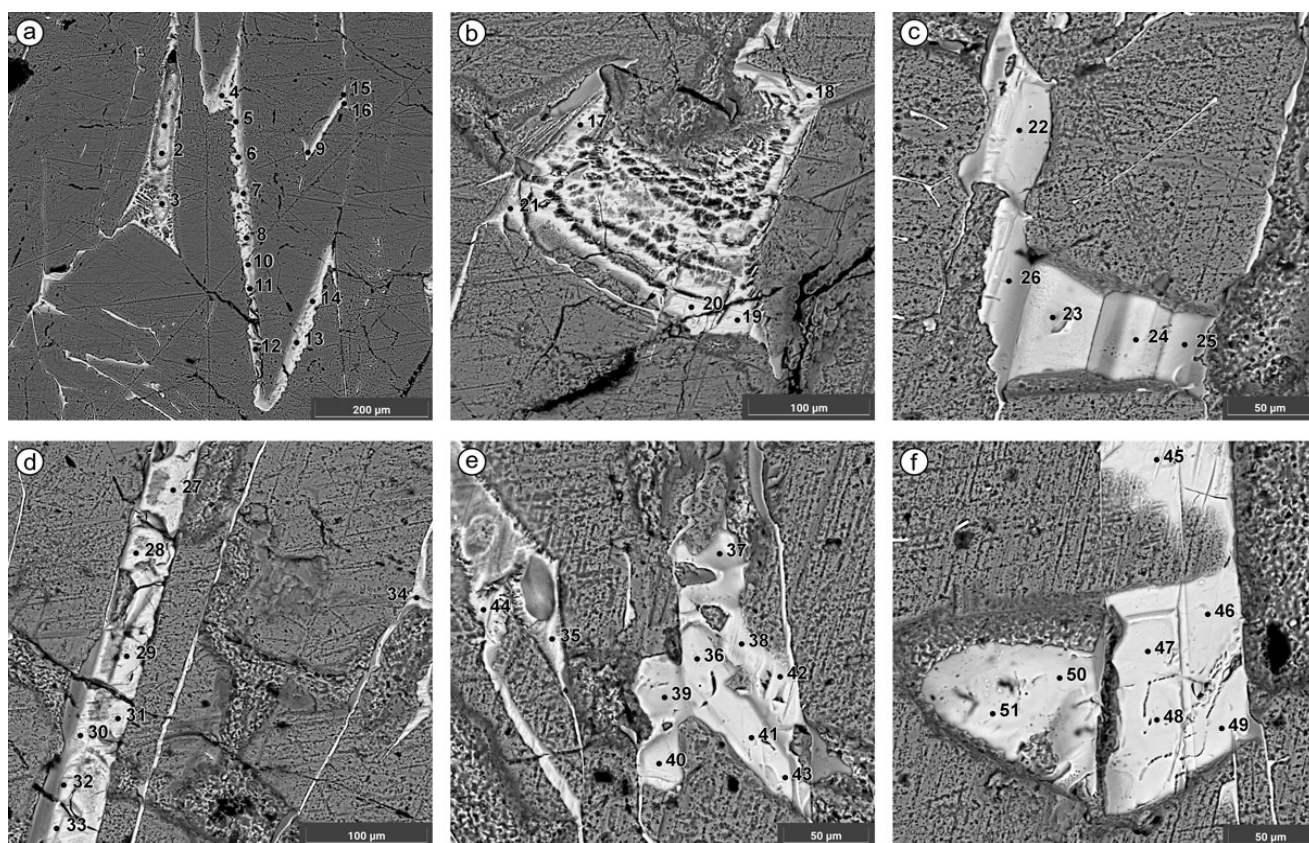


Рис. 5. Светлые пленочные выделения гексасульфида мышьяка в более темной самородной сере на BSE-изображениях: а – участок, соответствующий фрагменту спектральной карты рис. 2 б; б–д – участки, соответствующие фрагментам спектральной карты рис. 2 е. Номера точек опробования соответствуют номерам в табл. 1.

Fig. 5. Light foil precipitates of arsenic hexasulfide in darker native sulfur in BSE images: a, area corresponding to a fragment of the spectral map in Fig. 2 b; b–d, areas corresponding to fragments of the spectral map Fig. 2 e. The numbers of the test points correspond to the numbers in Table 1.

Таблица 1. Стехиометрия гексасульфида мышьяка AsS_6 **Table 1.** Stoichiometry of arsenic hexasulfide AsS_6

№ п.п.	S, ат. %	As, ат. %	Фор- мула	№ п.п.	S, ат. %	As, ат. %	Фор- мула	№ п.п.	S, ат. %	As, ат. %	Фор- мула
1	84.95	15.05	$\text{AsS}_{5.64}$	18	84.66	15.34	$\text{AsS}_{5.52}$	35	83.19	16.81	$\text{AsS}_{4.95}$
2	86.00	14.00	$\text{AsS}_{6.14}$	19	85.89	14.11	$\text{AsS}_{6.09}$	36	84.34	15.66	$\text{AsS}_{5.39}$
3	87.08	12.92	$\text{AsS}_{6.74}$	20	85.06	14.94	$\text{AsS}_{5.69}$	37	86.05	13.95	$\text{AsS}_{6.17}$
4	85.69	14.31	$\text{AsS}_{5.99}$	21	85.13	14.87	$\text{AsS}_{5.72}$	38	90.17	9.83	$\text{AsS}_{9.17}$
5	85.23	14.77	$\text{AsS}_{5.77}$	22	87.20	12.80	$\text{AsS}_{6.81}$	39	94.05	5.95	$\text{AsS}_{15.81}$
6	85.73	14.27	$\text{AsS}_{6.01}$	23	84.51	15.49	$\text{AsS}_{5.46}$	40	93.99	6.01	$\text{AsS}_{15.64}$
7	85.61	14.39	$\text{AsS}_{5.95}$	24	92.36	7.64	$\text{AsS}_{12.09}$	41	85.33	14.67	$\text{AsS}_{5.82}$
8	86.17	13.83	$\text{AsS}_{6.23}$	25	86.60	13.40	$\text{AsS}_{6.46}$	42	87.92	12.08	$\text{AsS}_{7.28}$
9	84.90	15.10	$\text{AsS}_{5.62}$	26	86.04	13.96	$\text{AsS}_{6.16}$	43	85.62	14.38	$\text{AsS}_{5.95}$
10	86.10	13.90	$\text{AsS}_{6.19}$	27	84.74	15.26	$\text{AsS}_{5.55}$	44	83.52	16.48	$\text{AsS}_{5.07}$
11	85.22	14.78	$\text{AsS}_{5.77}$	28	84.40	15.60	$\text{AsS}_{5.41}$	45	85.86	14.14	$\text{AsS}_{6.07}$
12	86.93	13.07	$\text{AsS}_{6.65}$	29	84.25	15.75	$\text{AsS}_{5.35}$	46	88.47	11.53	$\text{AsS}_{7.67}$
13	86.20	13.80	$\text{AsS}_{6.25}$	30	84.56	15.44	$\text{AsS}_{5.48}$	47	83.81	16.19	$\text{AsS}_{5.18}$
14	85.76	14.24	$\text{AsS}_{6.02}$	31	83.27	16.73	$\text{AsS}_{4.98}$	48	84.27	15.73	$\text{AsS}_{5.36}$
15	85.31	14.69	$\text{AsS}_{5.81}$	32	83.97	16.03	$\text{AsS}_{5.24}$	49	86.83	13.17	$\text{AsS}_{6.59}$
16	85.76	14.24	$\text{AsS}_{6.02}$	33	83.88	16.12	$\text{AsS}_{5.20}$	50	91.63	8.37	$\text{AsS}_{10.95}$
17	85.24	14.76	$\text{AsS}_{5.78}$	34	88.33	11.67	$\text{AsS}_{7.57}$	51	88.89	11.11	$\text{AsS}_{8.00}$

Примечание: Нумерация соответствует точкам опробования, показанным на рис. 5.

Note: The numbering corresponds to the sampling points shown in Fig. 5.

деления обусловлено тонкостью пленок AsS_6 , имеющих в некоторых случаях (см., например, поперечное сечение пленки в центральной части рис. 5 с) толщину 1–2 мкм. Подобные пленки тоньше, чем глубина проникновения электронного пучка при спектральном анализе (2–4 мкм), что приводит к добавлению в спектр избыточной серы из подпленочного слоя вмещающей серы. Для отбраковки этих некорректных определений расчет среднего значения и его среднеквадратического отклонения выполнен для определений в диапазоне $\pm \sigma$ ($S/\text{As} = 7.544 \pm 3.693$). Первая итерация дает новое соотношение $S/\text{As} = 6.233 \pm 1.204$. Вторая итерация по значениям в пределах уже нового диапазона полностью устраняет асимметрию распределения за счет тонких пленок и приводит к итоговой формуле для гексасульфида мышьяка $\text{AsS}_{5.96 \pm 0.54}$.

FeS_2 сопоставим по распространенности с AsS_6 , но присутствует (и доминирует среди

других включений) в темноцветных слоях серной лавы (рис. 6). Обычны кристаллические формы FeS_2 размером 2–10 мкм (рис. 6 h). Иногда они объединяются в сравнительно крупные агрегаты (рис. 6 e). В сколах как кристаллов, так и агрегатов просматриваются многочисленные поры и каналы, являющиеся признаками скелетного роста. Среди выделений FeS_2 размером менее 2 мкм обычны сферические образования (рис. 6 с, f, i). Встречаются более крупные и сложные сферические агрегаты FeS_2 – фрамбоиды: на рис. 6 j представлен фрамбоид диаметром ~20 мкм, состоящий из большого количества примерно одинаковых мелких (~1.3 мкм) хорошо ограненных кристаллов пирита; на рис. 6 k – фрамбоид размером ~10 мкм, образованный из более мелких (~0.8 мкм) кристаллов. Корреляция диаметра фрамбоидов с размером слагающих их кристаллитов обычна для подобных структур [29]. Пример еще одной разновидности сложных

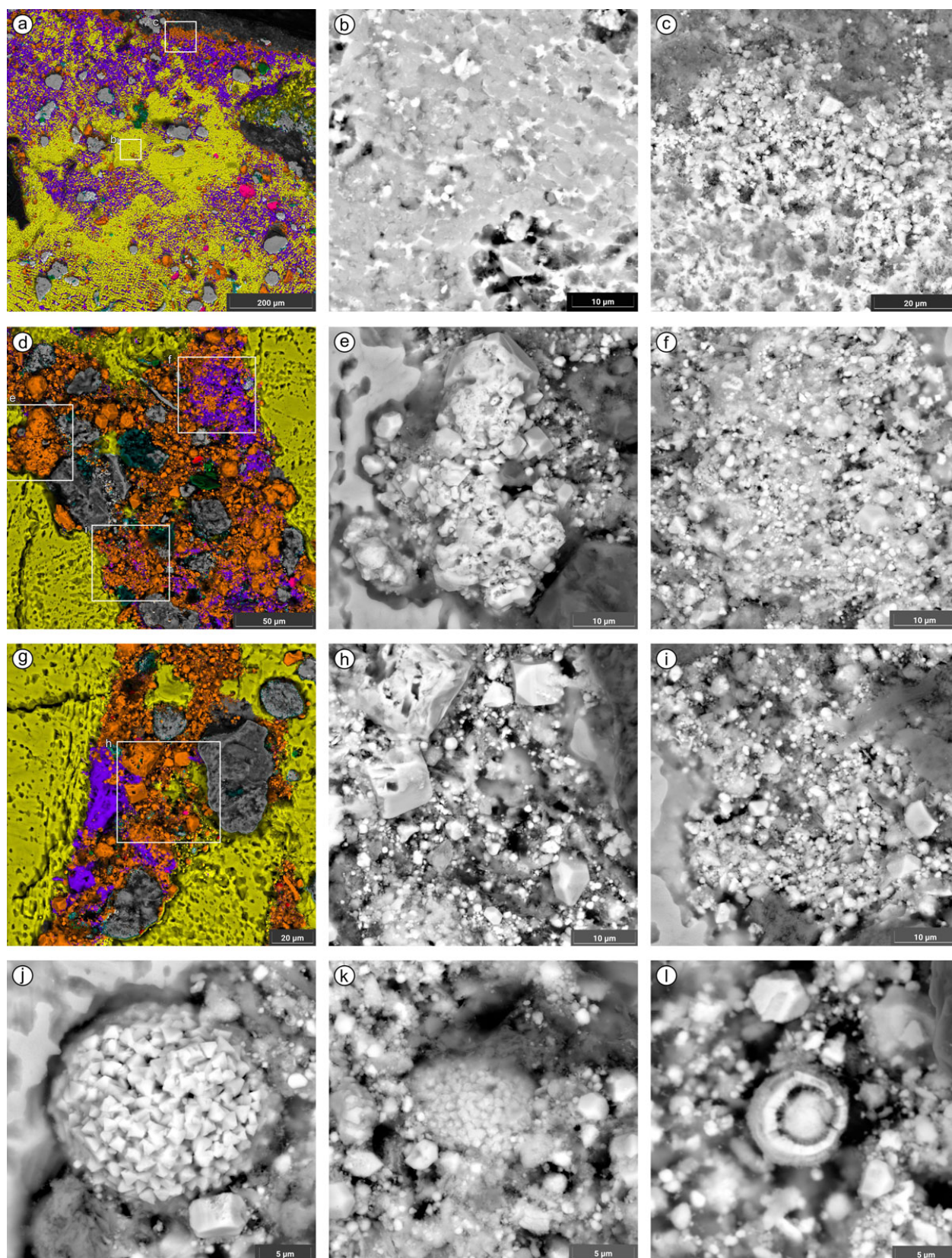


Рис. 6. Агрегаты микровключений в приповерхностной зоне заалки (а–с) и подошвенном (d–i) слое лавы, а также фрамбоидальные (j, k) и сферический (l, в центре) агрегаты FeS_2 . Условные цвета спектральных карт а, d, g – см. рис. 2. Пояснения см. текст.

Fig. 6. Microinclusion aggregates in the near-surface quench zone (a–c) and the basal layer (d–i) of the lava, as well as framboidal (j, k) and spherical (l, in the center) FeS_2 aggregates. The color scheme used in spectral maps a, d, g is shown in Fig. 2.

сферических агрегатов FeS_2 представлен на рис. 6 l. Это шарик диаметром около 8.5 мкм. Скол на его передней стороне показывает его сложное внутреннее строение: внешняя оболочка толщиной 0.5–1.2 мкм отделена от внутреннего ядра (эллипсоидального в видимой части с размером 3.9×3.3 мкм) слоем пустоты (0.5–0.8 мкм), пронизанной связующей паутиной нанометровых сульфидных нитей.

Кроме сульфидов мышьяка и железа в серной лаве обычен, но имеет второстепенное значение сульфид цинка (сфалерит, ZnS). Он входит в состав сульфидных скоплений вместе с сульфидами железа в виде сферических выделений размером до 30 мкм (рис. 2 d).

Распределение микровключений в вертикальном сечении серной лавы неравномерно и связано как со слоистостью лавы, так и с раскристаллизованностью и чистотой вмещающей серы. Межкристаллическое пространство игольчатой серы в подошвенном (4-м) слое лавы заполнено микровключениями опала, алуниита и мультисульфидной смесью (рис. 2 k, u, v, w; рис. 6 d, g). Среди сульфидов здесь доминирует FeS_2 . AsS_6 входит в эту смесь либо в виде отдельных небольших пластинок (рис. 6 g), либо в рассеянном виде, образуя локальные концентрации. Присутствие в мультисульфидных скоплениях сульфида мышьяка в виде AsS_6 подтверждается площадными спектральными анализами этих скоплений. Результаты анализов показывают, что общее атомарное стехиометрическое соотношение $(2\text{Fe} + \text{Zn} + 6\text{As})/\text{S}$ для сульфидных скоплений близко к 1. Эти результаты также свидетельствуют об отсутствии в составе скоплений свободной серы. Основу скоплений формирует неструктурированная (колломорфная) суль-

фидная матрица (рис. 6 f, h–i), на фоне которой выделяются отдельные более яркие центры сульфидной кристаллизации.

Переход от подошвенного черного лавового слоя к расположенному выше слою коричневой серы происходит постепенно (рис. 1 f). И так же постепенно (рис. 2 e, h, k) происходит изменение состава микровключений в межкристаллическом пространстве игольчатой серы – увеличение количества и величины пластинок AsS_6 с соответствующим уменьшением доли всех остальных микровключений. При этом вмещающая сульфидные включения игольчатая сера демонстрирует идеальный спектр чистой серы. Ее субвертикальные игольчатые кристаллы нередко имеют сквозное распространение через оба слоя.

В расположенном еще выше слое с неявно выраженной субгоризонтальной слоистостью игольчатые кристаллы исчезают. Участки чистой серы более мелкие и хаотичные (рис. 2 j, m), однако примеси в сере по-прежнему отсутствуют. В сульфидных скоплениях более светлых слоев доминирует AsS_6 , в более темных – FeS_2 .

В приповерхностном слое сульфидные включения также группируются в межкристаллическом пространстве серы, однако сама сера практически постоянно содержит примеси. Наиболее ярко это проявляется в самой верхней части слоя – зоне закалки (рис. 6 a–c). Здесь даже самые чистые участки серы (рис. 6 b) имеют стехиометрическое соотношение $(2\text{Fe} + \text{Zn} + 6\text{As})/\text{S} \approx 0.1$, т.е. содержат лишь 90% свободной серы, тогда как оставшиеся 10% серы входят в состав сульфидов. Очень мелкие (с нанометровой размерностью в поперечнике) хаотично расположенные ленточные и сфери-

Таблица 2. Макроэлементный состав серной лавы

Table 2. Macro element composition of sulfur lava

	Na	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	Zn	As	Сумма
at. %	0.15	0.59	3.94	93.28	0.06	0.08	0.16	0.89	0.04	0.82	100.00
wt. %	0.11	0.49	3.44	92.08	0.07	0.09	0.24	1.52	0.08	1.89	100.00

Примечание: без учета кислорода.

Note: excluding oxygen.

ческие сульфидные образования хорошо выделяются на BSE-изображениях более светлыми оттенками (рис. 6 б). На менее чистых участках (рис. 6 с, слева внизу) сульфидизированность серы достигает 50%, тогда как в сульфидных скоплениях (рис. 6 с, центр) стехиометрическое соотношение $(2\text{Fe} + \text{Zn} + 6\text{As})/\text{S} \approx 1$, т.е. свободная сера полностью отсутствует.

Состав серной лавы по данным площадного спектрального анализа в полосе рис. 2 а–б приведен в табл. 2. Общее соотношение $\text{As}/(\text{As}+\text{S})$ составляет 0.87 ат. % или 2.01 вес. %.

Обсуждение и выводы

Температура серных излияний

Мнение [1] о том, что температура серной лавы во время излияния близка к температуре кипения серы (444.6 °C), представляется субъективным и завышенным. Температура плавления ромбической α -серы 112.8 °C, моноклинной β -серы – 119.3 °C. При температуре 187 °C сера достигает пика полимеризации и практически теряет подвижность. Дальнейшее повышение температуры приводит к постепенному разрыву полимерных цепочек и снижению вязкости серы. Однако температура самовоспламенения паров серы составляет 190 °C*, а собственная температура горения серного расплава на воздухе – 280–360 °C. Именно пик полимеризации серы при 187 °C, лишаящий ее подвижности, делает излияние серных лав на земной поверхности экзотическим явлением. В противном случае серные потоки, сжигая все на своем пути и превращая атмосферный кислород в диоксид серы, могли бы быть более страшным экологическим бедствием по сравнению с силикатными лавами.

В экспериментальных исследованиях и наблюдениях за природными серными лавами установлено [16], что низкотемпературный расплав серы достигает минимальной вязкости при ~159 °C, а затем вязкость увеличивается на

четыре порядка при 160 °C. Температура природной расплавленной серной лавы на вулкане Ластаррия (север Чили) в январе 2019 г. составляла 124–158 °C. Этот температурный диапазон представляется вероятным и для серных лав вулкана Головнина. Упомянутый наблюдателями факт воспламенения опущенной в жидкую серу палки, скорее всего, свидетельствует об образовании и самовоспламенении** сероуглерода CS_2 при контакте древесины с серным расплавом.

Структура серной лавы

Наличие сравнительно крупных игольчатых кристаллов моноклинной серы в двух нижних слоях серной лавы и их субвертикальная ориентация свидетельствуют об их образовании при раскристаллизации внутренней части уже остановившегося серного потока. Разделение этой части лавы на верхний слой относительно чистой коричневой серы и темный подошвенный слой, обогащенный песчанистыми включениями и сульфидами железа, произошло под воздействием гравитационной дифференциации. Кристаллизация серы сопровождалась вытеснением из ее состава механических и химических примесей в межкристаллическое пространство. Представляется вероятным, что образующийся в этих условиях гексасульфид мышьяка не является самостоятельным природным образованием. Он является следствием раскристаллизации мышьяковистой серы и представляет собой вещество, молекулярная структура которого устойчива к самоочищению кристаллизующейся серы.

Расположенный над коричневой серой слой с неявно выраженной в оттенках серого цвета субгоризонтальной слоистостью (признаком ламинарного течения) сформировался еще до полной остановки потока. Большая вязкость (вследствие более быстрого остывания) этой части потока по сравнению с его ядром ограничила гравитационную дифференциацию и способствовала уменьшению размера как

* ГОСТ 12.1.041

** Температура самовоспламенения сероуглерода 102 °C (ГОСТ 19213–73)

фрагментов чистой кристаллической серы, так и разделяющих их концентраций включений. Скопление песчанистых включений в приповерхностном слое лавы обусловлено, вероятно, газлифтингом – выносом их в приповерхностный слой выделяющимися газами. Микровключения также выносились газовым потоком и накапливались на песчанистых включениях (рис. 2 с, d) или в поверхностной корочке закаливания (рис. 6 а–с). Сама сера в поверхностной корочке из-за быстрого остывания минимально раскристаллизована и насыщена включениями нанометровой размерности.

Минеральный состав лавы

Результирующий минеральный состав окончательно сформирован на месте излияния лавы под воздействием неравномерного остывания, активного газоотделения, гравитационной дифференциации и самоочищения серы при ее кристаллизации. Гравитационная дифференциация и газоотделение обеспечивают встречное субвертикальное перераспределение вещества лавы. Роль гравитационной дифференциации очевидна в формировании подошвенного слоя, обогащенного тяжелыми сульфидами и песчанистыми включениями.

Дегазация лавы помимо газлифтинга песчанистых включений влияет на состав этих включений. В частности, мелкие включения кремнезема, находившиеся в момент излияния в форме коллоида, могли объединяться с песчанистыми включениями, существенно меняя их состав, структуру и морфологию (рис. 2 l). Возможен также прямой перенос химических соединений газовым потоком. Присутствие пластинчато-решетчатого вкрапленника TiO_2 в сере (рис. 2 с, g), заполняющей пору песчанистого вкрапленника, свидетельствует в пользу его формирования на месте обнаружения (аутигенности), вероятно, под воздействием переноса TiO_2 газами.

Самоочищение серы при ее раскристаллизации вытесняет в межкристаллическое пространство как микровключения, так и загрязняющие примеси. Это способствует образованию в межкристаллическом пространстве

не только агрегатов микровключений, но и сульфидного коллоидного субстрата, на основе которого происходит рост (в том числе скелетный) существующих сульфидных кристаллов и агрегатов и образование новых центров кристаллизации.

Многие минералы в составе лавы имеют признаки совместного образования (сингенетичности). Прежде всего это относится к кристаллической самородной сере и гексасульфиду мышьяка. Присутствуют многочисленные признаки сингенетичности выделений TiO_2 в сере и опале, а также свидетельства совместного образования опала и алунита. Причины этой сингенетичности обусловлены условиями образования первичной серной “магмы” и ее составом.

Источник и условия формирования серной магмы

Ближайшая область возможной генерации серной магмы – Центральное Восточное термальное поле (рис. 1 с, I), к которому относится вся донная часть озера Кипящего и ряд участков на его побережье. Более того, локация излияний серы в августе 1979 г. трассируют линию от ближайшего к излияниям юго-восточного участка, удаляясь от него в каждом эпизоде. Вещественный состав серной лавы близок к составу донного расплава озера Кипящего [17, 25]. Все это позволяет рассматривать юго-восточный участок Центрального Восточного термального поля как наиболее вероятный участок для генерации серного расплава в излияниях 1979 г.

Магмы среднекислотного состава, характерные для последних извержений вулкана Головинина, способны генерировать потоки флюида с соотношением $\text{S}/\text{H}_2\text{O}$ до 0.03 [17, 25], что в приповерхностных условиях примерно соответствует изолинии парциального давления насыщения паров серы $x_s = 0.25\%$ (рис. 7 а). Существование серного расплава в контакте с водой на дне озера возможно, начиная с глубин ~5 м (рис. 7 а, точка 1) [30]. Как было показано ранее [17, 25], серный расплав образуется в донных кратерных воронках в озерах кальдеры

Головнина в результате охлаждающего воздействия озерных вод на высокотемпературные флюидные потоки. Давление водного столба определяет парциальное давление насыщенных паров серы в условиях начала конденсации воды: $x_{s(2)} = 3.90 \cdot 10^{-3} \%$ в гидротермальных выходах на глубине 25 м при температуре 138.5°C в кратерной воронке Кипящего озера (рис. 7 а, точка 2), $x_{s(3)} = 9.28 \cdot 10^{-3} \%$ при температуре 165°C на глубине 62 м в кратерных воронках Горячего озера (рис. 7 а, точка 3). Под охлаждающим воздействием озерной воды в донный расплав серы в озерах Кипящее и Горячее переходит соответственно 98.5 и 96 % от исходного потенциала серы во флюидных потоках.

Образование серного расплава под охлаждающим воздействием конденсата воды оказывает влияние на состав минеральных примесей к серному расплаву. Кислотная волна*, возникающая в условиях конденсации воды в присутствии кислых газов, имеет определяющее значение для формирования минеральных примесей. Она оказывает разрушающее воздействие на силикаты, титанаты, ферраты, ферриты, цинкаты и другие соли щелочных металлов, транспортируемые газовым потоком в щелочном конденсате.

Выводы о породо- и рудообразовании в зоне донного расплава получены на основе изучения частиц вещества, выносимого в составе гидротермальной (каолининовой) пены со

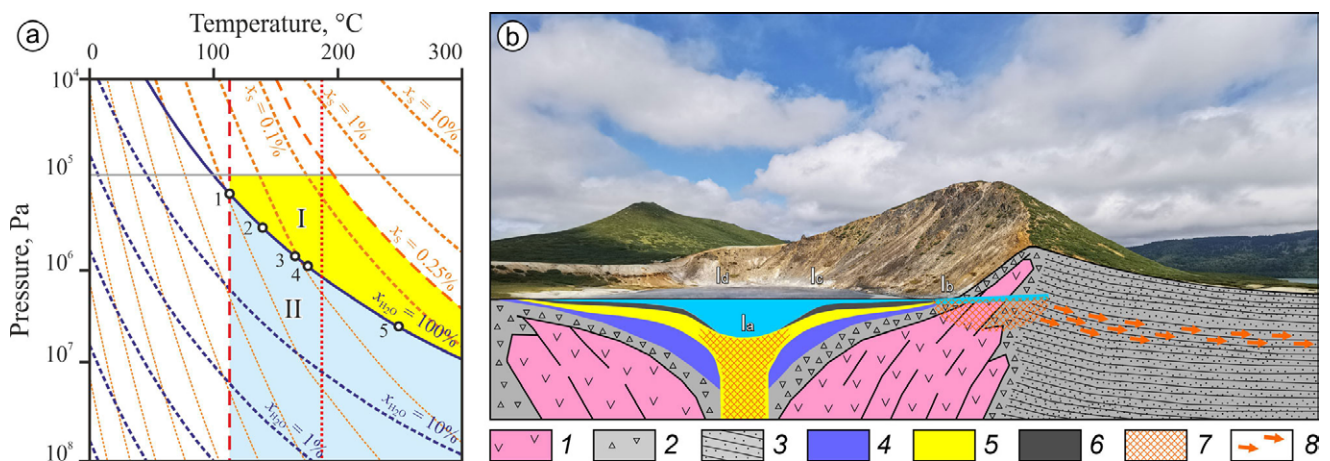


Рис. 7. Образование серного расплава для излияний 1979 г.

а – TP -диаграмма конденсации серы и воды. Температуры плавления–затвердевания серы и максимальной вязкости серного расплава показаны вертикальными красными пунктирной и точечной линиями, соответственно. K_{H_2O} – положение критической точки воды. x_s и x_{H_2O} – относительные парциальные давления (%) насыщенных паров элементарной серы и воды соответственно. I–II – TP -области сосуществования серного расплава с газообразной водой (I) и водным конденсатом (II). 1–5 – расчетные точки (пояснения приведены в тексте).

б – образование серного расплава для излияний 1979 г. I_a – I_d – активные участки Центрального Восточного термального поля: I_a – центральная донная воронка озера Кипящего, I_b – юго-восточный участок, I_c – северный участок, I_d – северо-западный участок. Условные обозначения разреза: 1 – остатки разрушенной части экструзии Центрального Восточного купола; 2 – обвално-обломочные отложения; 3 – пирокластические отложения купольной мантии; 4–6 – донные отложения озера Кипящего [25]: синие (4), желтые (5) и серые (6) илы; 7 – серный расплав; 8 – просачивание серного расплава по пирокластическим отложениям купольной мантии к местам излияний 1979 г.

Fig. 7. Formation of sulfur melt for 1979 effusions.

а, TP diagram of sulfur and water condensation. The melting-solidification temperatures of sulfur and the temperature of the maximum viscosity of the sulfur melt are shown by vertical red dash-dotted lines, respectively. K_{H_2O} is the position of the critical point of the water. x_s and x_{H_2O} are the relative partial pressures (%) of saturated vapors of elemental sulfur and water, respectively. I–II, TP areas of coexistence of sulfur melt with gaseous water (I) and aqueous condensate (II). 1–5, calculation points.

б, formation of the sulfur melt for 1979 effusions. I_a – I_d , active sites of the Central Eastern Thermal Field: I_a , central bottom funnel of Kipyashcheye Lake, I_b , southeastern site, I_c , northern site, I_d , northwestern site. Symbols of the section: 1, remnants of the destroyed part of the extrusion of the Central Eastern Dome; 2, rockfall and clastic deposits; 3, pyroclastic deposits of the dome mantle; 4–6, bottom sediments of Kipyashcheye Lake [25]: blue (4), yellow (5), and gray (6) silts; 7, sulfur melt; 8, seepage of the sulfur melt from pyroclastic deposits of the dome mantle to the sites of the 1979 effusions.

* Малышев А.И., Малышева Л.К. 2026. Вода в эндогенном породо- и рудообразовании: вулкан Головнина. *Литосфера* (принята к печати).

дна озера на его побережье [17, 25]. Разрушение силикатов, титанатов и алюминатов приводит к освобождению SiO_2 , TiO_2 и Al_2O_3 и их участию в минералообразовании. SiO_2 осаждается в виде геля кремниевой кислоты, коагулируя в силикагель, а затем трансформируясь в опал. TiO_2 формирует как самостоятельные выделения, так и разнообразные сингенетические образования совместно с опалом, серой и сульфидами. Al_2O_3 совместно с SiO_2 образует гидротермальный каолинит, а также участвует в формировании алунита. Нейтрализация сильными кислотами ферратов, ферритов и цинкатов способствует соединению железа и цинка с серой, поскольку низкотемпературный конденсат серы, представленный замкнутыми кольцевыми молекулами и полимерными цепочками, слабо активен [31].

Аналогичные процессы протекают в зонах конденсации воды и серы внутри массивов горных пород. Георадарная съемка [26] на северном (рис. 7 б, участок I_c) и юго-восточном (рис. 7 б, участок I_b) участках побережья озера Кипящего установила на глубине 2–4 м однородный обводненный горизонт, из которого по каналам гидротермы поднимаются на поверхность. На юго-восточном участке имеются многочисленные кипящие источники. Многие источники вытекают из-под осыпи на склоне остатков Центрального Восточного купола, частично разрушенного последним сильным извержением вулкана 600–700 лет назад. Поэтому естественно предположить, что обводненный горизонт на юго-восточном участке продолжается вглубь постройки купола под его юго-восточный отрог.

Водоносный горизонт в постройке купола играет охлаждающую роль и способствует конденсации воды и серы. Однако уровни давления, при которых происходит конденсация воды и серы, в толще пород выше по сравнению с гидростатическим давлением озерных вод. 30-метровая толща перекрывающих пород юго-восточного отрога Центрального Восточного купола обеспечивает литостатическое давление ~ 0.9 МПа, что соответствует температуре конденсации/кипения воды 175°C (рис. 7а, точка 4). Более того, активное пере-

мещение газовых потоков в горных породах происходит под давлением, в среднем в 5 раз превышающим литостатический эквивалент [31]. В случае 30-метровой толщи перекрывающих пород – это “сверхдавление” может составлять ~ 4.1 МПа, что соответствует температуре конденсации/кипения воды 251°C (рис. 7 а, точка 5).

Поскольку водный горизонт охлаждает и тем самым контролирует температуру контактирующего с ним расплава серы, то образующийся под юго-восточным отрогом Центрального Восточного купола серный расплав имеет температуру, близкую или превышающую температуру максимальной вязкости серного расплава. Есть вероятность, что уходящий под склон купола юго-восточный участок в своей наиболее удаленной и высокотемпературной части постоянно или эпизодически выходит за пределы экструзивного тела в купольную мантию (рис. 7 б), состоящую из наслаивающихся обвальнo-пирокластических отложений и имеющую наклон в направлении от купола, т.е. в направлении расположенного примерно в 400 м и ниже на 7 м озера Горячего (рис. 1 с).

Возможность накопления серного расплава (и создания водоупорного горизонта для обводненного горизонта) в рыхлых пирокластических отложениях обусловлена экстремальной вязкостью полимерной серы при 187°C , при которой серный расплав практически теряет подвижность. Однако при охлаждении расплава (при постепенном осаждении/оползании полимерной серы в более холодные горизонты или в результате миграции газо-гидротермальных подводящих каналов, источников тепла) происходит повышение текучести серного расплава с минимумом вязкости при 159°C . Именно это ретроградное повышение текучести, по нашему мнению, привело к просачиванию серного расплава по слоистым пирокластическим породам (рис. 7 б) с последующим излиянием серных лав на побережье озера Горячего в августе 1979 г.

Просачивание эндогенных конденсатов происходит и в сторону озера Кипящего, что прежде всего демонстрируют многочисленные

гидротермальные источники юго-восточного участка, вытекающие из-под осыпи на склоне остатков Центрального Восточного купола. Однако серный конденсат здесь представлен твердой серой и теряет собственную мобильность из-за сравнительно низких температур охлаждающего водного горизонта при его выходе на поверхность (температура испарения/конденсации воды здесь 98.5 °С, тогда как температура отвердевания серы 112.8 °С). В отличие от серы отвердевание геля кремниевой кислоты контролируется не температурой, а потерей гидратной воды и последовательной трансформацией геля сначала в силикагель, а затем в опал. Поэтому на внутреннем склоне юго-восточного участка распространены натечные кремнистые коры [25, рис. 7], отмечаются серно-опаловые потоки и высачивания геля кремниевой кислоты [25, рис. 5].

Сравнение с аналогичными исследованиями

Из-за редкости наблюдений за активными серными потоками и изучением их состава представляется возможным сравнение полученных результатов лишь с исследованиями М. Иностранца с соавторами [16]. Исследование посвящено анализу физических и химических характеристик активных потоков серы, наблюдавшихся на вулкане Ластаррия (север Чили) в январе 2019 г. Вулкан проявляет высокую газовую активность и, имея типичный поток SO_2 около 800 т/сут, является одним из самых активных поставщиков вулканических газов в атмосферу среди вулканов севера Чили. В результате фумарольной активности на северном склоне вулкана образовались обширные фумарольные отложения – желтые корки и зоны изменений. Особенностью фумарольных отложений Ластаррии является наличие потоков серы длиной 220–350 м, которые были активны до 1964 г. В этой области в 2019 г. М. Иностранца с соавторами [16] обнаружили по спутниковым снимкам, а затем исследовали на месте новые активные потоки серы. Цели исследований: i) определение механизмов формирования потоков и бассейнов серы, ii) определение их хи-

мических и минеральных характеристик и iii) оценка возможного образования проявлений расплавленной серы.

Описанное в исследовании излияние серы в январе 2019 г. по объему излитой серы (~1.45 м³) и площади распространения имеет меньший масштаб по сравнению с каждым из излияний на вулкане Головнина в 1979 г. Поток серы на вулкане Ластаррия в 2019 г. по максимальной длине от источника (12 м) идентичен излияниям на вулкане Головнина, а процесс излияния серы наблюдался более длительное время: общая продолжительность излияния составила 408 мин на вулкане Ластаррия против 135 мин в третьем эпизоде на вулкане Головнина. При этом продолжительность излияния отдельных потоков (108, 150, 113, 80 и 67 мин) на вулкане Ластаррия сопоставима с продолжительностью излияния на вулкане Головнина. Хотя замеры температуры серного расплава на вулкане Головнина в 1979 г. не проводились, мы полагаем, что температурный режим (124–158 °С) серных излияний на обоих вулканах идентичен вследствие физико-химических свойств серного расплава.

Изучение вещества серных лав вулкана Ластаррия [16] выполнено при помощи рентгеноструктурного анализа, сканирующего электронного микроскопа, анализа микроэлементов и изотопного состава серы. Исследования показали, что затвердевшая сера состояла из самородной серы с незначительным содержанием галенита и минералов, содержащих мышьяк и йод. Анализ микроэлементов показал значительное содержание Bi, Sb, Sn, Cd, а также очень высокую концентрацию As (>40 000 ppm), что вдвое выше по сравнению с лавой вулкана Головнина (~20 100 ppm).

Рентгеноструктурный анализ выявил наличие самородной серы ромбической формы со степенью кристалличности 45% и 64% в образцах серной массы и потока серы, соответственно. Более детальный осмотр с использованием изображений высокого разрешения BSE (с обратным рассеянием электронов) показал присутствие кроме доминирующей серы Al, As, Fe, K, O, Si, Ti, I и Pb. Кроме того, были обнаружены характерные кристаллические

фазы размером менее 100 мкм, содержащие As, I и Pb. Фазы, содержащие As, были идентифицированы как возможные или содержащие примеси йода, реальгара и аурипигмента, в то время как минералы, содержащие Pb, были связаны с галенитом. Все фрагменты, содержащие Si, O, Fe, K, Al и Ti отнесены исследователями к фрагментам горной породы, включенным во время перемещения потока серы по подложке. Напротив, присутствие As, I и Pb, по мнению авторов [16], может быть объяснено магматической дегазацией.

Для эффузивов с незавершенным формированием кристаллических структур, большой долей стекловатого и аморфного вещества использование рентгеноструктурного анализа в качестве основы изучения, по нашему мнению, неэффективно и может привести к ошибочным выводам. Для геохимических реконструкций образования и поведения эндогенных конденсатов детализация кристаллических структур и микроэлементный состав конденсатов несущественны, поэтому мы не используем рентгеноструктурный и микроэлементный анализы на данном этапе. Изотопные смещения серы (и других летучих веществ), возникающие в процессах испарения–конденсации, значительны и полностью перекрывают диапазон наблюдаемых изотопных смещений в природной сере [31]. Это делает использование изотопного состава серы некорректным в генетических реконструкциях, выполненных без учета этих смещений.

Полное отнесение всех фрагментов, содержащих Si, O, Fe, K, Al, и Ti, к ксеногенным включениям выглядит искусственным и фактически блокирует реконструкции эпитепимального петрогенеза для вулкана Ластаррия. Наличие алунита и каолинита, сингенетичных серному расплаву и состоящих из перечисленных элементов, характерно для *TP*-условий сосуществования серного расплава с водным конденсатом (рис. 7 а, область II). Включения алунита присутствуют, например, в фумарольной сере в окрестностях кратерных озер вулка-

на Эбеко [32]. Это маловероятно для вулкана Ластаррия при отсутствии вулканических озер и обводненных горизонтов. Однако сульфидизация серного расплава с образованием преимущественно сульфидов железа, образование сингенетичных серному конденсату включений геля кремниевой кислоты (SiO_2) и диоксида титана обычны и встречаются как в подводных [17], так и в наземных [25]* отложениях серы. В результатах [16] нет сведений о раскристаллизации и самоочищении самородной серы. Стехиометрия сульфидов мышьяка не изучалась. Фазы, содержащие мышьяк, отнесены к реальгару и аурипигменту предположительно.

Происхождение расплавленной серы на вулкане Ластаррия, по мнению М. Иностранца с соавторами [16], объясняется усиленной конденсацией серы из-за фумарольных газов, обогащенных SO_2 и H_2S , а также с изменением проницаемости фумарольных каналов. Исследователи считают, что изменение проницаемости объясняет, почему расплавленная сера наблюдалась только в определенной области фумарольного поля. Хотя в исследовании [16] большое внимание уделено физическим свойствам серы, парциальное давление ее насыщенных паров в анализе условий образования серного расплава не учитывается. Данные об экстремальной вязкости полимерной серы при 187 °C и повышении текучести серы при более низких температурах авторам известны, но авторы не используют эти данные в анализе и выводах о происхождении серных потоков.

Заключение

Серный расплав для излияний 1979 г. сформировался на продолжении юго-восточного участка Центрального Восточного термального поля под юго-восточным отрогом Центрального Восточного купола. Мощность пород, перекрывающих зону конденсации серы, составила ~30 м. *TP*-условия образования серного расплава – 175–251 °C, 0.9–4.1 МПа. Накопление серного расплава обусловлено газовой

* Малышев А.И., Малышева Л.К. 2026. Вода в эндогенном пороодо- и рудообразовании: вулкан Головинина. *Литосфера* (принята к печати).

активностью и высокой вязкостью полимерной серы. При охлаждении расплава до 159 °С минимальная вязкость расплава сделала возможным его просачивание по наслоениям обвального-пирокластического материала купольной мантии в сторону озера Горячее.

Образование серного расплава происходило под влиянием охлаждающего водного горизонта с сингенетичным образованием микровключений кремнезема (гель кремниевой кислоты → силикагель → опал), алюмо-натрокалиевых квасцов (алунита), диоксида титана и сульфидов железа и цинка. При просачивании расплава к месту излияния и при излиянии расплав обогатился ксеногенными микровключениями вулканических пород и песчано-пемзовым материалом. Результирующий минеральный состав и структура лавы окончательно сформировались на месте излияния под воздействием неравномерного остывания, активного газоотделения, гравитационной дифференциации и самоочищения серы при ее кристаллизации. Песчано-пемзовые включения подверглись значительным изменениям. Поры таких включений полностью заполнены серным расплавом и сопутствующими ему микровключениями, а сами включения содержат признаки привноса кремнезема, особенно частые для песчаных включений в верхнем слое лавы. Под воздействием гравитационной дифференциации сформировался подошвенный слой, обогащенный тяжелыми сульфидами и песчаными включениями. Самоочищение серы при ее раскристаллизации способствовало концентрации микровключений и образованию в межкристаллическом пространстве сульфидного коллоидного субстрата, на основе которого происходило дорастание сульфидных кристаллов и агрегатов и образование новых центров кристаллизации. В центральном слое коричневой серы распространены пленочные выделения ранее неизвестного природного гексасульфида мышьяка, образующегося вследствие самоочищения мышьяковистой серы при ее раскристаллизации.

Результаты исследований показывают, что изучение вещества серных лав имеет большое

значение для понимания геохимической эволюции литосферы в эпитермальном диапазоне температур и не менее важно, чем исследования магматических пород для более высокотемпературных условий.

Список литературы

1. Мархинин Е.К. О состоянии вулканов острова Кунашир (март 1974 – май 1982 г.). *Вулканология и сейсмология*. 1983,1:43–51.
2. Watanabe T. Eruptions of molten sulphur from the Siretoko-Iosan volcano, Hokkaido, Japan. *Japanese Journal of Geology and Geography*. 1940,17(3–4):289–310.
3. Luke J. History in White Island. *Department of Scientific and Industrial Research Bulletin*. 1950,127:14–24.
4. Кирсанов И.Т., Серафимова Е.К., Сидоров С.С., Трубенко В.Ф., Фарберов А.И., Федорченко В.И., Шилов В.Н. Извержение вулкана Эбеко в марте-апреле 1963 г. *Бюллетень вулканологических станций*. 1964,36:66–72.
5. Skinner B.J. A sulfur lava flow on Mauna Loa. *Pacific Science*. 1970,24(1–4):144–145.
6. Colony W.E., Nordlie B.E. Liquid sulfur at volcano Azufre. Galapagos islands. *Economic Geology*. 1973,68(3):371–380.
7. Naranjo J.A. Sulphur flows at Lastarria volcano in the North Chilean Andes. *Nature*. 1985,313:778–780.
8. White D.E., Hutchinson R.A., Keith T.E.C. *The geology and remarkable thermal activity of Norris Geyser Basin, Yellowstone National Park, Wyoming*. Washington: 1988, p. 42–44.
9. Imai A., Geshi N. Spinifex texture of native sulfur: a cooling product of sulfur flow eruptions at Shiretoko-Iwosan volcano, Hokkaido, Japan. *Resource Geology*. 1999,49(2):99–104.
10. Harris A.J.L., Sherman S.B., Wright R. Discovery of self-combusting volcanic sulfur flows. *Geology*. 2000,28:415–418.
11. Mora-Amador R., Ramírez C. Sulfur flows at Poás volcano, Costa Rica. In: *Abstract Book: General assembly IAVCEI, Reykjavik (Iceland), 2008*. 2008, p. 85.
12. Masubuchi Y. Field occurrence and petrological characteristics of sulfur lava flow formed in May 2010 in Jigokudani, Tateyama volcano. *Volcanological Society Japan 2012 Fall Meeting*. 2012. https://doi.org/10.18940/vsj.2012.0_153.
13. González G., Mora-Amador R., Ramírez C., Rouwet D., Alpizar Y., Picado C., Mora R. Historic activity and hazard analysis of Turrialba volcano, Costa Rica.

- Revista Geologica América Central*. 2015,52:129–149. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i52.19033>
14. Mora Amador R.A., Rouwet D., Vargas P., Oppenheimer C. The Extraordinary Sulfur Volcanism of Poás from 1828 to 2018. In: Tassi, F., Vaselli, O., Mora Amador, R. (eds) *Poás Volcano. Series Active Volcanoes of the World*. Cham: Springer, 2019, p. 45–78. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02156-0_3
 15. Власов Г.М. (ред.). *Вулканические серные месторождения и некоторые проблемы гидротермального рудообразования*. М.: Наука, 1971, 360 с.
 16. Inostroza M., Fernandez B., Aguilera F., Layana S., Walter T.R., Zimmer M., Rodríguez-Díaz A., Oelze M. Physical and chemical characteristics of active sulfur flows observed at Lastarria volcano (northern Chile) in January 2019. *Frontier Earth Science*. 2023,11:1197363. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1197363>
 17. Malyshev A., Malysheva L. Sulfur melt in Golovnin Caldera, Kunashir Island, Russia. *Journal Volcanology and Geothermal Research*. 2023,443:107933. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107933>
 18. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д., Литасова С.Н. Возраст действующих вулканов Курило-Камчатского региона. *Вулканоология и сейсмология*. 1994,4–5:5–32.
 19. Горшков Г.С. *Вулканизм Курильской островной дуги*. М.: Наука, 1967, 288 с. http://repo.kscnet.ru/156/1/Gorshkov_1967.pdf
 20. Козлов Д.Н., Жарков Р.В. Морфология и генезис озер кальдерных комплексов Головнина и Заварицкого (Курильские острова). *Вестник ДВО РАН*. 2010,3:103–106.
 21. Kozlov D.N., Lebedeva E.V. Morphology of crater and caldera lakes in the Far Eastern region of Russia and the features of their development. *Journal of Mountain Science*. 2024,21(4):1246–1258. <https://doi.org/10.1007/s11629-023-8253-9>
 22. Козлов Д.Н., Жарков Р.В. Новые данные о морфологии котловины озера Кипящее (вулкан Головнина, о. Кунашир, Курильские о-ва): по результатам работ 2023 г. *Геосистемы переходных зон*. 2025,9(2):213–220. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.2.213-220>; <https://www.elibrary.ru/kqsgqa>
 23. Kalacheva E.G., Taran Y.A., Voloshina E.V., Inguaggiato S. Hydrothermal system and acid lakes of Golovnin caldera, Kunashir, Kuril islands: geochemistry, solute fluxes and heat output. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2017,346:10–20. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.001>
 24. Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Волошина Е.В., Тарасов К.В., Мельников Д.В., Котенко Т.А., Эрдниева Д.Ю. Кратерное озеро Кипящее в кальдере вулкана Головнина: геохимия воды и газов, вынос магматических летучих (о. Кунашир). *Вулканоология и сейсмология*. 2023,1:3–20.
 25. Малышев А.И., Малышева Л.К. Рудная сера вулкана Головнина, о-в Кунашир. *Литосфера*. 2024,24(5):886–910. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-5-886-910>
 26. Жарков Р.В. *Термальные источники Южных Курильских островов*. Владивосток: Дальнаука, 2014, 378 с.
 27. Belousov A., Belousova M., Kozlov D. Strong hydrothermal eruption 600 BP inside Golovnin Caldera, Kunashir Island, Kurile arc. In: *19th EGU General Assembly, EGU 2017: Proceedings from the conference held 23–28 April 2017, Vienna, Austria*. 2017:7596.
 28. Малышев А.И., Малышева Л.К. Серный расплав на дне оз. Кипящее, кальдера Головнина, о-в Кунашир. В кн.: *Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы XXIX ежегодной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 30 марта - 4 апреля 2026 г.* Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2026, 263–266 с.
 29. Rickard D.T. *Framboids*. Verlad: Oxford University Press, 2021, 360 p.
 30. Малышев А.И., Малышева Л.К. Водно-осажденная сера вулканов Головнина и Менделеева (остров Кунашир, Южные Курильские острова, Россия). *Геосистемы переходных зон*. 2025,9(4):452–477. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.452-477>
 31. Malyshev A., Malysheva L. Sulfur in ore formation. *Ore Geology Reviews*. 2022,150:105199. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105199>
 32. Shevko, E.P., Bortnikova, S.B., Abrosimova, N.A., Kamenetsky V.S., Bortnikova S.P., Panin G.L., Zelenski M. Trace elements and minerals in fumarolic sulfur: the case of Ebeko volcano, Kuriles. *Geofluids*. 2018,2018:4586363. <https://doi.org/10.1155/2018/4586363>

References

1. Markhinin E.K. [On the state of the volcanoes of Kunashir Island (March 1974 – May 1982)]. *Volcanology & Seismology*. 1983,1:43–51. (In Russ.).
2. Watanabe T. Eruptions of molten sulphursulphur from the Siretoko-Iosan volcano, Hokkaido, Japan. *Japanese Journal of Geology and Geography*. 1940,17(3–4):289–310.
3. Luke J. History in White Island. *Department of Scientific and Industrial Research Bulletin*. 1950,127: 14–24.
4. Kirsanov I.T., Serafimova E.K., Sidorov S.S., Trubenko V.F., Farberov A.I., Fedorchenko V.I., Shilov V.N. The eruption of Ebeko volcano in March-April, 1963.

- Bulletin Volcanologicheskikh Stantsiy.* 1964,36:66–72. (In Russ.).
5. Skinner B.J. A sulfur lava flow on Mauna Loa. *Pacific Science.* 1970,24(1–4):144–145.
 6. Colony W.E., Nordlie B.E. Liquid sulfur at volcano Azufre. *Galapagos islands. Economic Geology.* 1973,68(3):371–380.
 7. Naranjo J.A. Sulphur flows at Lastarria volcano in the North Chilean Andes. *Nature.* 1985,313:778–780.
 8. White D.E., Hutchinson R.A., Keith T.E.C. *The geology and remarkable thermal activity of Norris Geyser Basin, Yellowstone National Park, Wyoming.* Washington, 1988, p. 42–44.
 9. Imai A., Geshi N. Spinifex texture of native sulfur: a cooling product of sulfur flow eruptions at Shiretoko-Iwosan volcano, Hokkaido, Japan. *Resource Geology.* 1999,49(2):99–104.
 10. Harris A.J.L., Sherman S.B., Wright R. Discovery of self-combusting volcanic sulfur flows. *Geology.* 2000,28:415–418.
 11. Mora-Amador R., Ramírez C. Sulfur flows at Poás volcano, Costa Rica. In: *Abstract Book: General assembly IAVCEI, Reykjavik (Iceland), 2008.* 2008, p. 85.
 12. Masubuchi Y. Field occurrence and petrological characteristics of sulfur lava flow formed in may 2010 in Jigokudani, Tateyama volcano. *Volcanological Society Japan 2012 Fall Meeting.* 2012. https://doi.org/10.18940/vsj.2012.0_153.
 13. González G., Mora-Amador R., Ramírez C., Rouwet D., Alpizar Y., Picado C., Mora R. Historic activity and hazard analysis of Turrialba volcano, Costa Rica. *Revista Geologica América Central.* 2015,52:129–149. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i52.19033>
 14. Mora Amador R.A., Rouwet D., Vargas P., Oppenheimer C. The Extraordinary Sulfur Volcanism of Poás from 1828 to 2018. In: Tassi, F., Vaselli, O., Mora Amador, R. (eds) *Poás Volcano. Series Active Volcanoes of the World.* Cham: Springer, 2019, p. 45–78. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02156-0_3
 15. Vlasov G.M. (ed.). [*Volcanic sulfur deposits and some problems of hydrothermal ore formation*]. Moscow: Nauka, 1971, 360 p. (In Russ.).
 16. Inostroza M., Fernandez B., Aguilera F., Layana S., Walter T.R., Zimmer M., Rodríguez-Díaz A., Oelze M. Physical and chemical characteristics of active sulfur flows observed at Lastarria volcano (northern Chile) in January 2019. *Frontiers Earth Science.* 2023,11:1197363. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1197363>
 17. Malyshev A., Malysheva L. Sulfur melt in Golovnin Caldera, Kunashir Island, Russia. *Journal Volcanology and Geothermal Research.* 2023,443:107933. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107933>
 18. Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomoreva V.V., Sulerzhitsky L.D., Litasova S.N. [The ages of active volcanoes of the Kuril-Kamchatka region]. *Volcanology & Seismology.* 1994,4-5:5–32. (In Russ.).
 19. Gorshkov G.S. [*Volcanism of the Kuril island arc*]. Moscow: Nauka, 1967, 288 p. (In Russ.). http://repo.kscnet.ru/156/1/Gorshkov_1967.pdf (accessed 15.10.2023).
 20. Kozlov D.N., Zharkov R.V. [Morphology and Genesis of Lakes in the Caldera Complexes of Golovnin and Zavaritsky (Kuril Islands)]. *Vestnik of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.* 2010,3:103–106. (In Russ.).
 21. Kozlov D.N., Lebedeva E.V. Morphology of crater and caldera lakes in the Far Eastern region of Russia and the features of their development. *Journal of Mountain Science.* 2024,21(4):1246–1258. <https://doi.org/10.1007/s11629-023-8253-9>
 22. Kozlov D.N., Zharkov R.V. [New data on the morphology of the basin of Kipyayushcheye lake (Golovnin volcano, Kunashir island, Kuril islands): based on the results of studies carried out in 2023]. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones.* 2025,9(2):213–220. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.2.213-220>
 23. Kalacheva E.G., Taran Y.A., Voloshina E.V., Inguaggiato S. Hydrothermal system and acid lakes of Golovnin caldera, Kunashir, Kuril islands: geochemistry, solute fluxes and heat output. *Journal Volcanology Geothermal Research.* 2017,346:10–20. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.001>
 24. Kalacheva E.G., Taran Y.A., Voloshina E.V., Tarasov K.V., Melnikov D.V., Kotenko T.A., Erdnieva D.M. Crater lake Kipyashchee in the caldera of Golovnin volcano: water and gas geochemistry, output of magmatic volatiles (Kunashir island). *Journal of Volcanology and Seismology.* 2023,17:1–16. <https://doi.org/10.1134/S0742046322700063>
 25. Malyshev A.I., Malysheva L.K. [Ore sulfur of Golovnin Volcano, Kunashir island]. *Lithosphere.* 2024,24(5):886–910. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-5-886-910>
 26. Zharkov R.V. [*Thermal springs of the Southern Kuril Islands*]. Vladivostok: Dalnauka Publ., 2014, 378 p. (In Russ.).
 27. Belousov A., Belousova M., Kozlov D. 2017. Strong hydrothermal eruption 600 BP inside Golovnin Caldera, Kunashir Island, Kurile arc. In: *19th EGU General Assembly, EGU 2017: Proceedings from the conference held 23–28 April 2017, Vienna, Austria.* 2017:7596.
 28. Malyshev A.I., Malysheva L.K. [Sulfur melt at the bottom of Kipyashcheye lake, Golovnin caldera, Kunashir island]. In: *Volcanism and related processes: Proceedings of the XXIX Annual Scientific Conference dedicated to Volcanologists Day, Petropavlovsk-Kamchatsky, March 30 - April 4, 2026.* Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS FEB RAS, 2026, p. 263–266. (In Russ.).

29. Rickard D.T. *Framboids*. Verlad: Oxford University Press, 2021, 360 p.
30. Malyshev A.I., Malysheva L.K. Water-deposited sulfur of Golovnin and Mendelev volcanoes (Kunashir island, Southern Kuril islands, Russia). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*. 2025,9(4):24. <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2025-4-9.pdf>; <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.452-477>
31. Malyshev A., Malysheva L. Sulfur in ore formation. *Ore Geology Reviews*. 2022,150:105199. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105199>
32. Shevko E.P., Bortnikova S.B., Abrosimova N.A., Kamenetsky V.S., Bortnikova S.P., Panin G.L., Zelenski M. Trace elements and minerals in fumarolic sulfur: the case of Ebeko volcano, Kuriles. *Geofluids*. 2018,2018:4586363. <https://doi.org/10.1155/2018/4586363>

Об авторах

✉ **Малышев Александр Иванович**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатории палеовулканизма и региональной геодинамики, Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН (ИГГ УрО РАН), Екатеринбург, Россия, malyshev@igg.uran.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4306-8000>

Малышева Лидия Константиновна, научный сотрудник, лаборатории палеовулканизма и региональной геодинамики, Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН (ИГГ УрО РАН), Екатеринбург, Россия, malysheva@igg.uran.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2784-2182>

About the Authors

✉ **Malyshev, Aleksandr I.**, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Lead Researcher, Laboratory of Paleovolcanism and Regional Geodynamics, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, malyshev@igg.uran.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4306-8000>

Malysheva, Lidiia K., Researcher, Laboratory of Paleovolcanism and Regional Geodynamics, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, malysheva@igg.uran.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2784-2182>

Поступила 14.07.2026

Принята к публикации 19.08.2026

Received 14 July 2026

Accepted 19 August 2026

© Авторы, 2026 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2026.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.461.2

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.3.289-298>
<https://www.elibrary.ru/jwkvrm>

Пространственно-временная изменчивость колебаний уровня океана по данным IMMOAD SSHA после дополнительной коррекции приливной составляющей

Г. В. Шевченко^{1,2}, Ж. Р. Цхай¹

¹ Сахалинский филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» («СахНИРО»), Южно-Сахалинск, Россия

² Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. Выполнен анализ сезонной и межгодовой изменчивости колебаний уровня моря в северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морях с применением разложения исходных рядов данных по методу естественных ортогональных функций. Работа основана на массиве материалов альтиметрических наблюдений IMMOAD SSHA за 1993–2021 гг., в котором была проведена дополнительная коррекция приливов и ежемесячное усреднение данных в каждой точке подспутниковых треков. Показано, что первые три моды разложения имеют схожую пространственную структуру с противофазным характером изменений уровня в северной (побережье Берингова и Охотского морей) и южной (зона влияния теплого течения Куросио) частях изучаемой акватории. В вариациях временной функции первой моды доминирует годовой ход с максимумом осенью и минимумом весной, во второй он также преобладает (максимум зимой и минимум летом), но присутствуют более слабые колебания с периодами 10–11 лет и 21–22 года. Третья мода характеризует межгодовые вариации с периодом 10–11 лет, коррелирующие с изменчивостью индекса PDO. Четвертая составляющая описывает сложные процессы в зоне влияния течения Куросио.

Ключевые слова: альтиметрия, естественные ортогональные функции, спектрально-временной анализ, северо-западная часть Тихого океана, Охотское море, Берингово море, течение Куросио

Spatiotemporal variability of sea level fluctuations according to IMMOAD SSHA data after additional correction of the tidal component

G. V. Shevchenko^{1,2}, Zh. R. Tskhai¹

¹ Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (SakhNIRO), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

² Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. Seasonal and interannual variability of sea level fluctuations in the northwestern Pacific Ocean and the Far Eastern seas was analyzed using the empirical orthogonal function decomposition of the original data series. The study is based on a data set of altimetric observations from the IMMOAD SSHA for the period 1993–2021, which included additional tidal correction and monthly averaging of data at each point along the satellite tracks. It was shown that the first three modes of decomposition have a similar spatial structure with opposite patterns of sea-level variations in the northern (the coast of the Bering and Okhotsk Seas) and southern (the zone influenced by the warm Kuroshio Current) regions. The variations in the temporal function of the first mode are dominated by an annual cycle, with a maximum in autumn and a minimum in spring. While this pattern is also dominant in the second mode (with maximum in winter and minimum in summer), there are weaker oscillations with periods of 10–11 and 21–22 years as well. The third mode characterizes interannual variations with a period of 10–11 years, which are correlated with the variability of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) index. The fourth mode describes complex processes in the area influenced by the Kuroshio Current.

Keywords: altimetry, empirical orthogonal functions, spectral-temporal analysis, Northwest Pacific Ocean, Sea of Okhotsk, Bering Sea, Kuroshio Current

Финансирование и благодарности

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания ФГБНУ «ВНИРО» (№ 076-00002-26-00) и при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-61-00025).

Авторы выражают благодарность д.т.н. Романову А. А. (АО «ЦНИИМАШ», г. Королев) за помощь в формировании информационной базы исследования.

Funding and Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Federal State Budgetary Scientific Institute “VNIRO” (No. 076-00002-26-00) and with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 24-61-00025).

The authors thank the respected Dr. A. A. Romanov (TsNIMASH JSC, Korolyov) for his assistance in compiling the research database.

Для цитирования: Шевченко Г.В., Цхай Ж.Р. Пространственно-временная изменчивость колебаний уровня океана по данным IMMOAD SSHA после дополнительной коррекции приливной составляющей. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 3, с. 289–298. <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.3.289-298>; <https://www.elibrary.ru/jwkvrm>

For citation: Shevchenko G.V., Tskhay Zh.R. Spatiotemporal variability of sea level fluctuations according to IMMOAD SSHA data after additional correction of the tidal component. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 3, p. 289–298. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.3.289-298>; <https://www.elibrary.ru/jwkvrm>

Введение

Сезонные и межгодовые вариации уровня моря традиционно привлекают интерес многих специалистов, так как они отражают сложные процессы, протекающие в океане, в частности, изменения циркуляции его вод. Для их изучения широко используются данные спутниковой альтиметрии, подобные исследования были проведены как для северо-западной части Тихого океана [1], так и для его тропической зоны [2]. В то же время с использованием этих материалов имеются некоторые проблемы.

В работе [3] было выявлено, что в массиве аномалий уровня моря, сформированного на основе альтиметрических наблюдений с группы искусственных спутников Земли, осуществивших полеты начиная с 1993 года по одним и тем же орбитам и именуемом Integrated Multi-Mission Ocean Altimeter Datasets Sea Surface Anomalies (IMMOAD SSHA, далее SSHA), имеется остаточное влияние приливной компоненты. Данная особенность была обнаружена в северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морях, но присуща, вероятно, всему Мировому океану. Это влияние выражалось в том, что при расчете амплитуд главных приливных волн были получены значения в несколько см, не только в прибрежных районах Дальнего Востока России, но так-

же и в открытом океане, несмотря на то, что из этих материалов приливная компонента уже была ранее удалена [4, 5]. Это обстоятельство не позволяет с доверием относиться к утверждению создателей массива о том, что погрешность данных SSHA составляет около 2 см для прибрежных акваторий и менее 1 см для удаленных от берега районов, учитывая важную роль этих материалов для создания различных продуктов (META, GLORYS и т.д.), широко применяемых в океанологических исследованиях, в том числе для изучения динамических процессов в северо-западной части Тихого океана (далее СЗТО) [6, 7], включая сезонные вариации [8, 9], волны Россби [10, 11] и мезомасштабные вихревые образования [12]. Кроме того, данные спутниковой альтиметрии можно использовать для мониторинга антициклонических рингов, расположение которых может оказать влияние на места скопления пелагических видов рыб, например, сайры [13].

В результате дополнительной фильтрации остаточного прилива (присутствующего в массиве SSHA) был получен набор данных, в котором вклад приливной компоненты является действительно незначительным. В работах [14–16] исследовалась пространственная структура непериодических вариаций уровня моря в изучаемой области, в том числе при помощи построения автокорреляционных

функций. Было показано, что усредненные за многолетний период пространственные распределения аномалий уровня поверхности с учетом дополнительной коррекции существенно отличаются от полученных без ее включения. Поэтому представлялось важным исследовать полученный очищенный от прилива массив данных с применением одного из наиболее распространенных при анализе спутниковых данных методов пространственно-временного анализа – разложения по естественным ортогональным функциям (далее ЕОФ) [17]. Структура пространственных и временных функций обычно имеет выраженный физический смысл и характеризует важные процессы, происходящие в регионе.

Как отмечалось в работах [15-16], построение автокорреляционных функций может быть успешным подходом при заполнении пропусков в данных, возникающих, в частности, из-за наличия ледяного покрова в прибрежных акваториях Дальнего Востока. Для решения подобных задач метод ЕОФ является весьма эффективным инструментом, нашедшим широкое применение при анализе последовательности гидрометеорологических полей [17]. Данный подход требует регулярных

по времени данных, поэтому в массиве SSHA было выполнено помесечное усреднение. Указанная процедура позволила получить набор данных с эквидистантными отсчетами по времени без пропусков в каждой пространственной ячейке области. Эта методика несколько осложняет процедуру восстановления данных, однако эта проблема может быть решена путем интерполяции временных функций нескольких основных мод разложения по ЕОФ. Исследование пространственно-временной изменчивости колебаний уровня моря путем изучения особенностей пространственной структуры и характера вариаций временных функций (сезонных и межгодовых) основных мод представляет значительный физический интерес и является главной целью данной работы.

Материалы измерений и методы исследования

Исходными материалами для данной работы послужил массив IMMOAD SSHA за 1993–2021 гг. с учетом дополнительной фильтрации приливов, выполненной в работе [3]. Положение подспутниковых треков приведено на рис. 1. Для получения регулярных

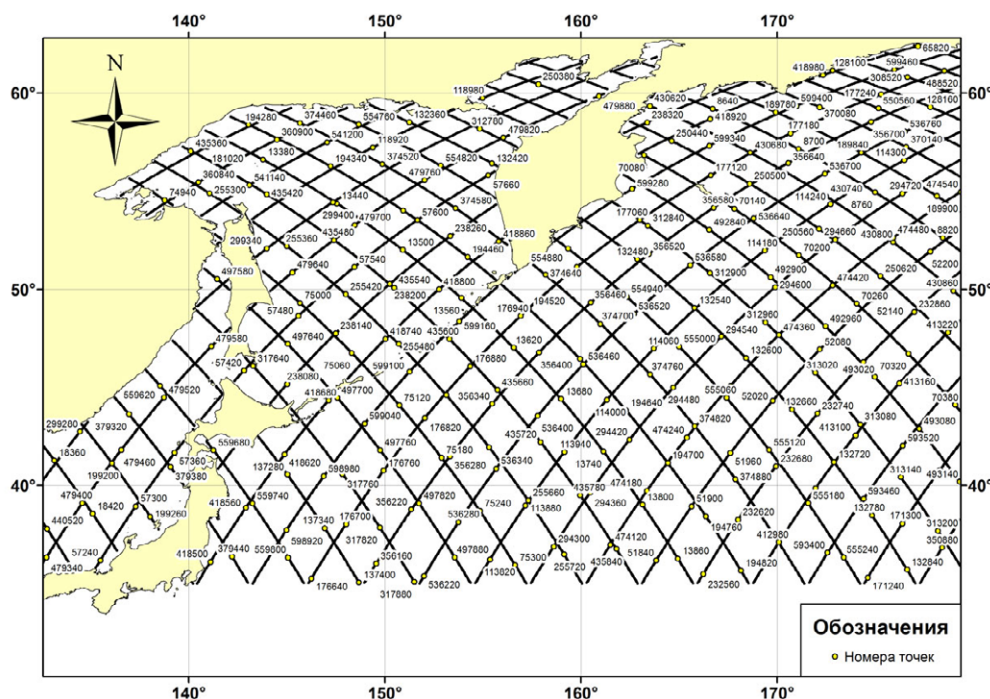


Рис. 1. Схема подспутниковых треков, в точках которых была сформирована база данных SSHA.

Fig. 1. Diagram of the subsatellite tracks on which the SSHA database was formed.

по времени данных на этой пространственной решетке остаточные ряды были усреднены помесечно. Это позволило применить к ним метод естественных ортогональных функций [17]. Рассматривались 4 старшие моды разложения массива по ЕОФ, на которые приходилось 31.2, 5.1, 3.4 и 3.1% общей дисперсии соответственно. Для анализа структуры временных функций этих мод применялись методы статистического, спектрального и спектрально-временного (Вэйвлет) анализа. Расчет спектрально-временных или СВАН-диаграмм [18] производился в диапазоне частот от 2 до 0.03 цикл/год (период от полугода до 30 лет), изолинии проводились через 1 децибел.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены пространственные распределения четырех первых мод разложения массива SSHA по ЕОФ (полагались безразмерными), а на рис. 3 – их временные

функции (в см). Распределение первой моды (на нее приходится около 31.2% общей дисперсии неперiodических вариаций уровня моря) характеризовалось положительными значениями на большей части изучаемой акватории с максимальными величинами (до 15) на южной границе области к востоку от о. Хонсю. Значения моды плавно убывают в северном направлении и принимают отрицательные значения (до -1) на северном шельфе Охотского моря, у юго-западного и восточного побережья Камчатки, вдоль западного берега Берингова моря.

Временная функция основной составляющей характеризуется выраженным годовым ходом и наличием линейного тренда с коэффициентом около 0.07 см/год (на рис. 3 скорость тренда дана в см/мес). Это существенно меньше известных оценок скорости роста уровня Мирового океана по альтиметрическим данным, составляющих около 0.3 см/год [19], причина таких различий неясна. Возможно, она связана

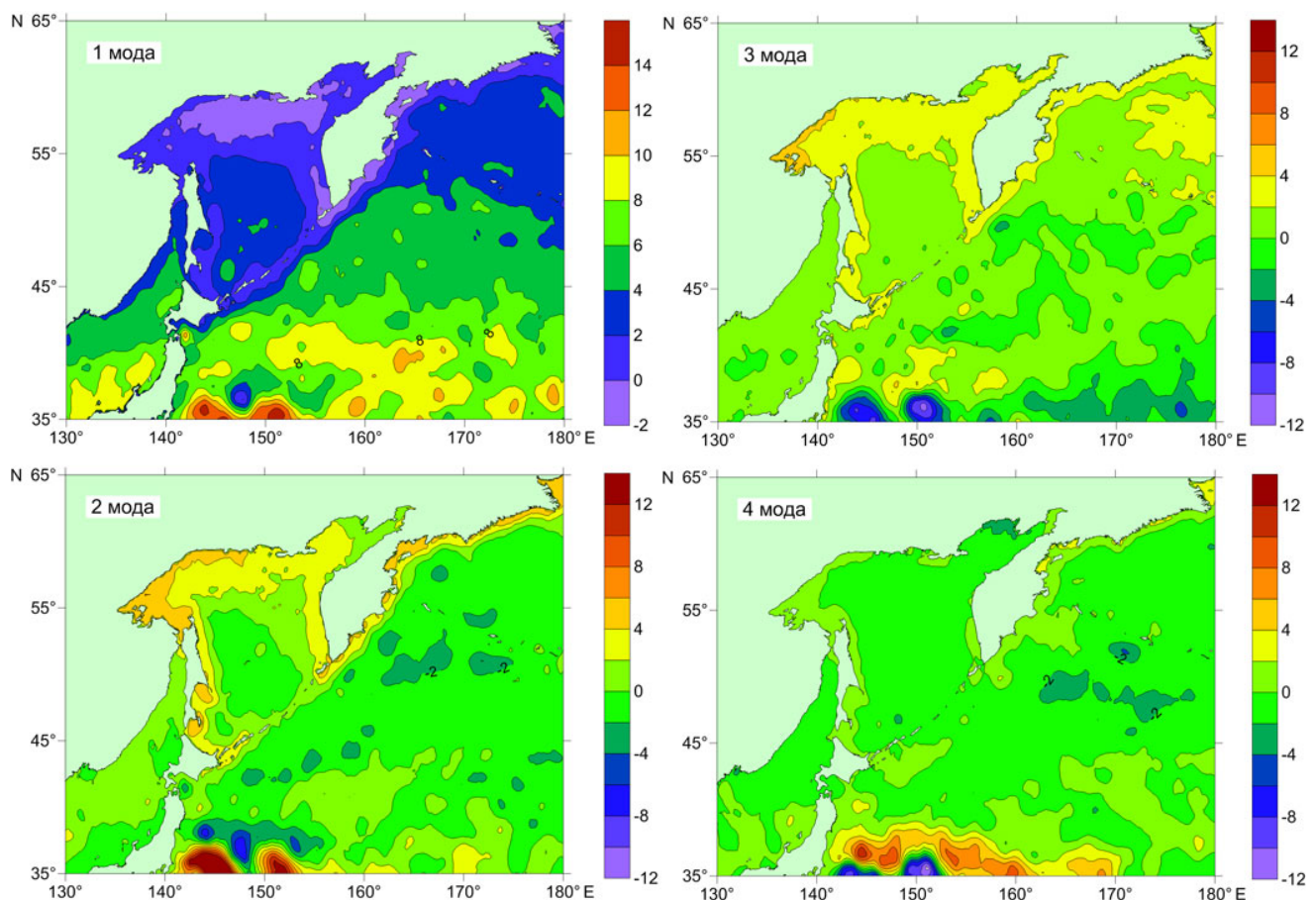


Рис. 2. Пространственные распределения четырех первых мод разложения массива SSHA по ЕОФ (безразмерные).

Fig. 2. Spatial distributions of the first four modes of EOF decomposition of the SSHA dataset (dimensionless).

с более низкой скоростью роста температуры поверхности океана на значительной части изучаемой акватории (Охотское море, северная часть Японского моря, акватория, прилегающая к центральному и северному участкам Курильской гряды). В сезонных вариациях явно доминирует годовая гармоника с амплитудой

1.1 см и фазой 250° , что отвечает максимальным значениям функции в сентябре. Роль полугодовой гармоник существенно меньше, ее амплитуда составляет 0.2 см. Значения амплитуды годовой волны весьма устойчивы, в различные годы они колебались в весьма узких пределах, от 0.9 до 1.2 см. Усредненная кривая годового хода имеет минимум в феврале-марте (-0.96 и -0.93 см соответственно) и максимум в сентябре-октябре (1.14 и 1.21 см). Несколько меньшие, но существенные значения (по абсолютной величине) принимала временная функция в январе и апреле, а также в августе и ноябре.

Отрицательные значения функции зимой и в начале весны отвечают формированию высоких значений уровня вдоль побережья Охотского и Берингова морей, связанных с интенсификацией циклонической циркуляции в этих бассейнах. При этом в зоне течения Куро-сио, ослабленного в этот период, наблюдаются самые низкие значения уровня [14]. Положительные величины летом и осенью соответствуют высоким значениям уровня в зоне в период высокой активности теплых течений Куро-сио и Цусимского. Летом вдоль побережья западного берега Берингова моря и практически всего побережья Охотского моря уровень низкий по причине изменения характера циркуляции, а осенью из-за сгонного действия ветров северо-западного и северного румбов, обусловленных осенне-зимним муссоном.

Можно сказать, что первая мода характеризует главным образом противофазные изменения уровня и связанной с ним циркуляции вод весной и осенью, и в меньшей степени процессы, происходящие зимой и летом.

Пространственное распределение второй моды, на которую приходится 5.1% общей дисперсии параметра, характеризуется высокими значениями (около 5) вдоль всего северо-восточного побережья Азии от Берингова пролива до южной оконечности полуострова Камчатка и северных Курильских островов, а также у берегов Охотского моря (от 4 до 5) за исключением центральной части Курильской островной гряды. На большей части акватории

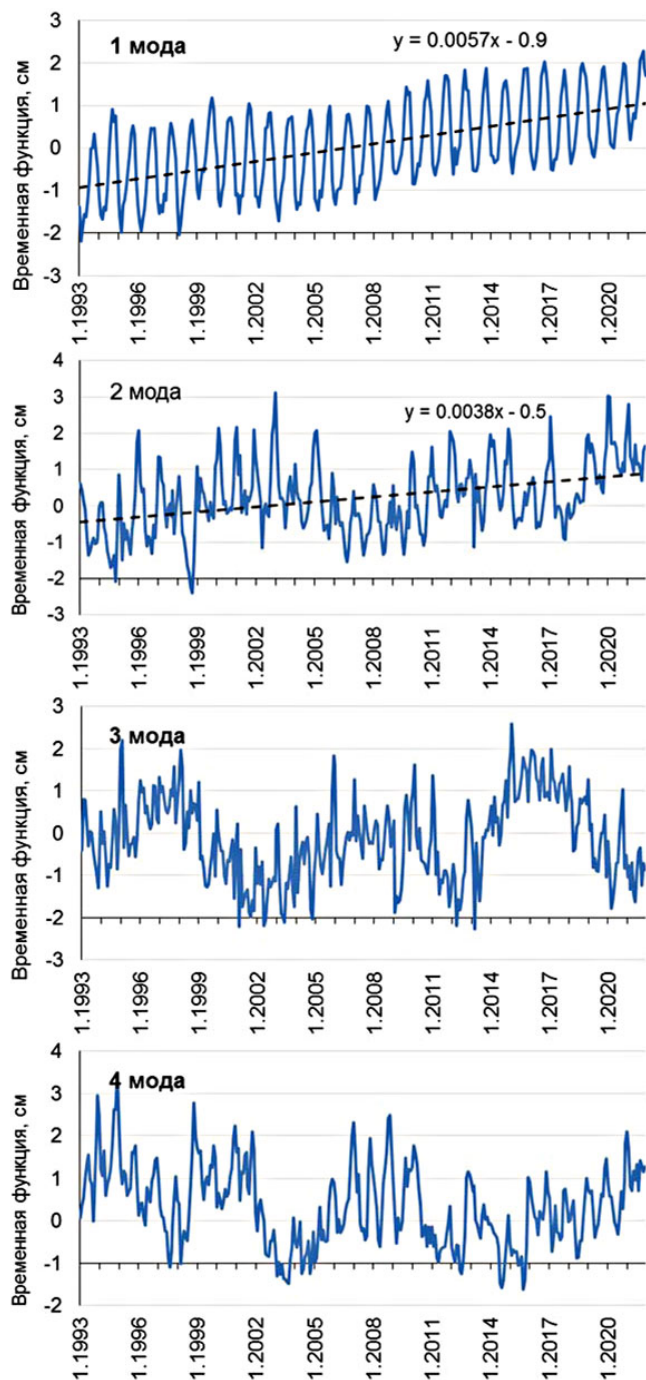


Рис. 3. Временные функции четырех первых мод разложения массива SSHA по ЕОФ (в см).

Fig. 3. Time functions of the first four modes of the EOF decomposition of the SSHA dataset (in cm).

СЗТО, Берингова моря, в центре Охотского и в Японском море значения моды отрицательные, но сравнительно небольшие по модулю, от 0.5 до 1.5 (на небольших участках до 2), а у южной границы изучаемой области выделяются два пятна с высокими положительными показателями, до 14.

Временная функция этой составляющей носит сложный характер. В ней присутствует и линейный тренд, и межгодовые вариации, и годовой цикл, однако не такой стабильный, как у первой моды. Коэффициент линейного тренда положителен и также показывает невысокую скорость роста, около 0.046 см/год. Усредненная амплитуда годового хода составила 0.7 см (фаза 13°), но изменялась в широких пределах, от 0.5 до 1.3 см. Амплитуда полугодовой гармоника была существенно меньше, около 0.2 см.

Усредненная кривая годового хода характеризуется высокими значениями в зимние месяцы, 1.3 см в январе и около 0.9 см в декабре и феврале. Минимальные значения отмечены в июле и августе (-0.4 см). Такие значения пространственного распределения и временной функции моды отвечают формированию зимнего максимума уровня у побережья Берингова и Охотского морей, а также восточного побережья Камчатки, и более слабо выраженного минимума в этих районах летом. Эти особенности, отражающие усиление циклонической циркуляции в холодный период года и смену направления прибрежных потоков летом, обсуждались в работе [14]. На остальной части изучаемой акватории распределение уровня, обусловленное данной модой, можно характеризовать как довольно равномерное, несколько ниже среднего зимой и выше летом. Исключения составляют два пятна на южной границе области, к востоку от о. Хонсю, в которых отклонения уровня более существенны. Их физический смысл понять сложно, обычно они связаны с существованием малоподвижных вихревых структур. В пользу этого мнения говорит и наличие особенностей пространственного распределения динамической топографии (как усредненной, так и построенной для отдельных сезонов года), однако детально этот вопрос в данной работе не рассматривается.

Как отмечалось выше, в вариациях временной функции второй моды просматриваются и межгодовые колебания. Как показал расчет спектрально-временной диаграммы (рис. 4), помимо основного максимума на периоде 1 год, имеются спектральные полосы на периодах 10–11 лет и 21–22 года. В первой из них наблюдалось плавное возрастание спектральной амплитуды в течение периода наблюдений, значения во второй полосе более стабильны.

Пространственная структура третьей моды (3.4% дисперсии) сходна с рассмотренной выше для второй, главной особенностью которой были высокие значения у побережья Охотского и Берингова морей. Отличительной ее чертой является наличие низких значений в районе пятен, где вторая мода имела выраженные максимумы, и в целом вдоль южной границы рассматриваемой области. Если во временных функциях первых двух составляющих разложения по ЕОФ явно доминировал годовое ход, то для третьей характерной особенностью было преобладание межгодовых вариаций с периодом 10–11 лет. Наблюдается достаточно высокая корреляция этой цикличности с индексом PDO – 0.48 для месячных значений (это значимая связь, учитывая длину сравниваемых рядов в 348 отсчетов) и 0.61 для среднегодовых. Для чисел Вольфа связь отрицательная и существенно более слабая, коэффициент корреляции составил -0.4 . В свете значимой связи с тихоокеанским десятилетним колебанием, особенно удивительным фактом является то обстоятельство, что в северной и в южной частях изучаемой области вариации уровня, характеризуемые данной модой, происходят в противофазе. Если для акватории вблизи ее южной границы такая связь достаточно очевидна: повышение температуры поверхностного слоя воды в этой зоне естественно приводит к возрастанию уровня океана, то для прибрежных районов Охотского и Берингова морей влияние PDO совсем не очевидно. Возможно, оно проявляется через активизацию атмосферных процессов. Также стоит отметить более слабую спектральную полосу на периоде около 21–22 лет.

Сезонные вариации (годовые и полугодовые, средние амплитуды 0.4 и 0.3 см) также

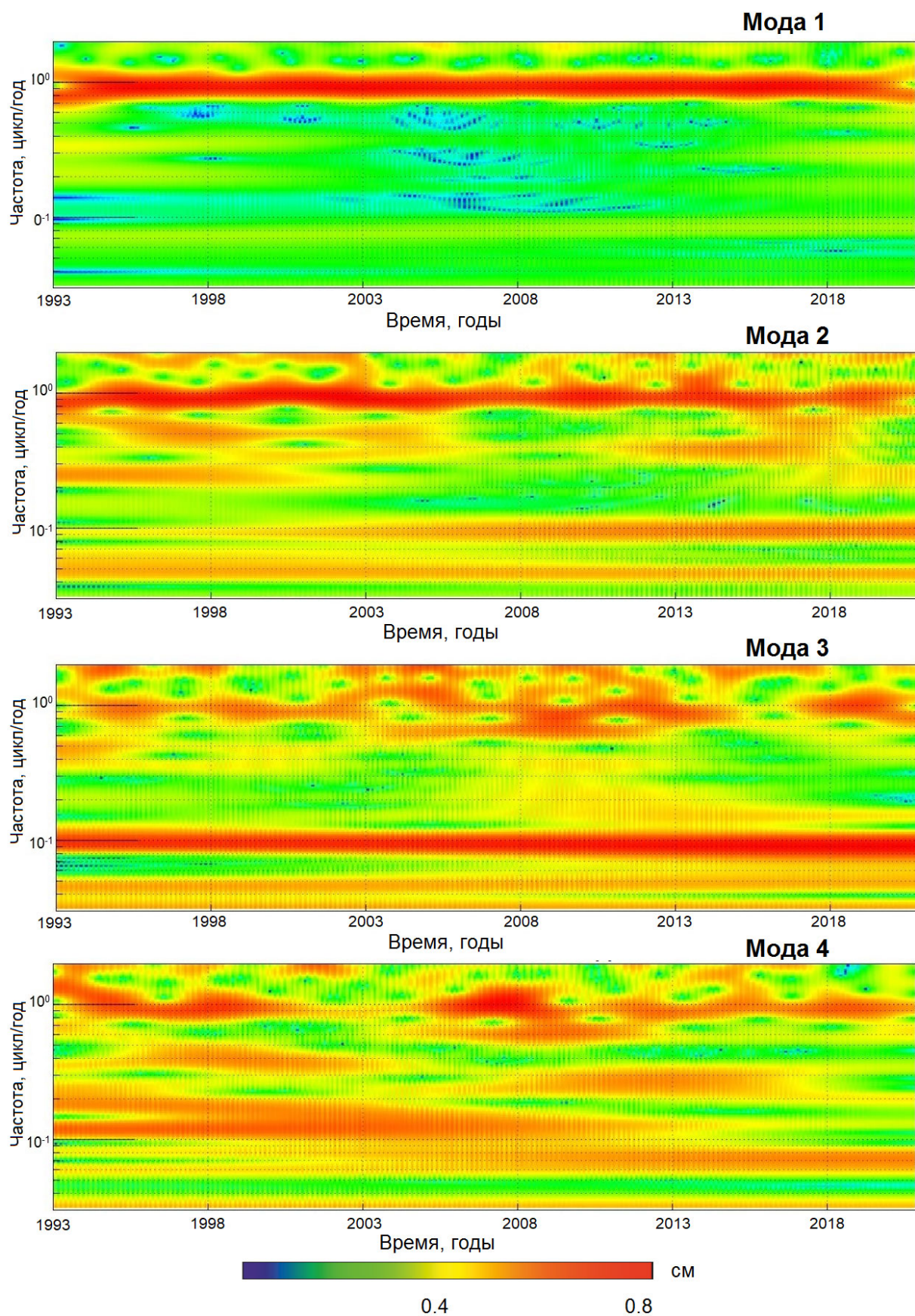


Рис. 4. Спектрально-временные диаграммы временных функций четырех первых мод разложения массива SSHA по EOF.
Fig. 4. Frequency-time diagrams of the time functions of the first four modes of EOF decomposition of the SSHA dataset.

играют определенную роль, но они присутствуют во временной функции не постоянно, а проявляются на отдельных интервалах времени.

Распределение четвертой моды (3.1%) характеризуется сравнительно небольшими по абсолютной величине отрицательными значениями ($-1 \sim -1.5$) на большей части изучаемой области. Значимые величины (преимущественно положительные, но вблизи границы отрицательные) отмечены в зоне действия теплого течения Куро-сио, к востоку от о. Хонсю. Можно сказать, что данная мода отражает главным образом проявления этого течения в межгодовых и в меньшей степени сезонных вариациях уровня океана. Интересно, что в первой половине анализируемого интервала времени преобладали колебания с периодом около 8 лет, во второй – 12 лет (рис. 3). Годовая гармоника проявлялась непостоянно, ее средняя амплитуда составила 0.5 см.

Заключение

Сезонная и межгодовая изменчивость колебаний уровня океана в СЗТО и дальневосточных морях изучена на основе массива альтиметрических данных IMMOAD SSHA за 1993–2021 гг. (дополнительно очищенного от остаточных приливных колебаний) с применением метода естественных ортогональных функций.

Выявлено, что пространственная изменчивость трех главных мод сходна и характеризуется наиболее существенными отклонениями разных знаков от средней поверхности в прибрежных районах Охотского и Берингова морей, а также в зоне теплого течения Куро-сио. Первые две описывают главным образом сезонные вариации. Первая мода определяется низкими значениями у берега вследствие действия зимнего муссона с типичными сгонными ветрами северо-западного румба и высокими значениями в южной части акватории осенью и противоположной картиной весной. Вторая (и частично первая) характеризует наиболее важную особенность сезонных вариаций уровня в изучаемой области – высокие значе-

ния уровня в отмеченных выше прибрежных областях зимой и низкие в зоне течения Куро-сио, и противофазные изменения летом. Можно сказать, что годовые вариации в изучаемой области носят характер стоячих колебаний с пучностями на ее северной и южной границах и с некоторыми проявлениями, характерными для волн Россби [10]. Однако волновые движения в краевых участках такой большой акватории определяются совершенно разными процессами, поэтому сложно интерпретировать особенности годового цикла в подобном ключе.

Третья мода отражает межгодовые колебания (с периодом 10–11 лет, коррелирующим с индексом PDO), носящие противофазный характер в северной и южной частях изучаемой области. Четвертая составляющая описывает сложные трансформации уровня в зоне влияния теплого течения Куро-сио.

Полученные пространственные распределения главных мод разложения колебаний уровня по ЕОФ и их временные функции можно использовать как для восстановления пропусков данных, которые характерны на акваториях дальневосточного побережья России, покрытых в зимний период льдом, так и для прогнозирования движения мезомасштабных вихрей при оперативном регулировании промысла пелагических видов рыб.

Список литературы

1. Liu H., Feng X., Tao A., Zhang W. Intraseasonal variability of sea level in the Western North Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2021,126(6):1–19. <https://doi.org/10.1029/2021JC017237>.
2. Wang J., Li J., Yin J., Tan W., Liu Y. Sea level seasonal, interannual and decadal variability in the tropical Pacific Ocean. *Remote Sensing*. 2021,13(19):3809. <https://doi.org/10.3390/rs13193809>
3. Шевченко Г.В., Романов А.А., Цой А.Т. О точности устранения приливной компоненты из данных спутниковой альтиметрии IMMOAD SSHA. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023,20(4):20–29. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-4-20-29>.
4. Beckley B.D., Callahan P.S., Hancock D.W. et al. On the “cal-mode” correction to TOPEX satellite altimetry and its effect on the global mean sea level time series. *Geophysical Research: Oceans*. 2017,122(12):8371–8384. <https://doi.org/10.1002/2017JC013090>.

5. Beckley B., Zelensky N.P., Holmes S.A. et al. Merged_tp_J1_ostm_ost_all_V50. Ver. 5.0. PO.DAAC, CA, USA, 2021. <https://doi.org/10.5067/ALTTS-TJA50>.
6. Белоненко Т.В., Колдунов В.В., Старицын Д.К., Фукс В.Р., Шилов И.О. *Изменчивость уровня северо-западной части Тихого океана*. СПб.: Изд-во СММО-ПРЕСС, 2009, 309 с.
7. Белоненко Т.В. Спутниковая альтиметрия северо-западной части Тихого океана. *Известия Российского гос. педагог. ун-та им. А. И. Герцена*. 2013,163:120–128. EDN: RTEPKJ
8. Белоненко Т.В., Фукс В.Р. Годовые и полугодовые возмущения уровня северо-западной части Тихого океана. *Метеорология и гидрология*. 2001,8:69–77.
9. Колдунов В.В. Межгодовые и сезонные колебания уровня северной части Тихого океана. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7*. 2007,2:142–148.
10. Белоненко Т.В., Колдунов В.В., Фукс, В.Р. Кинематика стояче-поступательных волн Россби в море и в океане. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2013,6(1):23–31. EDN: QAVBCT
11. Белоненко Т.В. Наблюдения волн Россби в северо-западной части Тихого океана. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012,9(3):209–215. EDN: PBMURUT
12. Травкин В.С., Белоненко Т.В., Кочнев А.В. Топографические волны в Курильском районе. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022,19(5):222–234. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-5-222-234>.
13. Kulik V.V., Prants S.V., Uleysky M.Y., Budyansky M.V. Lagrangian characteristics in the western North Pacific help to explain variability in Pacific saury fishery. *Fisheries Research*. 2022,252(10):106361. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2022.106361>.
14. Шевченко Г. В., Романов А. А. О значении приливной коррекции для расчёта средних поверхностей уровня моря по данным спутниковой альтиметрии IMMOAD SSHA. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023,20(6):80–91. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-6-80-91>
15. Романов А. А., Романов А. А. Отдельные свойства пространственной функции корреляции аномалий высоты морской поверхности по данным спутниковой альтиметрии в Дальневосточном регионе. *Космонавтика и ракетостроение*. 2024,3:89–97. EDN: VOMKMR
16. Романов А. А., Романов А. А., Шевченко Г. В. Определение основных параметров временной автокорреляционной функции аномалий уровня поверхности в северо-западной части Тихого океана. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2024, 21(5):36–46. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-5-36-46>
17. Багров Н.А. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих. 1959,74:3–24. (Труды ЦИП).
18. Ландер А.В., Левшин Л. П., Писаренко В.Ф., Погребинский Г.А. О спектрально-временном анализе колебаний. *Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных. Серия «Вычислительная сейсмология»*. Вып. 6. М.: Наука, 1973, с. 15–23.
19. 27-year sea level rise – TOPEX/JASON. URL: <https://svs.gsfc.nasa.gov/4853> (дата обращения 15.06.2026).

References

1. Liu H., Feng X., Tao A., Zhang W. Intraseasonal variability of sea level in the Western North Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, 126, 2021,126(6):1–19. <https://doi.org/10.1029/2021JC017237>.
2. Wang J., Li J., Yin J., Tan W., Liu Y. Sea level seasonal, interannual and decadal variability in the tropical Pacific Ocean. *Remote Sensing*. 2021,13(19):3809. <https://doi.org/10.3390/rs13193809>
3. Shevchenko G.V., Romanov A.A., Tsoy A.T., On the accuracy of removing the tidal component from IMMOAD SSHA satellite altimetry data. *Current problems in remote sensing of the Earth from the space*. 2023,(20)4:20–29. (in Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-4-20-29>.
4. Beckley B.D., Callahan P.S., Hancock D. W. et al. On the “cal-mode” correction to TOPEX satellite altimetry and its effect on the global mean sea level time series. *Geophysical Research: Oceans*. 2017,122(12):8371–8384. <https://doi.org/10.1002/2017JC013090>.
5. Beckley B., Zelensky N.P., Holmes S.A. et al. Merged_tp_J1_ostm_ost_all_V50. Ver. 5.0. PO.DAAC, CA, USA, 2021. <https://doi.org/10.5067/ALTTS-TJA50>.
6. Belonenko T.V., Koldunov V.V., Staritzin D.K., Foux V.R., Shilov I.O. *Sea-surface level variability in the north-western Pacific*. Saint Petersburg: SMIO-PRESS, 2009, 309 p. (in Russ.).
7. Belonenko T. V., Satellite altimetry of the North-Western Pacific, *Izvestia: Herzen University J. Humanities and Sciences*, 2013,163:120–128. (in Russ.). EDN: RTEPKJ
8. Belonenko T.V., Fuks V.R. Annual and semiannual wave disturbances of the Northwestern Pacific level. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2001,8:51–57. (in Russ.).
9. Koldunov V.V. Interannual and seasonal fluctuations in the level of the northern part of the Pacific Ocean. *Bul-*

- letin of St. Petersburg University. Issue 7. 2007,2:142–148. (in Russ.).*
10. Belonenko T.V., Koldunov V.V., Foux V.R. Kinematics of the standing-progressive waves of Rossby in the sea and ocean. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2013,6(1):23–31. (In Russ.). EDN: QAVBCT
 11. Belonenko T.V. Rossby waves observation in the Northwestern Pacific. *Current problems in remote sensing of the Earth from the space*. 2012,9(3):209–215. (in Russ.). EDN: PBMRUT
 12. Travkin V.S., Belonenko T.V., Kochnev A.V. Topographic waves in the Kuril region. *Current problems in remote sensing of the Earth from the space*. 2022,19(5):222–234. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-5-222-234>. (In Russ.).
 13. Kulik V.V., Prants S.V., Uleysky M.Y., Budyansky M.V. Lagrangian characteristics in the western North Pacific help to explain variability in Pacific saury fishery. *Fisheries Research*. 2022,252(10):106361. (In Russ.). <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2022.106361>.
 14. Shevchenko G.V., Romanov A.A. On the importance of tidal correction for calculation of mean sea level surfaces from IMMOAD SSHA satellite altimetry data. *Current problems in remote sensing of the Earth from the space*. 2023,20(6):80–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-6-80-91>
 15. Romanov A.A., Romanov A.A. Selected properties of the spatial correlation function of sea surface height anomalies based on satellite altimetry data in the Far Eastern Region. *Cosmonautics and rocket engineering*. 2024,3:89–97. (In Russ.). EDN: VOMKMR
 16. Romanov A.A., Romanov A.A., Shevchenko G.V. Determination of the main parameters of the temporal autocorrelation function of surface level anomalies at some points in the Far Eastern Pacific Ocean. *Current problems in remote sensing of the Earth from the space*. 2024,21(5):36–46 (In Russ.) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-5-36-46>
 17. Bagrov N.A. Analytical representation of a sequence of meteorological fields by means of empirical orthogonal components. 1959,74:3–24. (Trudy TsIP). (In Russ.).
 18. Lander A.V., Levshin L.P., Pisarenko V.F., Pogrebinsky G.A. On the spectral-time analysis of oscillations. *Computational and Statistical Methods for Interpreting Seismic Data. Computational Seismology. Issue 6*. M.: Nauka, 1973, c. 15–23. (In Russ.).
 19. *27-year sea level rise – TOPEX/JASON*. URL: <https://svs.gsfc.nasa.gov/4853> (accessed 15.06.2026).

Об авторах

✉ **Шевченко Георгий Владимирович**, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией океанографии, Сахалинский филиал Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО), Южно-Сахалинск, Россия, shevchenko_zhora@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0785-4618>

Цхай Жанна Романовна, кандидат географических наук, ученый секретарь, Сахалинский филиал Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО), Южно-Сахалинск, Россия, tshajr@sakhniro.vniro.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1061-931X>

About the Authors

✉ **Shevchenko, Georgy V.**, Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Laboratory of Oceanography, Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, shevchenko_zhora@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0785-4618>

Tskhay, Zhanna R., Candidate of Geographical Sciences, Academic Secretary, Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, tshajr@sakhniro.vniro.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1061-931X>

Поступила 29.06.2026

Принята к публикации 02.08.2026

Received 29 June 2026

Accepted 2 August 2026

© Автор, 2026 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author, 2026.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.46.0

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.3.299-308>
<https://www.elibrary.ru/tyidpy>

Условия усиления инфрагравитационных колебаний в районе пролива Красноармейский (юго-восточный Сахалин)

К. В. Кириллов

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. Цель работы - определить условия усиления инфрагравитационных колебаний и наиболее устойчивые диапазоны периодов их проявления в районе пролива Красноармейский. Использованы синхронные секундные ряды придонного давления, полученные тремя автономными датчиками с 23 октября 2021 г. по 10 января 2022 г. Для диапазонов 2–20 и 20–300 с рассчитаны значимая высота волн, пиковый период и спектральные характеристики; в активных инфрагравитационных окнах выделены локальные максимумы спектральной энергии. Наибольшая повторяемость максимумов на всех трех станциях приходится на периоды 40–80 с. Этот диапазон шире установленного ранее интервала 68–82 с у оз. Изменчивое и включает его короткопериодную часть, тогда как максимумы 137–186 с в новом массиве встречаются эпизодически. Повышенные значения энергии инфрагравитационных колебаний преимущественно наблюдались при развитом волнении с пиковыми периодами 8–12 с; наиболее высокие значения отмечены при $H_s(2–20\text{ с})$ более 2.5–3.0 м. Результаты характеризуют повторяемость инфрагравитационного отклика в течение нескольких штормовых событий и могут быть использованы при дальнейшем анализе прибрежной гидродинамики и условий формирования береговой зоны вблизи пролива Красноармейский.

Ключевые слова: инфрагравитационные колебания, ветровое волнение, зыбь, спектральные максимумы, пролив Красноармейский

Conditions for amplification of infragravity oscillations in the Krasnoarmeysky Strait area (south-eastern Sakhalin)

K. V. Kirillov

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. The aim of the study is to determine the conditions for the amplification of infragravity oscillations and the most stable ranges of periods at which they occur in the Krasnoarmeysky Strait area. Synchronous one-second series of bottom pressure were used, obtained by three autonomous sensors from October 23, 2021, to January 10, 2022. A significant wave height, peak period, and spectral characteristics were calculated for the ranges of 2–20 and 20–300 s; local spectral energy maxima were identified within the periods of high infragravity activity. The highest frequency of spectral maxima at all three stations was observed in the 40–80 s period range. This range is wider than the previously established range of 68–82 s at the Izmenchivoye lake and includes its shorter-period part, whereas maxima of the 137–186 s range occurred only sporadically in the new dataset. Increased values of the energy of the infragravity oscillations were mainly observed during developed waves with peak periods of 8–12 s; the highest values were recorded at $H_s(2–20\text{ s})$ of more than 2.5–3.0 m. The results characterize the recurrence of the infragravity response during several storm events and can be used in further analysis of coastal hydrodynamics and conditions for the re-formation of the coastal zone near the Krasnoarmeysky Strait.

Keywords: infragravity oscillations, wind waves, swell, spectral maxima, Krasnoarmeysky Strait

Финансирование и благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (FWWM-2024-0002).

Funding and Acknowledgements

This study was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (FWWM-2024-0002).

Для цитирования: Кириллов К.В. Условия усиления инфрагравитационных колебаний в районе пролива Красноармейский (юго-восточный Сахалин). *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 3, с. 299–308. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.3.299-308>; <https://www.elibrary.ru/tyidpy>

For citation: Kirillov K.V. Conditions for amplification of infragravity oscillations in the Krasnoarmeysky Strait area (south-eastern Sakhalin). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 3, p. 299–308. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.3.299-308>; <https://www.elibrary.ru/tyidpy>

Введение

Инфрагравитационные волны являются существенной составляющей прибрежной гидродинамики. Хотя их амплитуды обычно на порядок меньше амплитуд ветрового волнения и зыби, они участвуют в переносе энергии поверхностных волн к низкочастотной части спектра, модулируют колебания уровня и прибрежные течения и могут влиять на транспорт прибрежно-морских наносов [1, 2]. Особый интерес представляют захваченные краевые волны: их поперечная структура определяется чередованием узлов и пучностей, а распространение происходит преимущественно вдоль берега. Такая пространственная организация может быть связана с формированием квазиритмических береговых форм, включая фестоны и мегафестоны [2].

Юго-восточное побережье о. Сахалин испытывает прямое воздействие волн Охотского моря и включает песчаные косы, лагуны и соединяющие их с морем протоки. Штормовые размывы и повреждения береговой инфраструктуры на этом побережье описаны в ряде работ [3–5]. Эксперимент в районе пролива Красноармейский был ориентирован прежде всего на характеристику волновых процессов. Полученные данные также создают основу для последующего изучения того, как длиннопериодные колебания могут влиять на переформирование береговой зоны и замывание пролива, соединяющего озеро Тунайча с морем. Однако литодинамические процессы непосредственно в настоящей работе не анализируются.

Ранее инструментальные исследования ветрового волнения и инфрагравитационных колебаний выполнялись у морского устья протоки оз. Изменчивое. В материалах наблюдений 2007 г. для экстремального шторма 25–26 сентября были выделены диапазоны 68–82 и 137–186 с; фазовые соотношения между станциями интерпретировались как признаки захваченных краевых волн, распространяющихся вдоль берега [6]. Такие движения могут сопровождаться значительными скоростями прибрежных течений и участвовать в формировании чередующихся зон размыва и аккумуляции наносов [6].

Предыдущее исследование было сосредоточено на отдельных штормовых эпизодах. Поэтому остается недостаточно изученным, насколько часто и устойчиво локальные спектральные максимумы в характерных инфрагравитационных полосах возникают в длительных рядах и с какими параметрами ветрового волнения и зыби они связаны. Районы оз. Изменчивое и пролива Красноармейский расположены на одном участке юго-восточного побережья, но разделены каменистым выступом и могут различаться условиями подхода и трансформации волн; поэтому прежние диапазоны используются здесь для регионального сопоставления, а не как заведомо идентичные моды.

В настоящей работе рассматривается новый массив синхронных измерений, полученный тремя автономными донными датчиками в районе пролива Красноармейский, соединяющего оз. Тунайча с заливом Мордвинова. Три синхронных ряда не являются необходимым

условием для анализа временной изменчивости на одной станции, но позволяют проверить воспроизводимость выделяемых спектральных особенностей, оценить локальные амплитудные различия и в дальнейшем выполнить взаимно-спектральный анализ.

Цель работы состоит в выявлении условий усиления инфрагравитационных колебаний и устойчивых диапазонов их периодов в районе пролива Красноармейский. Для этого по трем синхронным рядам сопоставляются параметры волнения и зыби в диапазоне 2–20 с с энергией колебаний 20–300 с, оценивается повторяемость локальных спектральных максимумов и проверяется, воспроизводятся ли диапазоны, ранее выделенные у оз. Изменчивое.

Район исследований, материалы наблюдений и методы обработки

Район исследований расположен в заливе Мордвинова в районе пролива Красноармейский, соединяющего оз. Тунайча с Охотским морем. Предыдущие инструментальные наблюдения выполнялись севернее, у протоки оз. Изменчивое. Оба участка относятся к юго-

восточному побережью Сахалина и испытывают воздействие охотоморского волнения, однако разделяющий их каменистый выступ может изменять направления подхода и условия трансформации волн. Поэтому сходство результатов рассматривается как региональная повторяемость, а различия - как возможное следствие локальной конфигурации берега и подводного рельефа.

Схема района исследований приведена на рис. 1. На обзорной карте показано положение участка наблюдений на юге о. Сахалин относительно Татарского пролива, Охотского моря и залива Анива (рис. 1 а), на детальной схеме - положение трех автономных датчиков в районе пролива Красноармейский (рис. 1 б). Станции расположены на небольших расстояниях друг от друга; линия Т1-Т2 ориентирована приблизительно по нормали к берегу, а Т3 смещена вдоль берега. Такая конфигурация позволяет сопоставлять синхронные записи и оценивать различия между поперечной и продольной по отношению к берегу парами станций.

Инструментальные наблюдения выполнялись тремя автономными донными датчиками, регистрировавшими давление, пропорциональное изменению уровня моря, а также

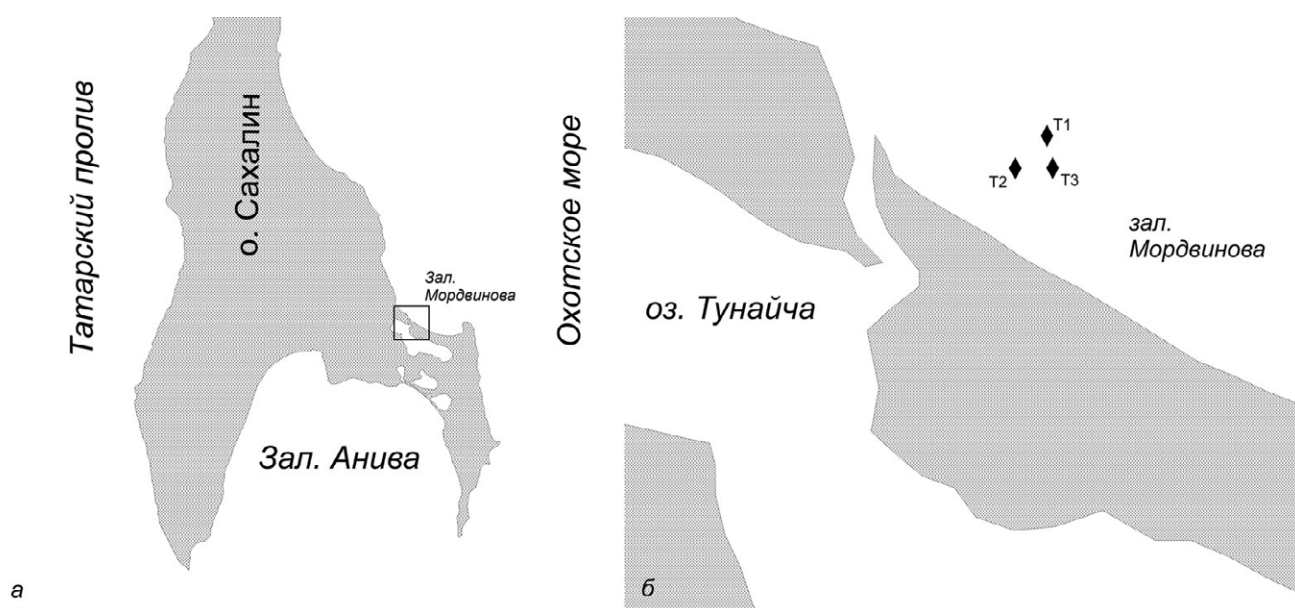


Рис. 1. Схема района исследований: а) положение района наблюдений у юго-восточного побережья о. Сахалин; б) положение автономных датчиков в районе пролива Красноармейский.

Fig. 1. Study area map: а) location of the observation area off the southeastern coast of Sakhalin Island; б) locations of autonomous sensors in the Krasnoarmeysky Strait area.

температуру воды. Наблюдения проводились с дискретностью 1 с в период с 23 октября 2021 г. 12:00 до 10 января 2022 г. 00:00 по Гринвичу. Таким образом, был получен длительный синхронный массив секундных измерений продолжительностью около двух с половиной месяцев, охватывающий позднесенний и начальный зимний периоды, включая несколько эпизодов усиления волнения. В дальнейшем для краткости датчики обозначаются как T1, T2 и T3.

Вопрос о соответствии давления на дне высотам волн на поверхности детально исследовался путем организации синхронных измерений различными приборами, в результате чего была разработана методика пересчета, позволяющая получить качественные материалы по ветровому волнению при глубине постановки прибора до 30 м [7]. Разработанная в лаборатории волновой динамики и прибрежных течений ИМГиГ ДВО РАН программа Кума позволяет восстанавливать истинные высоты волн за счет решения проблемы пересчета пульсаций гидростатического давления в параметры поверхностного волнения с учетом коэффициента поверхностного ослабления волн [8].

Общая структура исходных данных показана на рис. 2 на примере станции T1. В верхней панели приведен ряд вариаций придонного

давления, использованный для восстановления характеристик поверхностного волнения. Нижняя панель показывает изменение спектральной плотности во времени в диапазоне периодов 2–600 с. Текущий спектр рассчитывался методом Уэлча в 48-минутных внешних окнах со сдвигом 24 мин. Основная энергия в течение большей части наблюдений сосредоточена в диапазоне ветрового волнения и зыби - от нескольких секунд до первых десятков секунд. Во время усиления волнения одновременно возрастает спектральная энергия в области более низких частот, включая инфрагравитационный диапазон.

На рис. 2 показана запись станции T1. Записи двух других станций не приведены, поскольку общий временной ход и положение основных спектральных областей близки; их повторение перегрузило бы рисунок. В последующих разделах данные всех трех станций используются для проверки воспроизводимости распределений и для оценки амплитудных различий, связанных с глубиной и положением приборов.

Таким образом, получены три длительные синхронные записи, пригодные для анализа временной изменчивости, спектральной структуры и различий волновых колебаний между пунктами наблюдений.

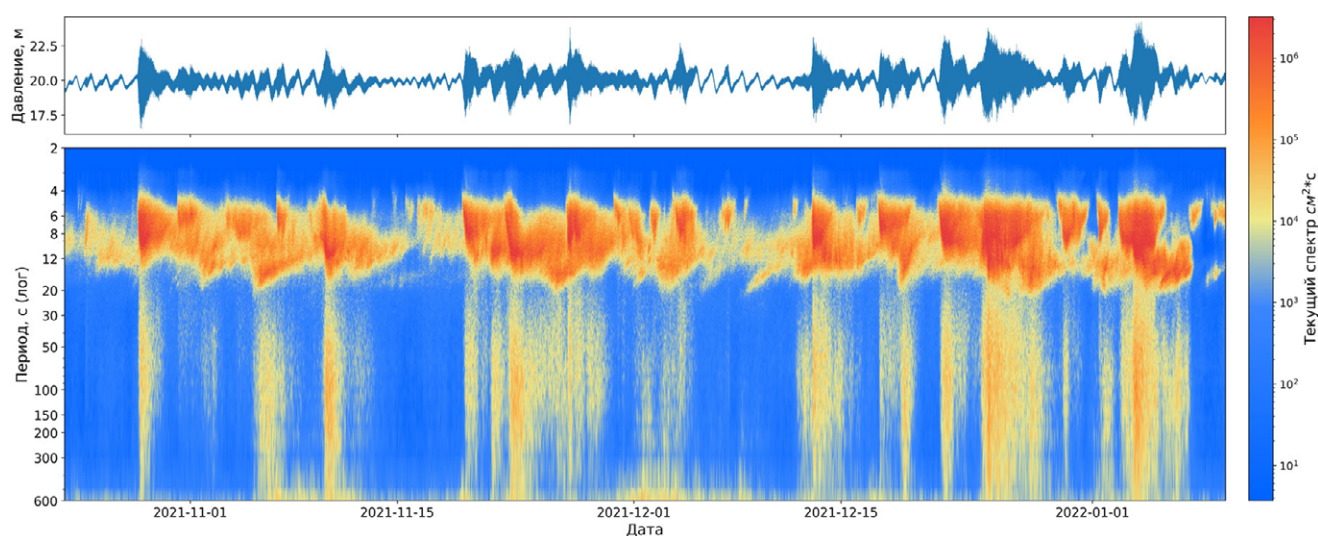


Рис. 2. Вариации придонного давления и текущий спектр по данным станции T1: сверху - исходный ряд; снизу - спектральная плотность в диапазоне периодов 2–600 с.

Fig. 2. Bottom-pressure variations and the running spectrum at station T1: top, the original record; bottom, spectral density in the 2–600 s period range.

Обработка включала контроль секундных рядов придонного давления и пересчет пульсаций давления в характеристики поверхностного волнения с учетом частотно-зависимого ослабления [7, 8]. Значимая высота волн H_s и пиковый период T_p рассчитывались в последовательных 30-минутных окнах. Для сопоставления диапазонов 2–20 и 20–300 с, а также для поиска локальных инфрагравитационных максимумов использовались 200-минутные окна со сдвигом 10 мин; активными считались окна, в которых $H_s(20–300\text{ с})$ превышала 70-й перцентиль для соответствующей станции. Текущие спектры 2–600 с рассчитывались в 48-минутных окнах со сдвигом 24 мин.

Изменчивость ветрового волнения и зыби

Первый этап анализа был направлен на описание изменчивости ветрового волнения и зыби в диапазоне периодов 2–20 с. Для этого по скользящим временным окнам были рассчитаны значимая высота волн H_s и пиковый период

T_p для каждого из трех датчиков. Временной ход этих характеристик приведен на рис. 3.

В течение периода наблюдений волновой режим имел выраженный нестационарный характер. На фоне относительно спокойных интервалов, когда H_s обычно не превышала 0.3–0.5 м, выделяется ряд эпизодов резкого усиления волнения. Наиболее интенсивные события наблюдались в конце октября, во второй половине ноября, в декабре и в начале января. В отдельные периоды значимая высота волн достигала 3–4 м и более, что соответствует штормовым условиям в прибрежной зоне.

Основные максимумы и интервалы ослабления H_s на трех станциях совпадают по времени, что ожидаемо при малых расстояниях между приборами. Информативно не само совпадение событий, а различия амплитуд: в отдельных штормах они могут отражать неодинаковую глубину постановки и локальную трансформацию волн.

Большинство значений T_p находится в интервале 6–12 с, соответствующем ветровому волнению и зыби; в отдельных эпизодах T_p

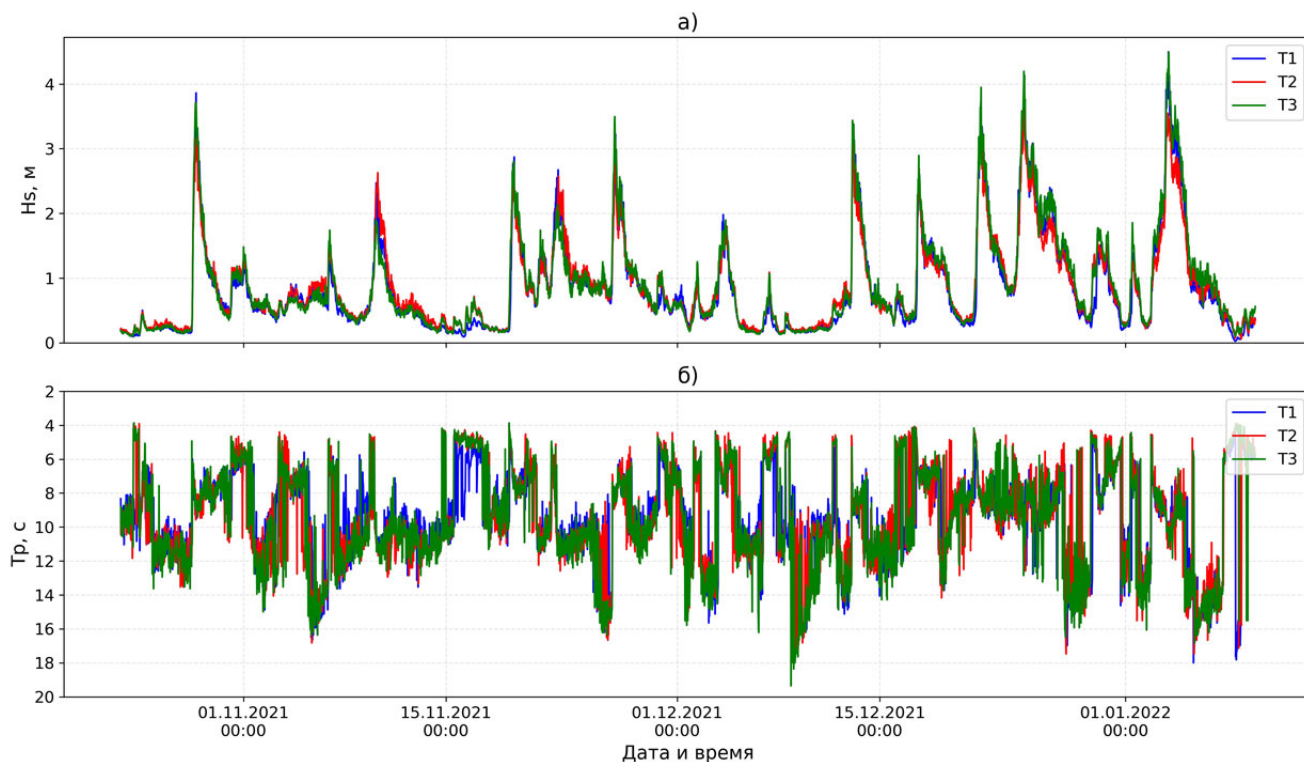


Рис. 3. Изменчивость параметров волнения в диапазоне периодов 2–20 с по данным трех датчиков: а) значимая высота волн H_s ; б) пиковый период T_p .

Fig. 3. Variability of wave parameters in the 2–20 s period range according to the data from three sensors: а) significant wave height, H_s ; б) peak period, T_p .

возрастает до 14-18 с. Пиковый период изменяется скачкообразнее H_s , поскольку при наличии нескольких сопоставимых максимумов небольшое перераспределение спектральной энергии может переводить глобальный максимум из одной частотной полосы в другую.

Совместные распределения H_s - T_p в диапазоне 2–20 с построены отдельно для каждой станции (рис. 4). Они показывают, при каких сочетаниях значимой высоты и пикового периода наблюдалось ветровое волнение и зыбь. Их основная цель - оценка воспроизводимости распределений и различий в амплитудах между станциями.

На трех станциях преобладают малые значения H_s , соответствующие слабому и умеренному волнению. При увеличении H_s основная плотность точек смещается к T_p около 8-11 с: наиболее сильные события связаны преимущественно с развитым смешанным волнением и зыбью. Этот результат согласуется с ранее описанным волновым режимом юго-восточного побережья Сахалина [9, 10].

При малых H_s значения T_p распределены шире, включая 10-16 с. В слабом волнении несколько узких спектральных максимумов могут иметь близкую энергию, поэтому положение глобального максимума менее устойчиво. В штормовых условиях распределение компактнее: высокие H_s преимущественно соответствуют T_p около 8-11 с, хотя отдельные

события сопровождаются более длиннопериодной зыбью.

Сходство трех распределений подтверждает воспроизводимость общей зависимости, но само по себе не характеризует крупномасштабную пространственную структуру из-за малого расстояния между станциями. Различия максимальных H_s наиболее вероятно связаны с глубиной постановки и локальной трансформацией волн; именно поэтому данные трех станций далее рассматриваются раздельно.

За период наблюдений зарегистрирована серия штормовых событий, при которых одновременно возрастали H_s и T_p в диапазоне 2–20 с. Далее анализируется не общеизвестная связь инфрагравитационных колебаний со штормами как таковая, а то, какие сочетания H_s и T_p соответствуют наибольшей энергии в полосе 20–300 с и какие периоды внутри этой полосы повторяются наиболее устойчиво.

Связь параметров ветрового волнения и зыби с энергией инфрагравитационных колебаний

Для оценки этой связи параметры волнения в диапазоне 2–20 с сопоставлены со значимой высотой инфрагравитационных колебаний, рассчитанной по спектральной энергии в диапазоне 20–300 с. На рис. 5 по осям показаны $H_s(2-20\text{ с})$ и $T_p(2-20\text{ с})$, а цветом - $H_s(20-300\text{ с})$.

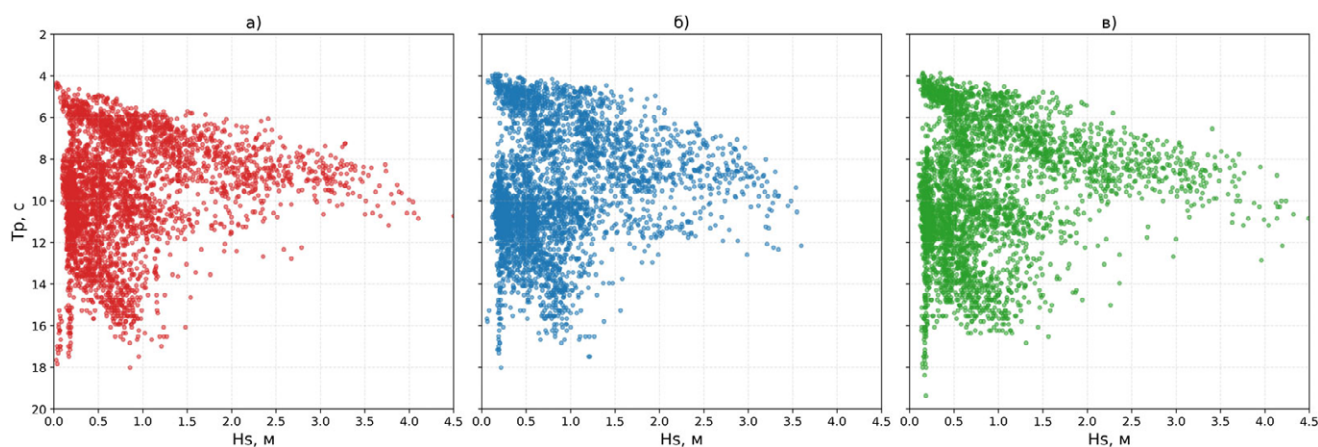


Рис. 4. Совместное распределение значимой высоты волн H_s и пикового периода T_p в диапазоне 2–20 с: а) T1; б) T2; в) T3. Ось T_p инвертирована.

Fig. 4. Joint distribution of significant wave height H_s and peak period T_p in the 2–20 s range: (a) T1; (б) T2; (в) T3. The T_p axis is inverted.

Рис. 5 демонстрирует условное распределение инфрагравитационной энергии в пространстве параметров Hs-Tr. На всех станциях Hs(20–300 с) в среднем возрастает с Hs(2–20 с), однако точки с наибольшими значениями сосредоточены не во всем диапазоне пиковых периодов.

Наиболее высокие Hs(20–300 с) преимущественно соответствуют Tr(2–20 с) около 8–12 с. Следовательно, в рассматриваемом массиве одной большой высоты коротких волн недостаточно для описания инфрагравитационного отклика: существенна также спектральная организация волнения, характеризующаяся пиковым периодом. Эта статистическая связь не трактуется как самостоятельный механизм генерации.

На T2 и T3 максимальные Hs(20–300 с) наблюдаются главным образом при Hs(2–20 с) более 2.5–3.0 м и Tr около 9–12 с. На T1 общий рисунок сходен, но максимальные значения ниже, что согласуется с различиями глубины и положения приборов.

Таким образом, рис. 5 используется для выделения характерной области параметров: Hs(2–20 с) более 2.5–3.0 м и Tr порядка 8–12 с. Главный дальнейший вопрос состоит в том, какие периоды внутри полосы 20–300 с формируют этот отклик.

Для ответа на этот вопрос в каждом 200-минутном активном окне определялись до трех локальных максимумов спектральной энергии в диапазоне 20–300 с; затем оценивались их повторяемость и распределение во времени.

Повторяемость спектральных максимумов в диапазоне инфрагравитационных волн

В активных окнах были определены периоды локальных максимумов спектральной энергии и рассчитано число максимумов на 100 окон (рис. 6). Такая нормировка позволяет сравнивать станции независимо от небольших различий числа пригодных окон.

На всех трех станциях распределение максимумов смещено к короткопериодной части инфрагравитационного диапазона. Основная область повышенной повторяемости занимает 40–80 с: на T2 наиболее выражены периоды около 40–60 с, на T1 и T3 распределения шире и включают 50–75 с. С увеличением периода число максимумов уменьшается; после 150–180 с они встречаются редко.

Для сопоставления на рис. 6 показаны интервалы 68–82 и 137–186 с, выделенные для экстремального шторма 25–26 сентября 2007 г. у оз. Изменчивое по совокупности амплитудных и фазовых признаков [6].

В интервале 68–82 с спектральная энергия не образует в новом массиве отдельную узкую моду, но входит в верхнюю по периоду часть более широкой области 40–80 с. Поэтому корректнее говорить не о точном воспроизведении прежнего диапазона, а о региональной устойчивости короткопериодной части инфрагравитационного спектра.

Максимумы 137–186 с встречаются существенно реже и приурочены к отдельным активным интервалам. Наличие автоспектрального

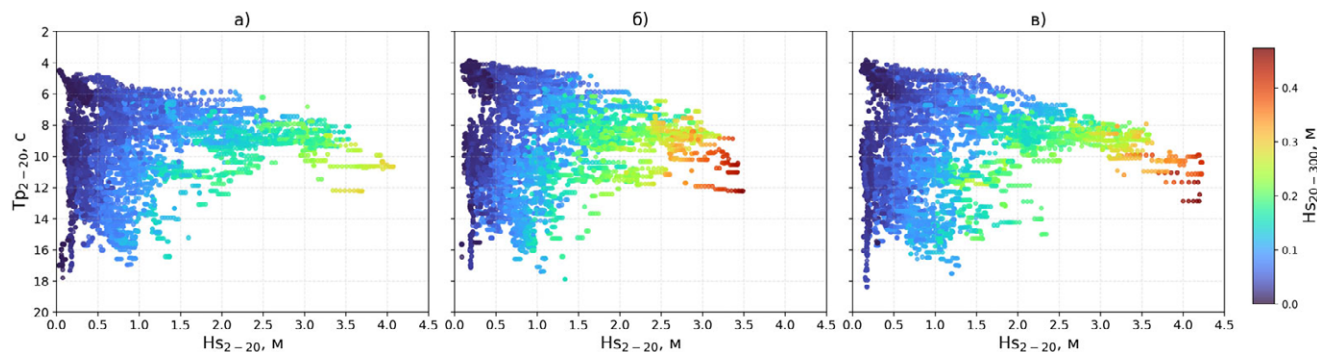


Рис. 5. Сочетания параметров волнения 2–20 с, при которых наблюдались различные значения Hs(20–300 с): а) T1; б) T2; в) T3. По оси абсцисс - Hs(2–20 с), по оси ординат - Tr(2–20 с), цветом показана Hs(20–300 с). Ось Tr инвертирована.

Fig. 5. Combinations of 2–20 s wave parameters associated with different values of Hs(20–300 s): (a) T1; (b) T2; (c) T3. The axes show Hs(2–20 s) and Tr(2–20 s); color denotes Hs(20–300 s). The Tr axis is inverted.

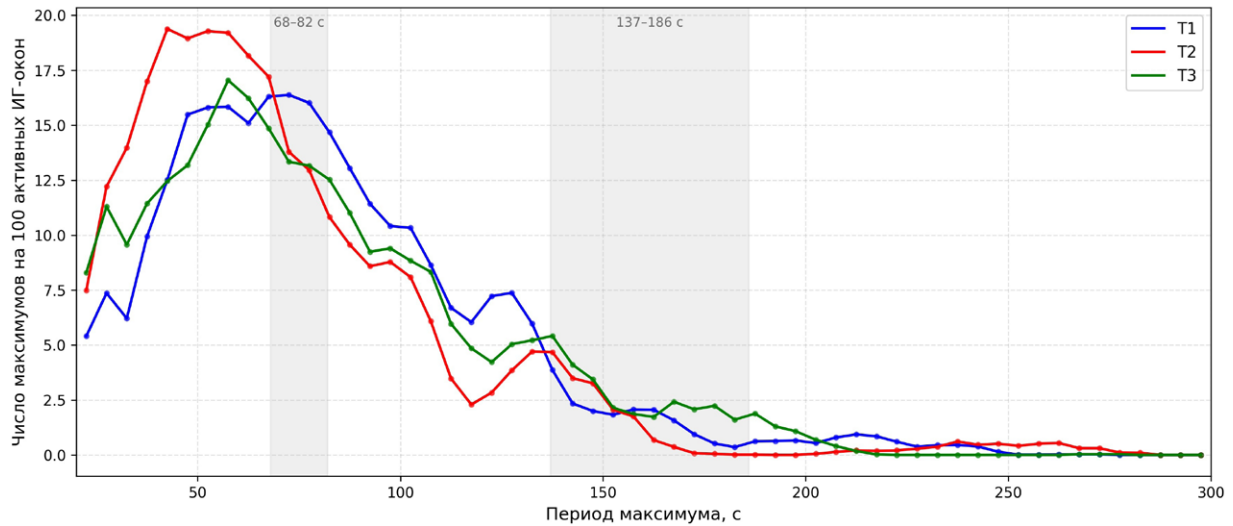


Рис. 6. Повторяемость локальных максимумов спектральной энергии в диапазоне 20–300 с по данным трех станций. По оси абсцисс - период максимума, по оси ординат - число максимумов на 100 активных окон. Затенены диапазоны 68–82 и 137–186 с, ранее выделенные у оз. Изменчивое [6].

Fig. 6. Recurrence of local spectral energy maxima in the 20–300 s period range based on data from the three stations. The x-axis shows peak period, and the y-axis shows the number of maxima per 100 activity windows. Shading marks the 68–82 s and 137–186 s ranges previously identified near the Izmenchivoye lake [6].

максимума само по себе не позволяет отнести колебание к захваченной краевой или излученной волне; такая классификация требует устойчивой когерентности и анализа фазовых соотношений между станциями. Поэтому в настоящем тексте диапазоны 40–80 и 137–186 с

характеризуются как области повторяемости спектральных максимумов, без отождествления с конкретным типом волн.

Рис. 7 дополняет распределение на рис. 6 временной привязкой максимумов. В верхней панели показана средняя по трем станциям

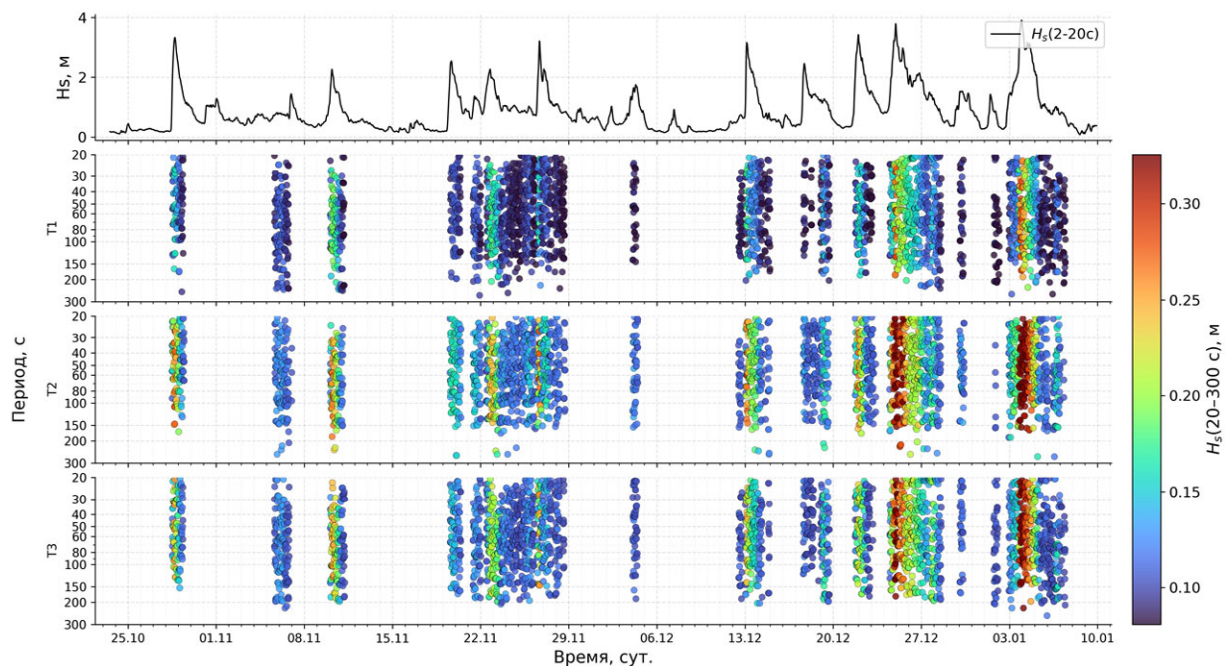


Рис. 7. Распределение локальных спектральных максимумов 20–300 с во времени. Сверху - средняя по трем станциям $H_s(2-20\text{ c})$; ниже - периоды максимумов в активных окнах отдельно для T1, T2 и T3. Цвет соответствует $H_s(20-300\text{ c})$.

Fig. 7. Temporal distribution of local spectral energy maxima in the 20–300 s period range. Top, $H_s(2-20\text{ s})$ averaged over the three stations. Bottom, peak periods in activity windows at T1, T2, and T3. Color denotes $H_s(20-300\text{ s})$.

Hs(2–20 с), в нижних - периоды локальных максимумов 20–300 с в активных окнах; цветом обозначена Hs(20–300 с).

Максимумы образуют отдельные группы, совпадающие с несколькими эпизодами усиления волнения. Существенно, что возрастание энергии в диапазоне 40–80 с наблюдается не в одном экстремальном шторме, а повторяется в разных событиях в ноябре, декабре и начале января. Именно эта повторяемость во времени, а не общая связь инфрагравитационной энергии со штормами, составляет основной вывод, полученный в данной работе. Максимумы 140–180 с появляются лишь в отдельных событиях и не формируют непрерывной или регулярно повторяющейся полосы.

Время появления основных групп максимумов близко на трех станциях, что ожидаемо при компактной схеме постановки. Более информативны различия амплитуд: Hs(20–300 с) чаще выше на Т2 и Т3, чем на Т1. Их можно связать с глубиной и локальной трансформацией лишь как рабочую гипотезу, поскольку трех точек недостаточно для восстановления пространственной структуры поля.

Таким образом, результаты выполненного анализа показали, что возрастание энергии в диапазоне 40–80 с наблюдается в нескольких независимых штормовых эпизодах, тогда как более низкочастотные максимумы возникают нерегулярно. Тип волны по этому рисунку не определяется; для разделения краевых и излученных компонентов необходим отдельный взаимно-спектральный анализ.

Заключение

По трем синхронным записям продолжительностью около 78.5 суток охарактеризованы ветровое волнение, зыбь и инфрагравитационные колебания в районе пролива Красноармейский. За период наблюдений зарегистрировано несколько штормов со значимой высотой волн до 3–4 м и более.

Для данного массива наиболее высокие Hs(20–300 с) сосредоточены в области Hs(2–20 с) более 2.5–3.0 м и Tr(2–20 с) около 8–12 с.

Этот результат характеризует условия возникновения наиболее сильного инфрагравитационного отклика в исследованном районе и не предлагается как новая общая закономерность генерации инфрагравитационных волн.

Главный результат состоит в устойчивой повторяемости локальных спектральных максимумов с периодами 40–80 с в нескольких штормовых событиях. Ранее выделенный у оз. Изменчивое интервал 68–82 с входит в верхнюю по периоду часть этой более широкой области; диапазон 137–186 с в новых данных выражен значительно слабее и проявляется эпизодически.

Различия Hs(20–300 с) между станциями, наиболее заметные между Т1 и Т2–Т3, указывают на возможное влияние глубины и локальной трансформации, но компактная схема постановки не позволяет восстановить пространственную структуру колебаний. Автоспектральные данные также недостаточны для однозначного разделения краевых и излученных волн; для этого требуется анализ когерентности и фазы только в тех полосах, где когерентность статистически значима.

Полученные оценки задают характерные периоды и волновые условия, которые следует учитывать при дальнейшем исследовании прибрежных течений и переформирования береговой зоны в районе пролива Красноармейский, состояние которого влияет на поступление морской воды в озеро Тунайча. Связь с литодинамикой здесь формулируется как направление дальнейшей работы, поскольку транспорт прибрежно-морских наносов непосредственно не измерялся и в данной работе не рассматривался.

Ограничением работы является отсутствие независимых данных о ледовой обстановке. Наблюдения были прекращены 10 января 2022 г., поэтому влияние начальных форм льдообразования на заключительный участок записи было весьма возможно. Однако заметной изменчивости гидродинамических параметров и диапазонов повторяемости спектральных максимумов выявлено не было, поэтому наличие или отсутствие ледяного покрова не сказалось на полученных результатах.

Список литературы

1. Рабинович А.Б. *Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение*. Л.: Гидрометеиздат, 1993. 240 с.
2. Леонтьев И.О. *Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов*. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
3. Като Э., Мисков О.А., Шевченко Г.В. Штормовые нагоны на побережье острова Сахалин в конце XX века. *Динамические процессы на шельфе Сахалина и Курильских островов*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. С. 160–176.
4. Афанасьев В.В. Геоморфологические аспекты проблемы защиты берегов острова Сахалин. *Геоморфология*. 2015. № 2. С. 28–37. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2015-2-28-37>
5. Шевченко Г.В., Горбунов А.О., Куркин А.А., Катаева Л.Ю. Геоморфологические и гидродинамические условия размывов полотна главной автомобильной магистрали Сахалина. *Наука и техника транспорта*. 2010,3:60–70. EDN: MVLTAВ
6. Шевченко Г.В., Кириллов К.В. Регистрация инфрагравитационных волн в районе оз. Изменчивое (юго-восточный Сахалин). *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 4. С. 81–89. <https://doi.org/10.7868/S207366731804010X>
7. Заславский М.М., Красицкий В.П. О пересчете данных волнографа с датчиком давления на спектр поверхностных волн. *Океанология*. 2001. Т. 41, № 2. С. 195–200. EDN: LGZJET
8. Плеханов Ф.А., Ковалев Д.П. Программа комплексной обработки и анализа временных рядов данных уровня моря на основе авторских алгоритмов. *Геоинформатика*. 2016. № 1. С. 44–53. EDN: VQZVLF
9. Плеханов Ф.А. Пространственно-временная изменчивость характеристик волнения у юго-восточного побережья о. Сахалин по данным инструментальных измерений. *Ученые записки Сахалинского государственного университета*. 2015. № 11–12. С. 35–38. EDN: UZDIKD
10. Кузнецов К.И., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Ковалев П.Д. Статистические характеристики ветрового волнения на юго-восточном побережье о. Сахалин по инструментальным измерениям 2006–2009 гг. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 52, № 2. С. 242–250.

References

1. Rabinovich A.B. *Long gravitational waves in the ocean: capture, resonance, radiation*. L.: Gidrometeoizdat, 1993, 240 p. (in Russ.).
2. Leontiev I.O. *Coastal dynamics: waves, currents, sediment flows*. Moscow: GEOS, 2001, 272 p. (in Russ.).
3. Kato E., Miskov O.A., Shevchenko G.V. Storm surges on the coast of Sakhalin Island at the end of the twentieth century. *Dynamic processes on the shelf of Sakhalin and the Kuril Islands*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG FEB RAS, 2001. p. 160–176. (in Russ.).
4. Afanasyev V.V. Geomorphological aspects of the problem of protecting the shores of Sakhalin Island. *Geomorphology*. 2015,2:28–37. (in Russ.). <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2015-2-28-37>
5. Shevchenko G.V., Gorbunov A.O., Kurkin A.A., Kataeva L.Yu. Geomorphological and hydrodynamic conditions of erosion of the main highway of Sakhalin. *Science and Technology of transport*. 2010,3:60–70. (in Russ.). EDN: MVLTAВ
6. Shevchenko G.V., Kirillov K.V. Registration of infragravity waves in the Izmenchivoye lake area (Southeastern Sakhalin). *Fundamental and applied hydrophysics*. 2018,11(4):81–89. (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S207366731804010X>
7. Zaslavsky M.M., Krasitsky V.P. On the recalculation of waveform data with a pressure sensor on the spectrum of surface waves. *Oceanology*. 2001,41(2):195–200. (in Russ.). EDN: LGZJET
8. Plekhanov V.A., Kovalev D.P. A program for the integrated development and analysis of time series of the modern world based on modern author's algorithms. *Geoinformatics*. 2016,1:44–53. (in Russ.). EDN: VQZVLF
9. Plekhanov F. A. Spatial and temporal variability of wave characteristics off the southeastern coast of Sakhalin Island according to instrumental measurements. *Scientific notes of Sakhalin State University*. 2015,11–12:35–38. (in Russ.). EDN: UZDIKD
10. Kuznetsov K. I., Kurkin A. A., Pelinovsky E. N., Kovalev P. D. Statistical characteristics of wind waves on the southeastern coast of Sakhalin Island by instrumental measurements 2006-2009 // *Izvestiya RAS. Physics of the atmosphere and ocean*. 2014,52(2):242–250. (in Russ.).

Об авторе

Кириллов Константин Владиславович, научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, k.kirillov@imgg.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0822-3060>

About the Author

Kirillov, Konstantin V., Researcher of the Laboratory of Wave Dynamics and Coastal Currents, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, k.kirillov@imgg.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0822-3060>

Поступила 15.06.2026

Принята к публикации 15.08.2026

Received 15 June 2026

Accepted 15 August 2026

© Авторы, 2026 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2026.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.326.7

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.3.309-329>
<https://www.elibrary.ru/tnzduu>

О внутрисезонных и межсезонных связях ледовых режимов Берингова и Чукотского морей

И. В. Шумилов¹, И. В. Никулина¹, Д. А. Ващенко², В. М. Пищальник¹, В. А. Романюк²

¹ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

² ФГБОУ ВО Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. В работе исследована внутрисезонная и межсезонная согласованность ледовых режимов Берингова и Чукотского морей в период современных спутниковых наблюдений. Выявлена сезонная структура статистических связей между площадью ледяного покрова двух акваторий и оценена её сопряжённость с температурой приземного воздуха и температурой поверхности моря. Используются среднемесячные ряды площади ледяного покрова Sea Ice Index, Version 3 Национального центра данных по снегу и льду (NSIDC) за 1979/80–2023/24 гг., данные температуры воздуха на высоте 2 м из реанализа ERA5 за тот же период и данные OSTIA о температуре поверхности моря северо-восточного шельфа Берингова моря за 1982–2023 гг. Применены корреляционный анализ, сопоставление месячных и фазовых показателей с учётом временного смещения, анализ стандартизированных аномалий и частичная корреляция. Показано, что Берингово и Чукотское моря характеризуются устойчивой внутрисезонной согласованностью ледовых процессов, наиболее выраженной в переходные периоды ледового сезона. Установлена статистическая связь между ледовитостью Берингова моря на фазе разрушения ледяного покрова и ледообразованием в Чукотском море в начале следующего сезона. Температура поверхности моря северо-восточного шельфа Берингова моря объясняет часть этой зависимости, отражая роль предшествующего теплового состояния шельфовых вод. Выявлена сезонная асимметрия вклада температурного фактора: осенью и в начале зимы сопряжённость ледовых условий сильнее связана с температурой воздуха над Чукотским морем, а весной и летом – с температурой воздуха над Беринговым морем. Полученные результаты позволяют рассматривать весенне-летнюю ледовитость Берингова моря как потенциальный предиктор условий начального ледообразования в Чукотском море.

Ключевые слова: ледяной покров, ледовитость моря, Берингово море, Чукотское море, температура поверхности моря, температура приземного воздуха

On the intraseasonal and interseasonal relationships between the ice regimes of the Bering and Chukchi Seas

Ilya V. Shumilov¹, Irina V. Nikulina¹, Dmitry A. Vashchenko²,
Vladimir M. Pishchalnik¹, Valery A. Romanyuk²

¹ Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

² Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. The study examines the intraseasonal and interseasonal coherence of sea ice regimes in the Bering and Chukchi Seas during the modern satellite observation period. The seasonal structure of statistical relationships between sea ice extent in the two seas was identified, and its associations with near-surface air temperature and sea surface temperature were assessed. The analysis used monthly sea ice extent series from the Sea Ice Index, Version 3, provided by the National Snow and Ice Data Center (NSIDC) for the 1979/80–2023/24 period, as well as 2-m air temperature data from the ERA5 reanalysis for the same period, and OSTIA sea surface temperature data for the northeastern Bering Sea shelf for 1982–2023. The methods included correlation analysis, comparison of monthly and phase-averaged characteristics with time lags, analysis of standardized anomalies, and partial correlation analysis. The results show that the Bering and Chukchi Seas are characterized by a stable intraseasonal coherence of

sea ice processes, most pronounced during transitional periods of the ice season. A statistically significant relationship was identified between sea ice conditions in the Bering Sea during the ice decay phase and ice formation in the Chukchi Sea at the beginning of the following season. Sea surface temperature over the northeastern Bering Sea shelf explains part of this relationship, indicating the role of the preceding thermal state of the shelf waters. A seasonal asymmetry in the influence of temperature was revealed: in autumn and early winter, the sea ice coherence is more strongly associated with the air temperature over the Chukchi Sea, whereas in spring and summer it is more strongly associated with air temperature over the Bering Sea. The results suggest that spring–summer sea ice conditions in the Bering Sea may be considered a potential predictor of early-season ice formation in the Chukchi Sea.

Keywords: ice cover, sea ice extent, Bering Sea, Chukchi Sea, sea surface temperature, near-surface air temperature

Финансирование и благодарности

Исследование выполнялось и финансировалось в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (FWWM-2024-0002) и государственного задания Сахалинского государственного университета «Создание научных основ управления процессами поглощения и накопления углерода биоморфолитосистемами прибрежно-морских водноболотных угодий и прилегающих морских акваторий (FEFF-2024-0004)».

Для цитирования: Шумилов И.В., Никулина И.В., Ващенко Д.А., Пищальник В.М., Романюк В.А. О внутрисезонных и межсезонных связях ледовых режимов Берингова и Чукотского морей. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 3, с. 309–329. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.3.309-329>; <https://www.elibrary.ru/tnzduu>

Funding and Acknowledgements

The study was carried out and financed within the framework of the state assignment of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (FWWM-2024-0002) and the state assignment of Sakhalin State University “Creation of scientific foundations for managing the processes of carbon absorption and accumulation by biomorpholithosystems of coastal-marine wetlands and adjacent marine areas (FEFF-2024-0004)”.

For citation: Shumilov I.V., Nikulina I.V., Vashchenko D.A., Pishchalnik V.M., Romanyuk V.A. On the intraseasonal and interseasonal relationships between the ice regimes of the Bering and Chukchi Seas. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 3, p. 309–329. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.3.309-329>; <https://www.elibrary.ru/tnzduu>

Введение

Ледяной покров арктических и дальневосточных морей является важным элементом климатической системы Северного полушария и оказывает существенное влияние на теплообмен между океаном и атмосферой, циркуляцию воздушных масс и формирование региональных гидрометеорологических особенностей. Изменчивость ледовитости отражает совокупность процессов в системе «океан–лед–атмосфера» и может рассматриваться как интегральный индикатор изменений климатической системы на различных пространственно-временных масштабах [1]. Берингово и Чукотское моря занимают особое положение в этой системе. Расположенные на границе тихоокеанского и арктического бассейнов акватории этих морей находятся под влиянием как процессов северной части Тихого океана, так и циркуляционных особенностей Арктики [2–6].

В ряде работ показано, что изменчивость ледового режима Чукотского моря определяется термическими условиями ледообразования, а также динамическими факторами, включающими дрейф льда, ветровое воздействие и влияние штормовой активности [2, 7, 8]. Существенную роль в вариации сроков формирования и разрушения ледяного покрова играют особенности циркуляции вод и теплового режима шельфовых областей. Отдельное направление исследований связано с анализом пространственно-временной сопряженности ледовых условий арктического и тихоокеанского бассейнов. Ледовые процессы в морях Восточной Арктики характеризуются выраженной связанностью и отражают влияние крупномасштабных атмосферных и гидросферных процессов. Наличие статистических связей между ледовыми условиями различных морей может свидетельствовать о существовании общих климатических механизмов формирования ледового режима [9, 10].

В работах В.В. Плотникова, Н.М. Вакульской и В.И. Пустошновой (2012, 2014) проведён анализ пространственно-временной сопряженности эволюции ледовых условий Берингова моря с ледовыми условиями морей восточного сектора Арктики и северо-западной части Тихого океана. В результате показано, что между ледовыми процессами морей наблюдаются как положительные, так и отрицательные связи, при этом их направленность зависит от временного смещения. В целом для системы характерна противофазность ледовых условий Берингова моря относительно соседних акваторий, однако при временном сдвиге наблюдаются положительные связи. В частности, увеличение ледовитости Берингова моря сопровождается последующим ростом ледовитости в Чукотском море, тогда как положительные аномалии ледовитости в Чукотском море в летне-осенний период (июнь–ноябрь) приводят к снижению ледовитости в Беринговом море в зимне-весенний период (декабрь–май), что объясняет квазидвухлетнюю цикличность изменчивости ледовых процессов [9, 10].

Вместе с тем ряд вопросов, связанных с сезонной структурой статистических взаимосвязей ледовитости этих морей и особенностями их проявления в различные фазы ледового цикла, остаётся недостаточно изученным. Особый интерес представляет анализ согласованности ледовых процессов в Беринговом и Чукотском морях в межсезонные периоды, когда изменчивость ледовитости более выражена. При этом необходимо учитывать общую тенденцию сокращения ледовитости с 1980-х гг. по настоящее время. Исследование данных взаимосвязей имеет важное значение как для понимания механизмов формирования ледового режима в регионе, так и для разработки методов долгосрочного прогнозирования ледовых условий.

Цель настоящей работы – охарактеризовать внутрисезонную и межсезонную структуру статистических связей ледовитости Берингова и Чукотского морей и оценить её сопряжённость с температурой воздуха и поверхности моря в современный период климатических изменений.

Материалы и методы

При проведении исследования использовались данные площади ледяного покрова Sea Ice Index, Version 3 (SII) Национального центра данных по снегу и льду (National Snow and Ice Data Center, NSIDC; https://nsidc.org/data/seaice_index), основанные на спутниковых измерениях пассивной микроволновой радиометрии Nimbus-7 SMMR и DMSR SSM/I–SSMIS и представленные на полярной стереографической сетке NSIDC с пространственным разрешением 25 км. Данные SII имеют ограничения, связанные с особенностями пассивно-микроволновых измерений. При разрешении 25 км небольшие участки льда, включая узкие заливы и тонкий припай, могут не учитываться либо усредняться с окружающей открытой водой. Алгоритм NASA Team также чувствителен к наличию талой воды на поверхности льда и атмосферным помехам, что может влиять на оценку сплоченности и вычисленную площадь ледяного покрова [11].

В работе рассматривались ледовые сезоны 1979/80–2023/24 гг. (сентябрь–август), что обеспечивает 45 значений для помесечных сопоставлений. При анализе связи с первой половиной следующего ледового сезона использовались 44 последовательные межсезонные пары; ледовый сезон обозначался годом его начала. Исходный ряд SII начинается в ноябре 1978 г. Данные Nimbus-7 SMMR до 20 августа 1987 г. имеют двухсуточную дискретность, а последующие данные SSM/I–SSMIS – суточную [12]. Пропуск с 3 декабря 1987 г. по 13 января 1988 г. восстанавливался линейной интерполяцией. На основе суточных и двухсуточных рядов вычислялись среднемесячные значения площади льда. Кроме того, рассчитывались среднесезонные значения и средние площади льда для фаз развития, сезонного максимума и разрушения ледяного покрова. Обработка исходных данных и вычисление площади ледяного покрова выполнялись с помощью программного обеспечения «Ice Data Processing» [13].

Для характеристики атмосферного термического режима использовалась среднемесячная температура приземного воздуха (ТПВ) на высоте 2 м из реанализа ERA5 [14, 15] Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Данные ERA5 охватывают период с 1940 г., имеют глобальное покрытие и предоставляются на регулярной сетке 0.25° . Для каждого моря рассчитывалось пространственное среднее по его акватории в принятых границах. Реанализ ERA5 использует современную систему ассимиляции наблюдений и обеспечивает более согласованное описание атмосферных условий по сравнению с предыдущими глобальными реанализами (ERAInterim, JRA55, NCEP/NCAR), что подтверждается рядом валидационных исследований, выполненных ECMWF и независимыми научными коллективами [14].

Для анализа термического состояния морской поверхности использовались суточные данные температуры поверхности моря (ТПМ) глобального продукта OSTIA (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis) [16]. OSTIA объединяет спутниковые инфракрасные и микроволновые измерения с данными дрейфующих буёв, стационарных платформ и судовых наблюдений и предоставляет сглаженные поля на регулярной сетке 0.05° . Для сопоставления с ледовыми характеристиками вычислялись среднемесячные значения ТПМ северо-восточного шельфа Берингова моря. Анализ с использованием OSTIA ограничен полными годами 1982–2023. Обработка данных ТПВ и ТПМ выполнялась с помощью программного обеспечения «NetCDF Processing» [17].

Расчёты параметров Берингова и Чукотского морей проводились в границах, утверждённых Главным управлением навигации и океанографии [18] (рис. 1). Линейные связи оценивались коэффициентом корреляции Пирсона; статистическая значимость отдельных коэффициентов оценивалась при двустороннем уровне доверия 95 %. Для помесечных рядов 1979/80–2023/24 гг. число наблюдений составляло 45, для последовательных межсезонных пар – 44, а для сопоставлений с OSTIA

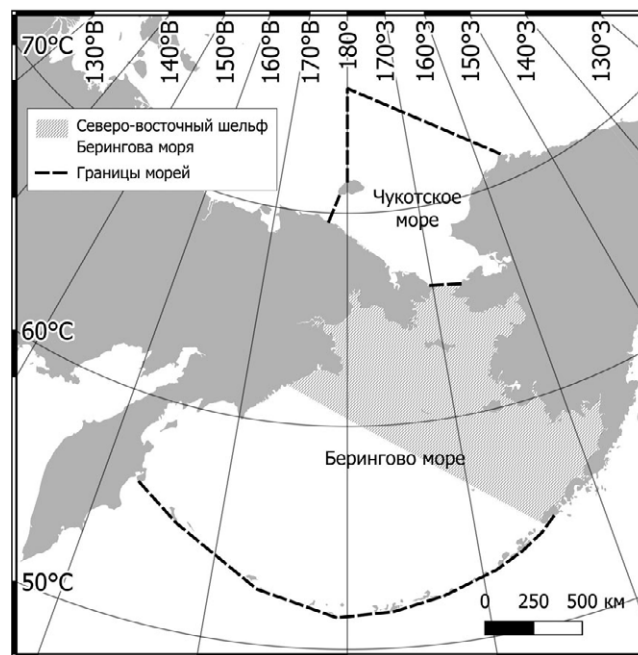


Рис. 1. Границы Берингова и Чукотского морей [18]. Штриховкой обозначен район северо-восточного шельфа Берингова моря.

Fig. 1. Boundaries of the Bering and Chukchi Seas [18]. The hatched area indicates the northeastern Bering Sea shelf.

за 1982–2023 гг. – 42. Корреляционные матрицы включают большое число попарных сопоставлений, поэтому их интерпретация основывалась не только на значимости отдельных коэффициентов, но и на их величине, сезонной согласованности и физической обоснованности выявленных связей. Для оценки условной линейной связи между ледовитостью морей при контроле температурного фактора применялась частичная корреляция, эквивалентная корреляции между остатками регрессий исследуемых переменных на контролируемый параметр. Частичная корреляция характеризует остаточную линейную связь между двумя переменными после исключения линейного влияния контролируемого фактора.

При сравнительном анализе межгодовой изменчивости ТПМ, ТПВ и показателей ледовитости использовались стандартизированные аномалии, которые рассчитывались по формуле:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}, \quad (1)$$

где z_i – стандартизированная аномалия показателя в i -й год; x_i – значение показателя в i -й год;

$\bar{x}$ – среднее значение показателя за рассматриваемый период; σ – среднеквадратическое отклонение показателя.

Результаты

Ледовый период Чукотского и Берингова морей включает практически все месяцы года. Исключением является август в Беринговом море, когда морской лёд в акватории не наблюдается (рис. 2). При анализе внутрисезонного хода ледовитости были выделены следующие основные фазы: для Чукотского моря – фаза развития ледяного покрова (сентябрь–декабрь), фаза полного заполнения акватории льдом (январь–апрель) и фаза разрушения ледяного покрова (май–август); для Берингова моря – фаза развития (сентябрь–январь), фаза сезонного максимума (февраль–март) и фаза разрушения (апрель–июль).

В рассматриваемых периодах в Чукотском море сентябрь занимает переходное положение между завершающей стадией фазы разрушения ледяного покрова и началом его сезонного развития. Начало роста площади льда приходится на 2–3 декаду сентября: по ряду 1979–2024 гг. – с 20 сентября, по норме 1981–2010 гг. – с 19 сентября, по норме

1991–2020 гг. – с 24 сентября. В связи с этим сентябрь в Чукотском море отнесен к фазе развития ледяного покрова.

Анализ внутрисезонной изменчивости показал, что при месячной дискретности сроки смены фаз для климатических норм 1981–2010 и 1991–2020 гг. совпадают, что, однако, не исключает возможных смещений на более мелких временных масштабах. Для нормы 1991–2020 гг. максимальная сезонная площадь льда в Беринговом море составила 707.8 тыс. км², что на 4.4 % ниже значения для нормы 1981–2010 гг. (740.3 тыс. км²). В Чукотском море наиболее выраженное уменьшение площади льда отмечено на фазе развития в сентябре (55.2 %), октябре–ноябре (23.4–24.4 %) и декабре (10.2 %), а на фазе разрушения – в мае–июне (12.7–14.7 %) и июле (26.6 %).

При анализе многолетней изменчивости сезонных фаз в качестве основного показателя использовалась средняя ледовитость, нормированная к интервалу [0, 1] (рис. 3). Коэффициент корреляции между средней ледовитостью на фазе развития в Беринговом и Чукотском морях составляет 0.51, а на фазе разрушения – 0.59.

При интерпретации фазовых коэффициентов корреляции следует учитывать, что их величина может частично определяться наличием

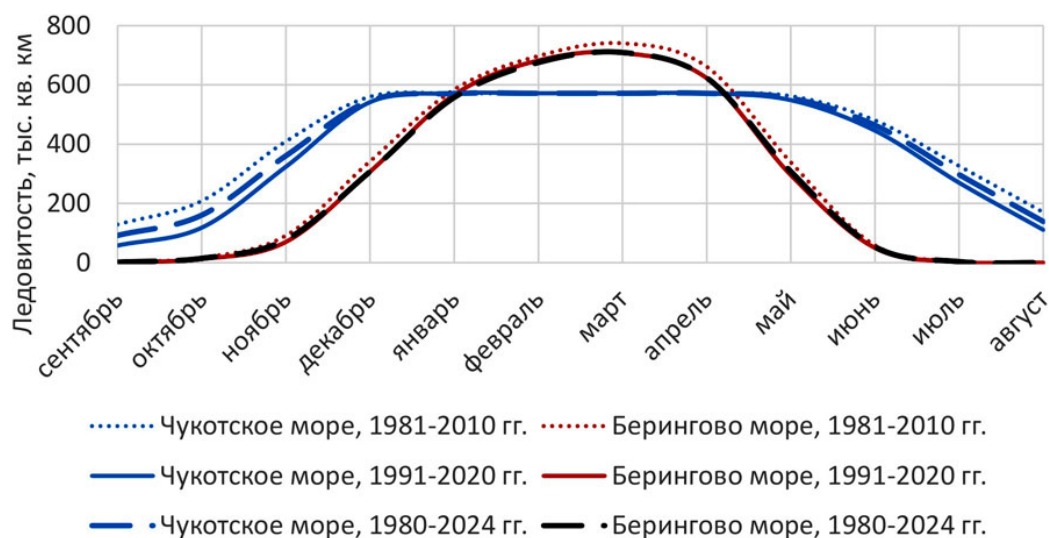


Рис. 2. Внутрисезонная площадь ледяного покрова Берингова и Чукотского морей, вычисленная относительно климатических норм 1981–2010 гг., 1991–2020 гг. и периода 1979–2024 гг.

Fig. 2. Intraseasonal sea ice extent in the Bering and Chukchi Seas relative to the 1981–2010 and 1991–2020 climatological periods and for 1979–2024.



Рис. 3. Многолетняя изменчивость нормированной средней площади льда Берингова и Чукотского морей в период 1979–2024 гг.: фаза развития ледяного покрова (а), фаза полного заполнения акватории и сезонного максимума (б) и фаза разрушения (в).

Fig. 3. Long-term variability in normalized mean sea ice extent in the Bering and Chukchi Seas during 1979–2024: ice growth phase (а), phase of complete ice cover in the Chukchi Sea and seasonal maximum phase in the Bering Sea (б), and ice decay phase (в).

однонаправленных долговременных изменений ледовитости в обоих морях. В связи с этим полученные значения рассматривались не как прямое свидетельство причинной связи между ледовыми условиями двух акваторий, а как интегральная характеристика сопряжённой многолетней изменчивости ледовитости. Дополнительное влияние оказывает выраженная сезонная неоднородность ледового режима: в переходные периоды межгодовая дисперсия площади льда возрастает, тогда как при близком к полному заполнению акватории льдом или при околонулевой ледовитости диапазон значений ограничен. Поэтому дальнейшая интерпретация корреляционных связей основывалась не только на величине коэффициентов, но и на их сезонной согласованности, устойчивости в смежные месяцы и физической обоснованности выявленных зависимостей.

Межсезонное сравнение фаз выявило более слабые связи: коэффициент корреляции между фазой разрушения в Чукотском море и фазой развития в Беринговом составил 0.42, а между фазой разрушения в Беринговом море и фазой развития в Чукотском – 0.45. Эти значения указывают на возможную дополнительную информативность фазовых показателей, однако их практическая прогностическая ценность требует проверки на независимых данных. Коэффициенты превышают крити-

ческое значение корреляции Пирсона около 0.29 при уровне доверия 95 % для рядов длиной в 45 значений.

Экстремальные минимумы в обоих морях совпали для фазы развития и для сочетания фазы полного заполнения акватории Чукотского моря с сезонным максимумом Берингова моря 2017/18 гг. Минимум фазы разрушения в Чукотском море наблюдался на один сезон позже соответствующего минимума в Беринговом море 2018/19 гг.

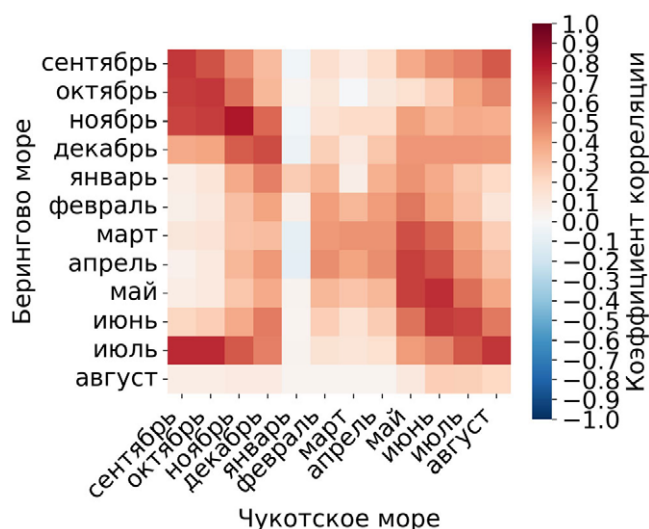


Рис. 4. Корреляционная матрица внутрисезонных взаимосвязей среднемесячной ледовитости Берингова и Чукотского морей в период 1979/80–2023/24 гг.

Fig. 4. Correlation matrix of intraseasonal relationships between monthly mean sea ice extent in the Bering and Chukchi Seas during the 1979/80–2023/24 ice seasons.

Корреляционный анализ внутрисезонных связей среднемесячной площади льда Берингова и Чукотского морей показал, что максимальные коэффициенты сосредоточены вдоль сезонной диагонали «осень–осень, весна–весна, лето–лето» (рис. 4). Смещение отдельных максимумов на 1–2 месяца указывает на запаздывание реакции ледовых процессов одного моря относительно другого.

Наиболее высокие коэффициенты наблюдаются на фазе развития для сентября (0.71), октября (0.71), ноября (0.81) и декабря (0.65), а с учётом временного смещения – для комбинаций месяцев сентябрь–октябрь (0.64–0.71), октябрь–ноябрь (0.55–0.69) и ноябрь–декабрь (0.58–0.60) (рис. 4). На диаграммах рассеяния для осенне-зимнего периода прослеживается общая положительная направленность связей между показателями сентября, октября, ноября (рис. 5, а) и показателями сентября–октября и октября–ноября Берингова и Чукотского морей (рис. 5, б). Для ноября коэффициент детерминации R^2 составляет 0.66, что указывает на выраженную линейную составляющую связи в период активного развития ледяного покрова.

Следует учитывать, что сентябрь в Беринговом море соответствует начальному этапу ледового сезона и в отдельные годы характеризуется низкими или околонулевыми значениями площади льда. Поэтому сентябрьские коэффициенты корреляции могут быть чувствительны к межгодовым различиям сроков появления льда и ограниченному диапазону значений. В связи с этим они интерпретировались преимущественно как показатель согласованности начала ледообразования в двух морях, а не как самостоятельное доказательство устойчивой линейной зависимости.

В целом, высокие коэффициенты корреляции в сентябре–декабре согласуются с гипотезой о влиянии общих крупномасштабных атмосферных условий, наиболее изменчивых в переходные сезоны. Осенью повышенная повторяемость глубоких циклонов и усиление меридионального переноса тепла могут приводить к согласованным изменениям состояния атмосферы над обеими акваториями и к синхронной реакции ледяного покрова [19]. Следовательно, выявленная сопряжённость, вероятно, отражает прежде всего действие

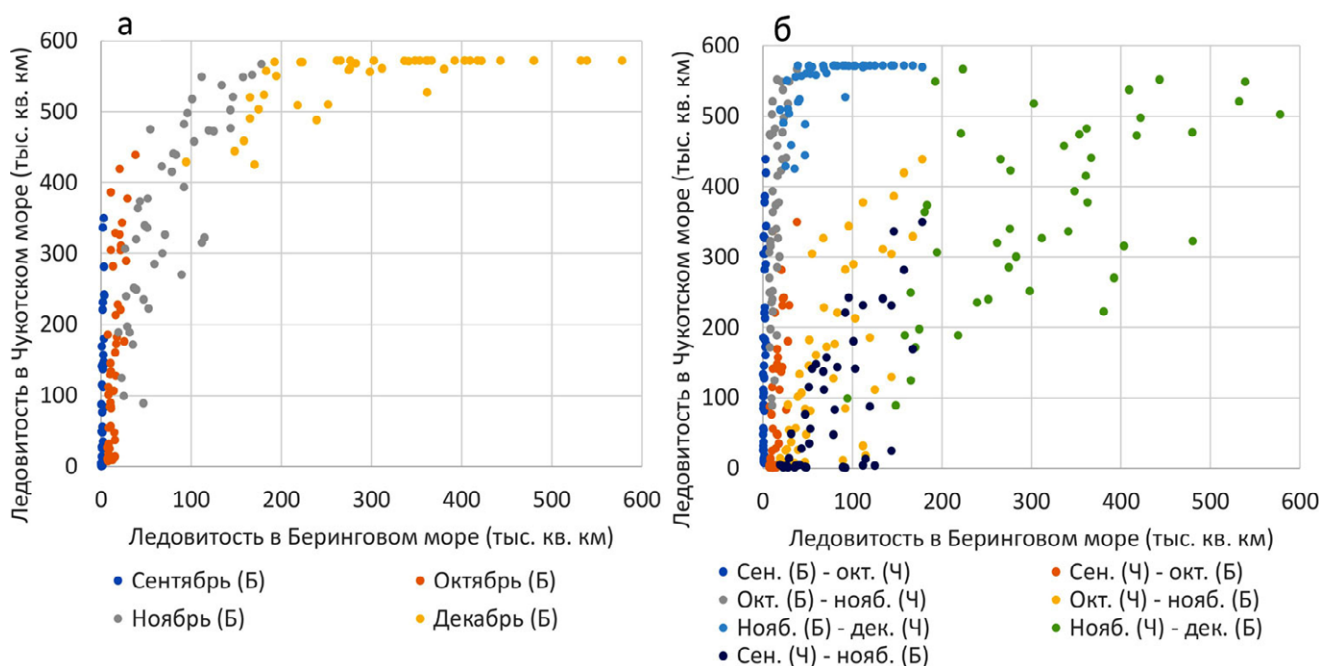


Рис. 5. Диаграммы рассеяния для среднемесячной ледовитости осенне-зимнего периода в Беринговом (Б) и Чукотском (Ч) морях месяц к месяцу (а) и с учётом временного смещения (б) для периода 1979/80–2023/24 гг.

Fig. 5. Scatterplots of monthly mean sea ice extent in the Bering (B) and Chukchi (Ch) Seas during the autumn–winter period: month-to-month relationships (a) and relationships with a time lag (b) for the 1979/80–2023/24 ice seasons.

общих предикторов ледообразования, а не непосредственное влияние ледовых условий одного моря на другое.

После декабря коэффициенты корреляции резко снижаются; более слабые связи с соседними месяцами наблюдаются в январе–марте. Ослабление может быть связано с эффектом насыщения в Чукотском море: при устойчивом заполнении акватории льдом дисперсия интегрального показателя мала, что снижает величину коэффициентов корреляции. Значимый коэффициент 0.54 между февральской площадью льда в Беринговом море и майской площадью льда в Чукотском море указывает на статистическую связь сезонного максимума Берингова моря с началом фазы разрушения ледяного покрова в Чукотском море.

В мае–августе выявлены высокие коэффициенты корреляции, в том числе при временном сдвиге до 2–3 месяцев. Для сопоставлений месяц к месяцу коэффициент корреляции составил 0.68 в мае, 0.70 в июне и 0.62 в июле (рис. 4); для этих месяцев прослеживается близкая к линейной зависимость (рис. 6). Для мая, июня и июля R^2 составляет соответственно 0.46, 0.49 и 0.38. С конца мая начинается активное разрушение ледяного покрова и формируется

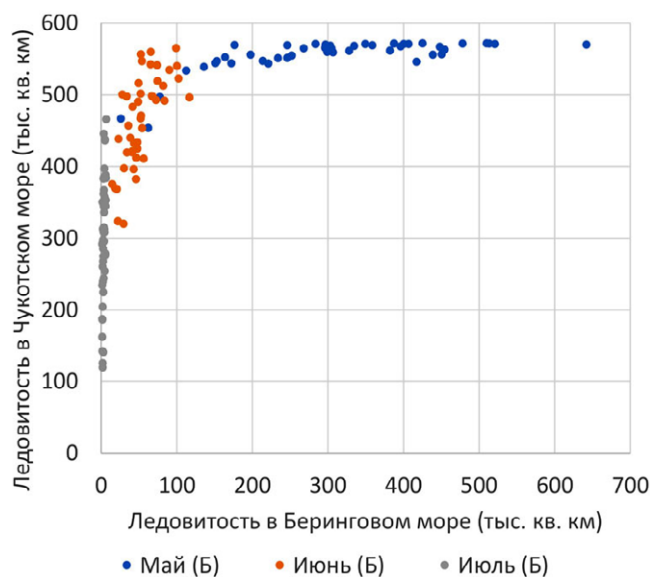


Рис. 6. Диаграмма рассеяния для среднемесячной ледовитости весенне-летнего периода в Беринговом (Б) и Чукотском (Ч) морях месяц к месяцу для периода 1979/80–2023/24 гг.

Fig. 6. Scatterplot of monthly mean sea ice extent in the Bering (B) and Chukchi (Ch) Seas during the spring–summer period for the same calendar months over the 1979/80–2023/24 ice seasons.

область открытой воды в Беринговом проливе и прилегающей южной части Чукотского моря, после чего в июне–июле разрушается припай у восточного побережья Чукотки [20].

При учёте временного сдвига значимые связи между площадью льда Берингова и

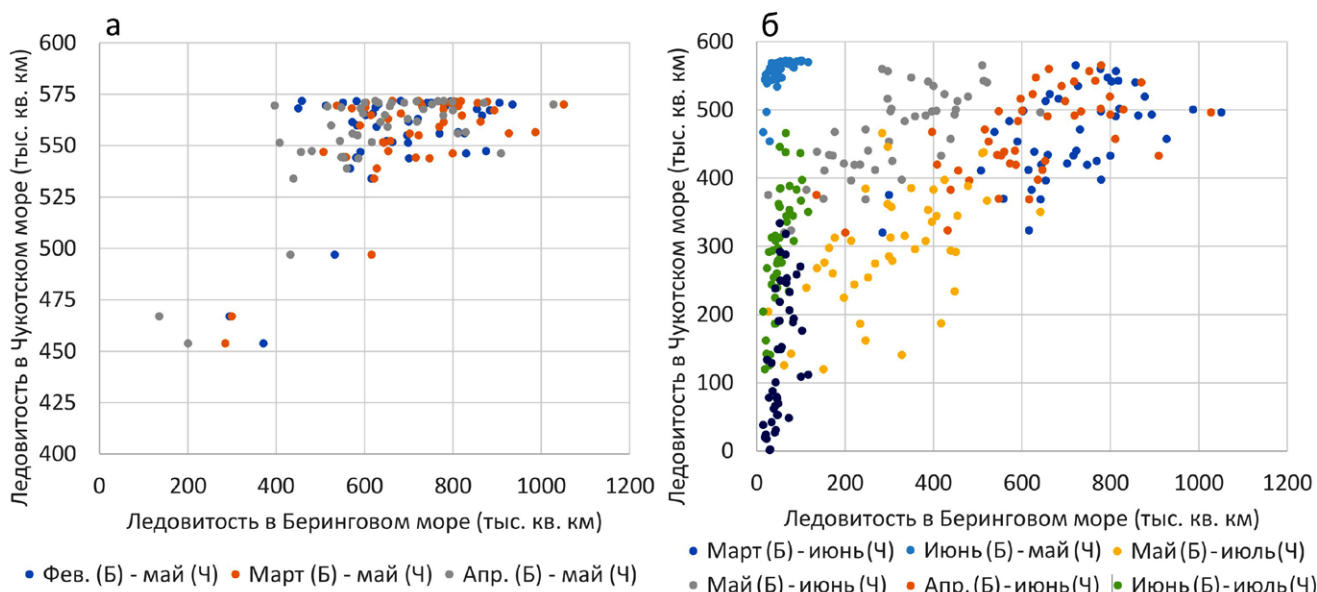


Рис. 7. Диаграммы рассеяния для среднемесячной ледовитости зимне-весеннего и весенне-летнего периодов в Беринговом (Б) и Чукотском (Ч) морях с учётом временного сдвига для периода 1979/80–2023/24 гг.

Fig. 7. Scatterplots of monthly mean sea ice extent in the Bering (B) and Chukchi (Ch) Seas during the winter–spring and spring–summer periods, with allowance for time lags, for the 1979/80–2023/24 ice seasons.

Чукотского морей отмечены для следующих сочетаний: март Берингова моря с маем–июнем Чукотского моря (0.56–0.65), апрель – с маем–июнем (0.63–0.69), май – с июнем–июлем (0.56–0.74), июнь – с маем, июлем и августом (0.52–0.67), июль – с августом (0.72). Для зимне-весенних пар диаграммы рассеяния имеют ограниченный диапазон значений из-за близкой к максимальной ледовитости Чукотского моря и малой межгодовой дисперсии (рис. 7, а). Летом наиболее выраженные линейные связи наблюдаются между июньской ледовитостью Берингова моря и июльской–августовской ледовитостью Чукотского моря (рис. 7, б). В целом весенне-летние связи согласуются с инерционностью сроков разрушения и дрейфа ледяного покрова.

Выявлены устойчивые связи между показателями начала ледового сезона в Чукотском море и завершающей стадией разрушения ледяного покрова в Беринговом, в частности, для комбинаций сентябрь–июль (0.75), октябрь–июль (0.75), декабрь–июнь (0.52) и декабрь–июль (0.51) (рис. 4). Схожая, но менее выраженная связь прослеживается между началом ледообразования в Беринговом море и периодом сезонного минимума в Чукотском

море, в частности: для сентября–июля (0.50), сентября–августа (0.61) и октября–августа (0.49).

Установленные зависимости могут отражать инерционность развития ледовых процессов в системе Берингова и Чукотского морей. Условия начала ледового сезона характеризуют исходное состояние системы «океан–лёд–атмосфера», которое статистически связано с особенностями последующего разрушения ледяного покрова. Наблюдаемая связь согласуется с гипотезой об общности региональных термодинамических условий: более раннее и интенсивное ледообразование в Чукотском море осенью может сопровождаться большим зимним запасом холода, приводя к более позднему разрушению льда в Беринговом море в июне–июле. Для подтверждения этого механизма необходим анализ теплового баланса, циркуляции и дрейфа льда.

Для оценки атмосферного термического фона выполнен анализ связи среднемесячной площади льда Берингова и Чукотского морей со среднемесячной ТПВ (рис. 8). В сентябре–декабре наиболее сильные отрицательные связи выявлены для Чукотского моря: в октябре–ноябре коэффициенты достигают

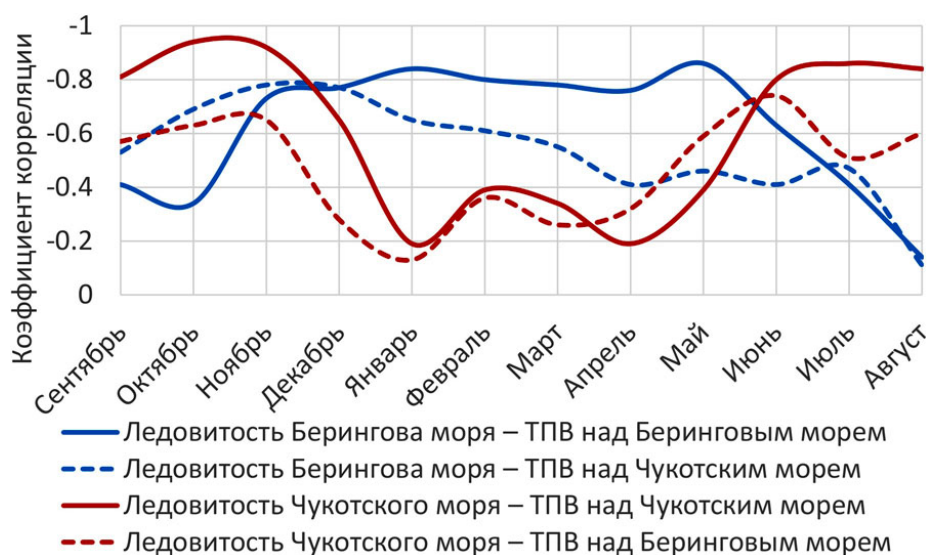


Рис. 8. Коэффициенты корреляции между среднемесячной ледовитостью Берингова, Чукотского морей и среднемесячной ТПВ над соответствующими акваториями по данным реанализа ERA5 (1979/80–2023/24 гг.).

Fig. 8. Correlation coefficients between monthly mean sea ice extent in the Bering and Chukchi Seas and monthly mean 2-m air temperature over the respective sea areas according to ERA5 reanalysis data for the 1979/80–2023/24 ice seasons.

–0.92...–0.94, что указывает на тесную статистическую сопряжённость начального ледообразования с температурой воздуха. В тот же период ледовитость Чукотского моря связана с ТПВ над Беринговым морем (–0.69...–0.78), а ледовитость Берингова моря – с ТПВ над Чукотским морем (–0.57...–0.65). Это указывает на высокую степень пространственной согласованности атмосферных и ледовых условий в регионе в осенне-зимний период.

В январе–марте теснота связей снижается для Чукотского моря до –0.13...–0.39, тогда как для Берингова моря сохраняются коэффициенты –0.78...–0.84. Весной и летом отрицательные корреляции вновь усиливаются: для Берингова моря максимальное по модулю значение отмечено в мае (–0.86), а для Чукотского – в июне–июле (–0.80...–0.86). Таким образом, статистическая связь ТПВ с ледовым режимом наиболее выражена во время формирования и разрушения ледяного покрова и характеризуется заметной межрегиональной согласованностью.

Для оценки роли атмосферного термического фона в формировании сопряжённости ледовых условий был выполнен анализ частичных корреляций $r(X, Y | Z_B)$ и $r(X, Y | Z_C)$ между среднемесячной ледовитостью Берингова и Чукотского морей при исключении линейного влияния показателя ТПВ над Беринговым (Z_B) и Чукотским (Z_C) морями (таблица 1). В качестве исходной характеристики связи между акваториями использовались коэффициенты корреляции $r(X, Y)$ между ледовитостью двух морей. Влияние температурного фактора оценивалось по величине изменения коэффициента связи после исключения соответствующей переменной:

$$\Delta r = r(X, Y | Z_B) - r(X, Y) \quad (2)$$

$$\Delta r = r(X, Y | Z_C) - r(X, Y) \quad (3)$$

где X, Y – ледовитость (тыс. км²) Берингова моря и Чукотского моря соответственно, Z_B, Z_C – ТПВ (°C) над акваторией Берингова и Чукотского морей соответственно.

Частичные корреляции показывают выраженную сезонную неоднородность связи

ТПВ с сопряжённостью ледовых условий. При исключении ТПВ над Беринговым морем коэффициенты осенью снижаются умеренно: Δr составляет –0.07 в сентябре, –0.03 в октябре и –0.16 в ноябре. В декабре частичная корреляция, напротив, возрастает на 0.06, что может отражать эффект подавления или совместное действие других факторов. В целом ТПВ над Беринговым морем связана лишь с частью общей осенней вариации ледовитости двух морей.

При исключении ТПВ над Чукотским морем ослабление связи между акваториями осенью и в начале зимы выражено сильнее: Δr составляет –0.15 в сентябре, –0.47 в октябре, –0.43 в ноябре и –0.34 в декабре. Наибольшее уменьшение приходится на октябрь–ноябрь, период начала ледообразования и интенсивного роста ледовитости в Чукотском море. Это указывает на тесную статистическую связь локального атмосферного термического фона Чукотского моря с осенней сопряжённостью ледовых условий двух бассейнов.

Иная картина наблюдается в весенне-летний период. При исключении ТПВ над Беринговым морем коэффициенты корреляции ледовитости двух морей уменьшаются в мае, июне и июле на –0.26, –0.25 и –0.10 соответственно. Следовательно, ТПВ над Беринговым морем статистически связана с существенной частью синхронной изменчивости площади льда в период разрушения ледяного покрова. При исключении ТПВ над Чукотским морем изменение связи в мае–июне выражено слабее: Δr составляет –0.07 в мае и –0.01 в июне. В июле уменьшение достигает –0.13. Таким образом, весной и летом сопряжённость ледовитости двух морей сильнее связана с ТПВ над Беринговым морем, чем с ТПВ над Чукотским морем.

На рисунке 9 представлены пятилетние скользящие средние стандартизированных аномалий ТПВ над акваториями и ледовитости Берингова и Чукотского морей в ноябре (рис. 9, а) и июне (рис. 9, б). Показатели ТПВ и ледовитости демонстрируют выраженную противофазную изменчивость.

Полученная сезонная асимметрия частичных корреляций показывает, что в разные периоды года сопряжённость ледовитости Берингова и Чукотского морей связана с различными региональными компонентами атмосферного термического фона. Для Чукотского моря наиболее чувствительным периодом в контексте выявленной осенней сопряжённости является начало ледообразования в сентябре–ноябре. В более ранних исследованиях было показано, что в современный период здесь происходит смещение сроков начала ледообразования от сентября к октябрю и полного заполнения моря льдом от ноября к декабрю [7]. В этот же период формируется осенне-зимний ветровой режим с преобладанием ветров северо-восточного, северного и восточного румбов; в октябре–ноябре отмечается усиление ветра, особенно в южной части моря [6]. В таких условиях ТПВ характеризует термический фон начального ледообразования и связана с интенсивностью охлаждения поверхностного слоя и сроками появления льда. Уменьшение корреляции после исключения ТПВ над Чукотским морем в октябре–ноябре согласуется с существенной ролью атмосферного термического фона Чукотского моря в формиро-

вании осенней сопряжённости ледовых условий между рассматриваемыми морями (таблица 1).

На крупномасштабном уровне роль ТПВ над Чукотским морем в осенней связи ледовитости двух акваторий может рассматриваться в контексте циркуляционного режима Восточной Арктики. Для Чукотского моря в более ранних исследованиях была показана сопряжённость типов ледовых условий с типами Арктической осцилляции (АО) в тёплый период года: экстремально положительный тип АО соответствует ледовитым и экстремально ледовитым условиям, а экстремально отрицательный – малоледовитым; при этом влияние зимней фазы АО на ледовые условия июня–ноября выражено слабо [7]. Следовательно, выявленная связь ледовитости с ТПВ над Чукотским морем может отражать не только локальное охлаждение, но и более общий циркуляционный режим Восточной Арктики в период перехода от разрушения льда к его образованию.

В весенне-летний период, напротив, более заметное снижение коэффициентов после исключения ТПВ над Беринговым морем указывает на то, что синхронная изменчивость ледовитости двух морей на фазе разрушения ледяного покрова больше связана с

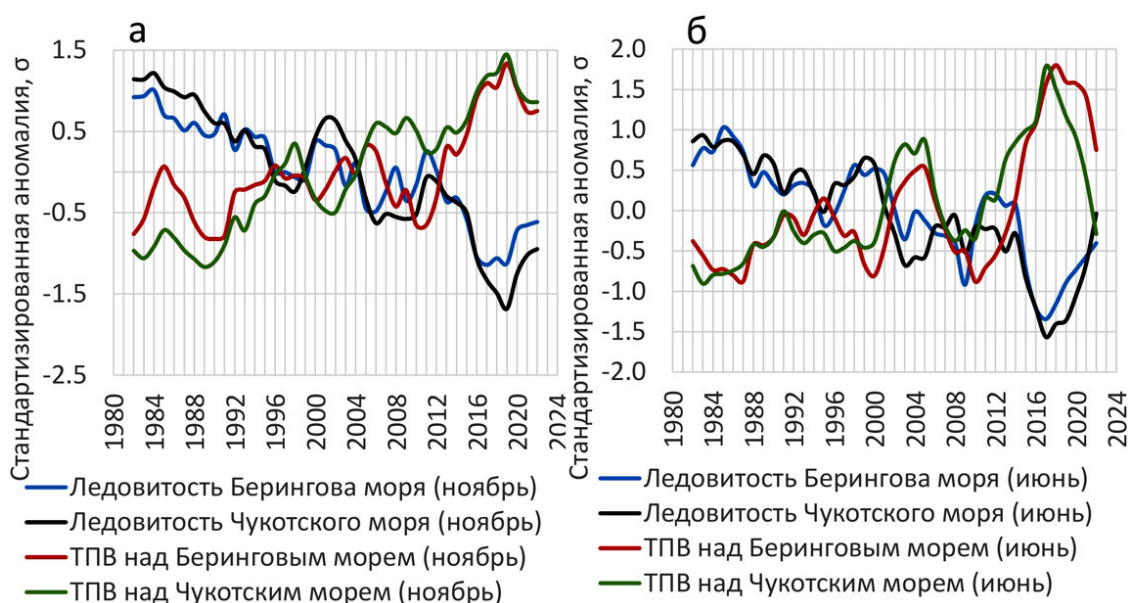


Рис. 9. 5-летнее сглаживание рядов стандартизованных аномалий показателей ТПВ над акваториями и ледовитости Берингова и Чукотского морей в ноябре (а) и июне (б) для периода 1979/80–2023/24 гг.

Fig. 9. Five-year moving averages of standardized anomalies of 2 m air temperature over the Bering and Chukchi Seas and sea ice extent in both seas in November (left) and June (right) during the 1979/80–2023/24 ice seasons.

атмосферным термическим режимом Берингова моря. По результатам исследований С.Ю. Глебовой [19], климатический фон Берингова моря определяется положением и интенсивностью сезонных центров действия атмосферы: в холодный период – Алеутского минимума и северо-восточного отрога Сибирского максимума, в тёплые сезоны – Северотихоокеанского антициклона и ложбины Дальневосточной депрессии. При этом северо-восточный перенос связан с поступлением холодных воздушных масс, юго-восточный перенос способствует адвекции тёплого воздуха, а восточные ветры при южном положении Алеутской депрессии связаны с притоком тёплых океанических вод в западные районы моря через систему течений [19]. Отмеченное в конце 2010-х гг. усиление весеннего северо-восточного переноса и переход весенних сезонов к более «холодному» типу атмосферного режима [19] согласуются с выявленной ролью термического фона над Беринговым морем в весенне-летней сопряжённости ледовитости двух морей. В период разрушения ледяного покрова температура воздуха определяет скорость таяния, сроки освобождения акватории ото льда и последующий прогрев поверхности моря, что объясняет более заметное снижение корреляции при исключении ТПВ над Беринговым морем в мае–июне (таблица 1).

Для выявления межсезонных зависимостей был проведён корреляционный анализ связи среднемесячной ледовитости второй половины ледового сезона (март–август) со среднемесячной ледовитостью первой половины следующего сезона (сентябрь–февраль). Для Берингова моря выявлены высокие коэффициенты корреляции с началом следующего сезона в Чукотском море: май–ноябрь – 0.59; июнь–октябрь – 0.54; июль–ноябрь – 0.63; июль–сентябрь – 0.78; июль–октябрь – 0.79; июль–ноябрь – 0.62 (рис. 10, а). Для межсезонных сочетаний июль–сентябрь и июль–октябрь R^2 составляет 0.61 и 0.62 соответственно. Это указывает на выраженную межсезонную статистическую связь между фазой разрушения ледяного покрова Берингова моря и началом ледообразования в Чукотском море. Наиболее близкие к линейным зависимости отмечены для сочетаний июль–сентябрь, июль–октябрь, июль–ноябрь и июль–ноябрь (рис. 10, б).

Для Чукотского моря также выявлены умеренно высокие коэффициенты корреляции с началом следующего сезона в Беринговом море (рис. 11, а): июль–ноябрь – 0.55; июль–сентябрь – 0.52; июль–октябрь – 0.54; июль–ноябрь – 0.59; август–сентябрь – 0.66; август–октябрь – 0.62; август–ноябрь – 0.61. Августовская ледовитость Чукотского моря

Таблица 1. Частичная корреляция между среднемесячной ледовитостью Берингова моря (X) и Чукотского моря (Y) при исключении линейного влияния среднемесячной ТПВ над Беринговым (Z_B) и Чукотским (Z_C) морями (1979/80–2023/24 гг.)

Table 1. Partial correlations between monthly mean sea ice extent in the Bering Sea (X) and the Chukchi Sea (Y) after removing the linear effect of monthly mean air temperature over the Bering Sea (Z_B) and the Chukchi Sea (Z_C) during the 1979/80–2023/24 ice seasons

Месяц	$r(X,Y)$	$r(X, Y Z_B)$	Δr	$r(X, Y Z_C)$	Δr
Сентябрь	0.71	0.64	–0.07	0.56	–0.15
Октябрь	0.71	0.68	–0.03	0.24	–0.47
Ноябрь	0.81	0.65	–0.16	0.38	–0.43
Декабрь	0.65	0.71	0.06	0.31	–0.34
Май	0.68	0.42	–0.26	0.61	–0.07
Июнь	0.70	0.45	–0.25	0.68	–0.01
Июль	0.62	0.53	–0.10	0.49	–0.13

может рассматриваться как потенциальный предиктор начала ледового сезона в Беринговом море, однако её прогностическая ценность требует независимой проверки. Наиболее вы-

раженная положительная направленность связей отмечена для сочетаний август–сентябрь, июль–сентябрь, июль–октябрь и август–октябрь (рис. 11, б).

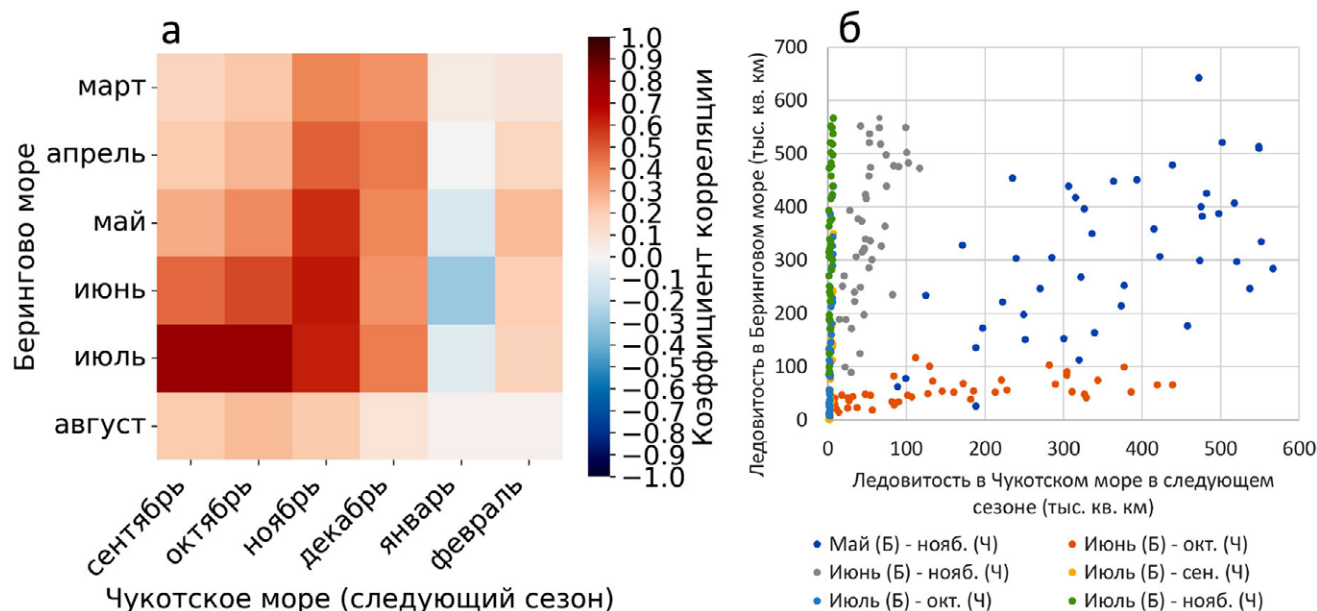


Рис. 10. Корреляционная матрица взаимосвязей (а) и диаграмма рассеяния (б) среднемесячной ледовитости Берингова моря (Б) во второй половине сезона и среднемесячной ледовитости Чукотского моря (Ч) в первой половине следующего сезона в период 1979/80–2023/24 гг.

Fig. 10. Correlation matrix (left) and scatterplot (right) of monthly mean sea ice extent in the Bering Sea during the second half of the ice season and in the Chukchi Sea during the first half of the following ice season for 1979/80–2023/24.

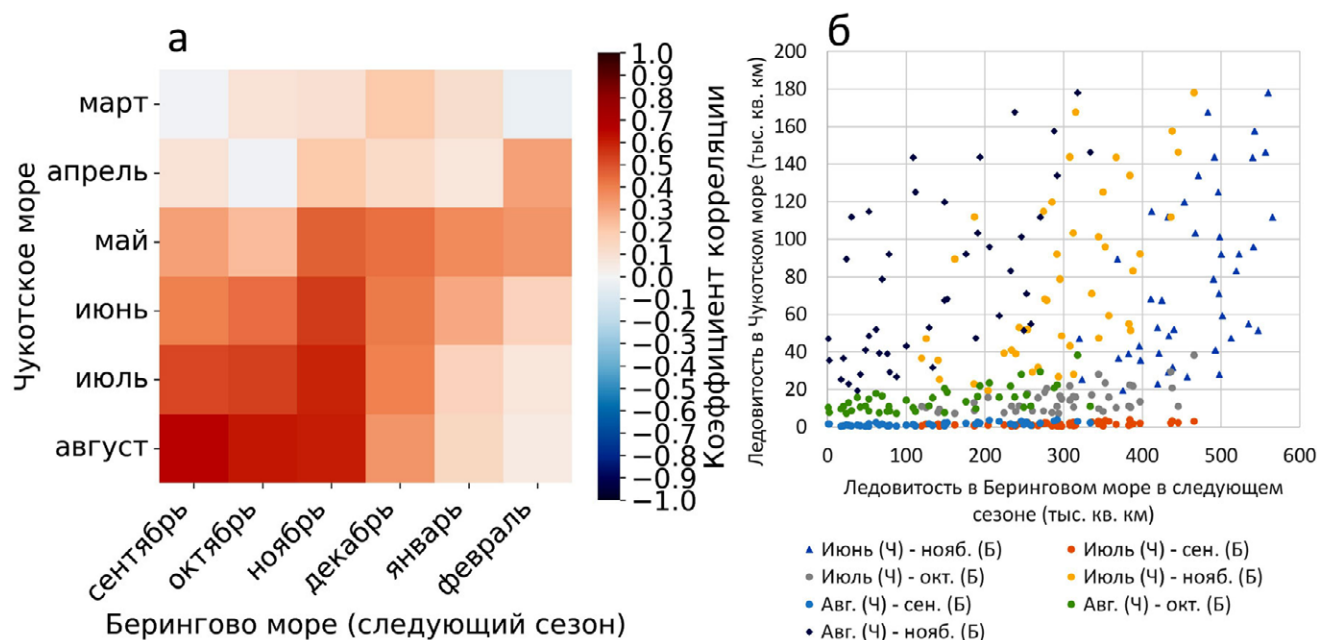


Рис. 11. Корреляционная матрица взаимосвязей (а) и диаграмма рассеяния (б) среднемесячной ледовитости Чукотского моря (Ч) во второй половине сезона и среднемесячной ледовитости Берингова моря (Б) в первой половине следующего сезона в период 1979/80–2023/24 гг.

Fig. 11. Correlation matrix (left) and scatterplot (right) of monthly mean sea ice extent in the Chukchi Sea during the second half of the ice season and in the Bering Sea during the first half of the following ice season for 1979/80–2023/24.

Выявленные межсезонные взаимосвязи показывают, что состояние ледяного покрова на завершающей стадии его разрушения в Беринговом море в летние месяцы связано с условиями начала ледообразования в следующем ледовом сезоне в Чукотском море. Коэффициенты корреляции между площадью ледяного покрова Берингова моря в июне–июле и Чукотского моря в сентябре–ноябре составляют 0.46...0.79, что указывает на наличие устойчивой межсезонной согласованности ледовых процессов в системе рассматриваемых морей. На ранней стадии разрушения ледяного покрова Берингова моря подобная взаимосвязь проявляется менее однозначно: корреляции между площадью льда Берингова моря в мае и Чукотского моря в сентябре–октябре выражены слабее (0.30–0.39), но вместе с тем для пары май–ноябрь коэффициент корреляции достигает 0.59.

Одним из возможных факторов формирования подобной межсезонной сопряжённости может являться термическое состояние шельфовых вод северо-восточной части Берингова моря (рис. 1). Показатель ТПМ в тёплый период (лето – начало осени) может характеризовать тепловое состояние шельфовых вод, формирующееся в предшествующий зимне-весенний период и частично сохраняющееся

летом. Через систему шельфовых течений и водообмен в Беринговом проливе это состояние может быть связано с последующим термическим режимом прилегающей части Чукотского моря.

Корреляционный анализ показал, что показатель ТПМ северо-восточного шельфа Берингова моря в летне-осенний период статистически связан с ледовитостью обоих морей (таблица 2). Для Берингова моря коэффициенты корреляции между летней ледовитостью и ТПМ изменяются в пределах от –0.27 до –0.68 в зависимости от месяца, а для Чукотского моря –0.38...–0.68 для сентября–ноября. Отрицательный знак коэффициентов отражает физически ожидаемую зависимость уменьшения ледяного покрова при повышении температуры поверхностного слоя воды.

Для оценки вклада ТПМ в выявленную межсезонную связь был выполнен анализ частичных корреляций $r(X, Y | Z)$ между ледовитостью Берингова моря (май, июнь, июль) и ледовитостью Чукотского моря (сентябрь–ноябрь) при исключении линейного влияния ТПМ северо-восточного шельфа Берингова моря в июле–сентябре (таблица 3). В качестве исходной характеристики связи между акваториями использовались коэффициенты корреляции $r(X, Y)$ между ледовитостью двух морей.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между среднемесячной ледовитостью Берингова моря на конец сезона, ледовитостью начала сезона в Чукотском море и среднемесячной ТПМ тёплого межсезонного периода на северо-восточном шельфе Берингова моря по данным OSTIA (1982–2023 гг.)

Table 2. Correlation coefficients between monthly mean sea ice extent in the Bering Sea at the end of the ice season, sea ice extent in the Chukchi Sea at the beginning of the ice season, and monthly mean sea surface temperature over the northeastern Bering Sea shelf during the warm interseasonal period according to OSTIA data for 1982–2023

Ледовитость	Среднемесячная температура поверхности воды на северо-восточном шельфе Берингова моря		
	Июль	Август	Сентябрь
Берингово море (май)	–0.67	–0.63	–0.68
Берингово море (июнь)	–0.42	–0.47	–0.55
Берингово море (июль)	–0.27	–0.45	–0.44
Чукотское море (сентябрь)	–0.38	–0.44	–0.48
Чукотское море (октябрь)	–0.48	–0.55	–0.60
Чукотское море (ноябрь)	–0.61	–0.65	–0.68

Расчёты разности коэффициентов Δr выполнялись по формуле:

$$\Delta r = r(X, Y | Z) - r(X, Y), \quad (4)$$

где X , Y – ледовитость (тыс. км²) Берингова моря и Чукотского моря соответственно, Z – ТПМ (°C) шельфовых вод северо-восточной части Берингова моря.

Для сочетаний июль–сентябрь и июль–октябрь исходные коэффициенты корреляции составляют 0.75 и 0.77, а после исключения показателя ТПМ незначительно уменьшаются до

0.69–0.73 и 0.70–0.76 соответственно. Изменение частичных корреляций (Δr) в этих случаях не превышает $-0.01 \dots -0.07$, поэтому выбранные показатели ТПМ статистически связаны лишь с небольшой частью межсезонной сопряжённости для этих сочетаний. Для пары июль–ноябрь исходная корреляция 0.59 уменьшается до 0.43–0.55 при изменении коэффициентов корреляции $-0.04 \dots -0.16$, что указывает на постепенное увеличение роли термического состояния шельфовых вод по мере развития осенних ледовых процессов.

Таблица 3. Частичная корреляция между среднемесячной ледовитостью Берингова моря на конец сезона (X) и среднемесячной ледовитостью начала сезона в Чукотском море (Y) при исключении линейного влияния среднемесячной ТПМ на северо-восточном шельфе Берингова моря тёплого межсезонного периода (Z) по данным OSTIA (1982–2023 гг.)

Table 3. Partial correlations between monthly mean late-season sea ice extent in the Bering Sea (X) and monthly mean early-season sea ice extent in the Chukchi Sea (Y) after removing the linear effect of monthly mean sea surface temperature over the northeastern Bering Sea shelf during the warm interseasonal period (Z), according to OSTIA data for 1982–2023

Ледовитость Берингова моря (X)	Ледовитость Чукотского моря (Y)	ТПМ северо-восточного шельфа Берингова моря (Z)	$r(X, Y)$	$r(X, Y Z)$	Δr
май	ноябрь	июль	0.61	0.34	–0.27
май	ноябрь	август	0.61	0.34	–0.27
май	ноябрь	сентябрь	0.61	0.27	–0.34
июнь	сентябрь	июль	0.46	0.36	–0.10
июнь	сентябрь	август	0.46	0.32	–0.14
июнь	сентябрь	сентябрь	0.46	0.27	–0.19
июнь	октябрь	июль	0.54	0.42	–0.12
июнь	октябрь	август	0.54	0.38	–0.16
июнь	октябрь	сентябрь	0.54	0.31	–0.23
июнь	ноябрь	июль	0.64	0.54	–0.11
июнь	ноябрь	август	0.64	0.50	–0.14
июнь	ноябрь	сентябрь	0.64	0.43	–0.21
июль	сентябрь	июль	0.75	0.73	–0.02
июль	сентябрь	август	0.75	0.69	–0.06
июль	сентябрь	сентябрь	0.75	0.69	–0.06
июль	октябрь	июль	0.77	0.76	–0.01
июль	октябрь	август	0.77	0.70	–0.07
июль	октябрь	сентябрь	0.77	0.71	–0.06
июль	ноябрь	июль	0.59	0.55	–0.04
июль	ноябрь	август	0.59	0.43	–0.16
июль	ноябрь	сентябрь	0.59	0.44	–0.15

Для сочетаний июня с сентябрём–ноябрём исходные коэффициенты корреляции составляют 0.46–0.64. После исключения влияния показателя ТПМ частичные корреляции уменьшаются до 0.27–0.54, а изменение составляет $-0.10\dots-0.21$. Следовательно, для июньских сочетаний месяцев вклад температурного фактора оказывается более заметным, чем для большинства июльских, но также не полностью объясняет наблюдаемую межсезонную взаимосвязь.

Наиболее выраженное уменьшение частичной корреляции наблюдается для сочетания май–ноябрь: исходный коэффициент 0.61 снижается до 0.27–0.34 после исключения влияния показателя ТПМ. Это указывает на сравнительно более значительную роль термического состояния вод для формирования позднеосенних ледовых условий в Чукотском море при увеличении временного интервала между рассматриваемыми фазами ледового режима.

Выявленная межсезонная статистическая связь между летней ледовитостью Берингова моря и осенним ледообразованием в Чукотском море может отражать действие адвективного механизма переноса тепла через северо-восточный шельф Берингова моря и Берингов пролив. Конфигурация течений на северо-восточном шельфе Берингова моря включает несколько ключевых элементов: Аляскинское прибрежное течение – мощный поток относительно тёплых и пресных вод, следующий вдоль побережья Аляски и аккумулирующий солнечное тепло в летний период [21]; пролив Шпанберга (между о. Св. Лаврентия и материковой Аляской) – основной канал транзита шельфовых вод на север, где средняя скорость течения достигает 6.8 см/с, а поток чувствителен к локальным ветровым воздействиям [22]; залив Нортон – область временного удержания и ветрового перераспределения прибрежных вод (ветры южных румбов усиливают перенос вод через залив в сторону Берингова пролива, тогда как при ветрах северных румбов возможно усиление прибрежного удержания вод и перестройка циркуляции) [23].

После прохождения Берингова пролива тихоокеанские воды претерпевают бифуркацию: западная ветвь следует к о. Врангеля, а восточная – вдоль побережья Аляски к каньону Барроу [22]. Именно восточная ветвь переносит основную массу тепла, аккумулированного на северо-восточном шельфе Берингова моря, в центральные районы Чукотского моря, создавая термический фактор, сдерживающий начало устойчивого ледообразования [6, 24].

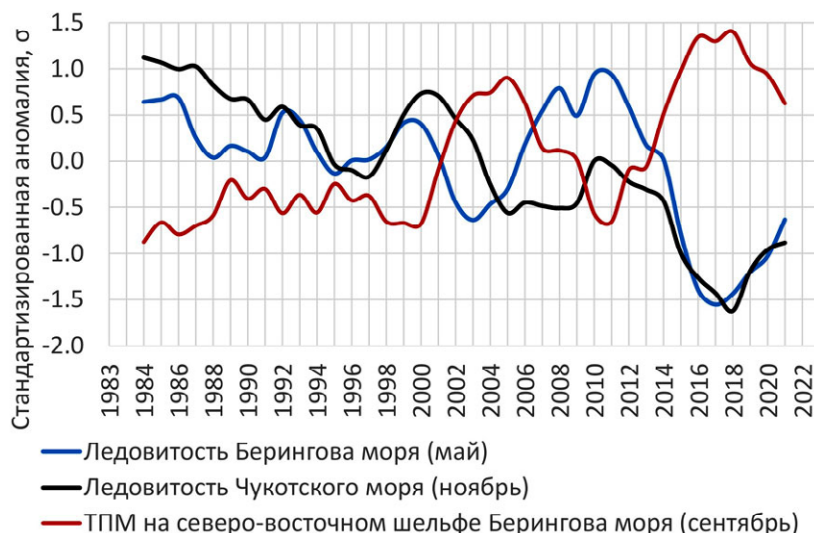
Статистическим подтверждением участия этого механизма служат результаты частичного корреляционного анализа (таблица 3): исключение влияния ТПМ северо-восточного шельфа Берингова моря заметно ослабляет межсезонную связь, особенно для мая–ноября (при Δt в интервале $-0.27\dots-0.34$). Следовательно, тепловое состояние шельфовых вод летом является измеримым предиктором теплосодержания вод, поступающих в Чукотское море осенью.

Полученный результат согласуется с представлениями об «океанической памяти» шельфовых вод северной части Берингова моря и летнем переносе относительно тёплых тихоокеанских вод через Берингов пролив в Чукотское море [5, 20–22, 25, 26]. Дополнительным аргументом служат независимые оценки водообмена через Берингов пролив: в начале XXI века объёмный перенос тихоокеанских вод из Берингова моря в Арктику увеличился примерно с 0.7 до 1.1 Св, что сопровождалось ростом потоков тепла и пресной воды [27, 28]. В сочетании с отмеченными для Чукотского моря изменениями гидрометеорологического режима и сроков сезонного ледообразования [6, 7] это позволяет рассматривать выявленную межсезонную зависимость как статистическое отражение физически обоснованной связи между тепловым состоянием шельфовых вод Берингова моря, водообменом через Берингов пролив и осенним ледообразованием в Чукотском море.

На рисунке 12 представлены пятилетние скользящие средние стандартизированных аномалий сентябрьской ТПМ северо-восточного шельфа Берингова моря, ледовитости

Рис. 12. 5-летнее сглаживание рядов стандартизованных аномалий ТПМ северо-восточного шельфа Берингова моря в сентябре, ледовитости Берингова моря в мае предыдущего сезона и ледовитости Чукотского моря в ноябре для периода 1983–2023 гг.

Fig. 12. Five-year moving averages of standardized anomalies of sea surface temperature over the northeastern Bering Sea shelf in September, sea ice extent in the Bering Sea in May of the preceding season, and sea ice extent in the Chukchi Sea in November for 1983–2023.



Берингова моря в мае предыдущего сезона и ледовитости Чукотского моря в ноябре за 1983–2023 гг. Ледовитость и ТПМ демонстрируют выраженную противофазную изменчивость.

В целом результаты показывают, что ТПМ северо-восточного шельфа Берингова моря статистически связана лишь с частью наблюдаемой межсезонной сопряжённости ледовых условий Берингова и Чукотского морей. Основная же часть статистической связи формируется под воздействием более сложного комплекса процессов, включающих особенности атмосферной циркуляции в переходный период. Таким образом, летняя ледовитость Берингова моря может рассматриваться как потенциальный интегральный предиктор начальных ледовых условий в Чукотском море, однако для практического прогнозирования необходима его независимая валидация.

Обсуждение

В работе оценена внутрисезонная и межсезонная согласованность ледовых режимов Берингова и Чукотского морей за современный спутниковый период 1979/80–2023/24 гг. Анализ среднемесячных рядов Sea Ice Index, ERA5 и OSTIA выявил сезонно изменяющиеся статистические связи ледовитости с температурой воздуха и поверхности моря. Частичная корреляция позволила оценить условную линейную связь температурных факторов с сопряжённо-

стью ледовых показателей, но не заменяет анализа физических причинных механизмов.

Полученные результаты показывают, что сопряжённость ледовых условий Берингова и Чукотского морей проявляется в разные фазы сезона и, вероятно, формируется сочетанием общих атмосферных условий, тепловой инерции океана и динамики льда. Наиболее устойчивые внутрисезонные связи наблюдаются в переходные периоды, когда межгодовая изменчивость площади льда велика.

Установлена межсезонная статистическая связь между ледовитостью Берингова моря в весенне-летний период (фаза разрушения ледяного покрова) и формированием ледяного покрова в Чукотском море в начале следующего ледового сезона. ТПМ северо-восточного шельфа Берингова моря вносит значимый вклад в формирование данной зависимости, отражая роль предшествующего теплового состояния вод. При этом сохранение статистически значимых связей после исключения данного фактора указывает на возможное участие других процессов, включая атмосферную циркуляцию, перенос водных масс и дрейф льда в районе Берингова пролива.

Анализ связи ледовитости с ТПВ выявил выраженную сезонную асимметрию вклада температурных факторов, определяющих сопряжённость ледовых условий. В осенне-зимний период (октябрь–декабрь) ведущую роль играет термический режим атмосферы над

Чукотским морем, тогда как в весенне-летний период (май–июль) более значимым становится влияние температурных условий над Беринговым морем.

Таким образом, статистическая сопряжённость ледовых режимов Берингова и Чукотского морей сочетает внутрисезонную инерционность, межсезонную согласованность и сезонно изменяющиеся температурные связи. Ледовитость Берингова моря в весенне-летний период может служить индикатором состояния региональной системы «океан–лёд–атмосфера» и кандидатным предиктором начальных условий следующего ледового сезона в Чукотском море.

Заключение

Полученные результаты подчёркивают сложную природу межрегиональных связей и формируют основу для разработки методов сезонного прогнозирования ледовитости. Следующим этапом должна стать проверка прогностической устойчивости выявленных связей на независимых периодах с учётом крупномасштабной атмосферной циркуляции, переноса вод и дрейфа льда через Берингов пролив.

Кратко основные выводы исследования можно сформулировать так:

1. Выявлена устойчивая внутрисезонная статистическая согласованность ледовых процессов Берингова и Чукотского морей, наиболее выраженная в переходные периоды ледового сезона.

2. Установлена межсезонная статистическая связь между ледовитостью Берингова моря на фазе разрушения и начальным ледообразованием в Чукотском море в начале следующего ледового сезона; температура поверхности воды северо-восточного шельфа Берингова моря вносит значимый вклад в формирование данной зависимости, отражая роль теплового состояния вод в тёплый межсезонный период.

3. Выявлена сезонная асимметрия температурных связей: осенью и в начале зимы сопряжённость ледовых условий сильнее связана

с температурой приземного воздуха над Чукотским морем, а весной и летом – с температурой приземного воздуха над Беринговым морем.

Список литературы

1. Матвеева Т.А., Семенов В.А., Астафьева Е.С. Ледовитость арктических морей и её связь с приземной температурой воздуха в Северном полушарии. *Лёд и Снег*. 2020,60(1):134–148. <https://doi.org/10.31857/S2076673420010029>; EDN: NEJLMZ
2. Плотников В.В., Вакульская Н.М., Лукьянова Н.Б. Об изменчивости ледовых условий Чукотского моря и ее связи с крупномасштабной циркуляцией атмосферы. *Метеорология и гидрология*. 2006,12:65–74. EDN: JSGSPL
3. Басюк Е.О., Хен Г.В., Ванин Н.С. Изменчивость океанологических условий Берингова моря в 2002–2006 гг. *Известия ТИНРО*. 2007,151:290–311. EDN: IMPGAX
4. Вакульская Н.М., Плотников В.В. Оценки параметров состояния ледяного покрова Берингова моря. *Криосфера Земли*. 2014,18(1):92–100. EDN: RXDUGF
5. Басюк Е.О., Зуенко Ю.И. Берингово море 2018 – экстремально малоледовитый и тёплый год. *Известия ТИНРО*. 2019,198:119–142. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2019-198-119-142>; EDN: DRRRKW
6. Плотников В.В., Вражкин А.Н., Мезенцева Л.И., Друзь Н.И., Вакульская Н.М., Дубина В.А. Изменчивость гидрометеорологического режима морей восточного сектора Арктики (Восточно-Сибирское, Чукотское) в современный период. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020,331(7):103–115. <https://doi.org/10.1879/9/24131830/2020/7/2723>
7. Плотников В.В., Вакульская Н.М., Мезенцева Л.И., Дубина В.А., Пустошнова В.И. Изменчивость ледовых условий в Чукотском море и их связь с Арктической осцилляцией. *Известия ТИНРО*. 2020,200(1):155–167. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2020-200-155-167>
8. Мысленков С.А., Круглова Е.Е., Багатинский В.А. Повторяемость штормового волнения в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2024,1(391):41–55. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-1-41-55>
9. Плотников В.В., Пустошнова В.И. Изменчивость и сопряжённость ледовых условий в системе морей Восточной Арктики (Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское). *Метеорология и гидрология*. 2012,7:54–65. EDN: PBJBET

10. Вакульская Н.М., Плотников В.В., Пустошнова В.И. Сопреженность ледовых условий Берингова моря с ледовыми условиями в морях восточного сектора Арктики и тихоокеанского бассейна. *Вестник ДВО РАН*. 2014,5:18–24.
11. Алексеева Т.А., Раев М.Д., Тихонов В.В., Соколова Ю.В., Шарков Е.А., Фролов С.В., Сероветников С.С. Сравнительный анализ площади морского льда в Арктике, полученной по данным спутниковой микроволновой радиометрии (алгоритм VASIA2), с ледовыми картами ААНИИ. *Исследование Земли из космоса*. 2020,6:17–23. <https://doi.org/10.31857/S0205961420060020>; EDN: WBMOCF
12. Fetterer F., Knowles K., Meier W.N., Savoie M., Windnagel A.K. Sea Ice Index, Version 3 [Data set]. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center, 2017. <https://doi.org/10.7265/N5K072F8>
13. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023688937. «Ice Data Processing». Авт.: Шумилов И.В., Романюк В.А., Пищальник В.М. № 2023682641; заявл. 30.10.2023; опублик. 25.12.2023. <https://fips.ru/EGD/a841422c-d905-46b5-9ce2-c2bedc0f6ff3>; EDN: GDFRGX
14. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020,146(730):1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
15. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2023. <https://doi.org/10.24381/cds.fl7050d7>
16. Donlon C.J., Martin M., Stark J., Roberts-Jones J., Fiedler E., Wimmer W. The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system. *Remote Sensing of Environment*. 2012,116:140–158. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.017>
17. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024662834. «NetCDF Processing». Авт.: Шумилов И.В., Ващенко Д.А., Романюк В.А. № 2024661302; заявл. 20.05.2024; опублик. 30.05.2024. EDN: ACXUUT
18. *Границы океанов и морей*. № 9031. СПб.: ГУНиО МО, 2000, 208 с. <https://www.morkniga.ru/p800326.html?ysclid=mm8tez5hvv858863169>
19. Глебова С.Ю. Сезонные особенности и межгодовые изменения атмосферной циркуляции над Беринговым морем в 1995–2022 гг. *Известия ТИНРО*. 2024,204(1):183–205. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2024-204-183-205>; EDN: XQQOOX
20. Думанская И.О. *Ледовые условия морей азиатской части России*. М.; Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2017, 640 с.
21. Staben P.J., Kachel N.B., Moore S.E., Napp J.M., Siggler M., Yamaguchi A., Zerbini A.N. Comparison of warm and cold years on the southeastern Bering Sea shelf and some implications for the ecosystem. *Deep-Sea Research*. Part II: Topical Studies in Oceanography. 2012,65–70:31–45. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.02.020>
22. Corlett W.B., Pickart R.S. The Chukchi slope current. *Progress in Oceanography*. 2017,153:50–65. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.04.005>
23. Clark J.B., Mannino A. The impacts of freshwater input and surface wind velocity on the strength and extent of a large high latitude river plume. *Frontiers in Marine Science*. 2022,8:793217. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.793217>
24. Muramatsu M., Watanabe E., Itoh M., Onodera J., Mizobata K., Ueno H. Subsurface warming associated with Pacific Summer water transport toward the Chukchi borderland in the Arctic ocean. *Scientific Reports*. 2025,15:24. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81994-8>
25. Лучин В.А., Соколов О.В. Межгодовая изменчивость и возможность прогноза термического состояния деятельного слоя вод Берингова моря. *Известия ТИНРО*. 2007,151:312–337.
26. Dubinina E.O., Kossova S.A., Osadchikov A.A., Chizhova Yu.N., Avdeenko A.S. Pacific waters in the East Siberian Sea: Identification from $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$ and [DIC] characteristics. *Doklady Earth Sciences*. 2024,515(2):715–721. <https://doi.org/10.1134/S1028334X2460004X>; EDN: LMIIDZ
27. Woodgate R.A., Weingartner T.J., Lindsay R. Observed increases in Bering strait oceanic fluxes from the Pacific to the Arctic from 2001 to 2011 and their impacts on the Arctic ocean water column. *Geophysical Research Letters*. 2012,39(24):L24603. <https://doi.org/10.1029/2012GL054092>
28. Woodgate R.A., Stafford K.M., Prah F.G. A synthesis of year-round interdisciplinary mooring measurements in the Bering strait (1990–2014) and the RUSALCA years (2004–2011). *Oceanography*. 2015,28(3):46–67. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2015.57>

References

1. Matveeva T.A., Semenov V.A., Astafieva E.S. Arctic sea ice coverage and its relation to the surface air temperature in the Northern Hemisphere. *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2020,60(1):134–148. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2076673420010029>; EDN: NEJLMZ
2. Plotnikov V.V., Vakulskaya N.M., Lukyanova N.B. [On variability of ice conditions in the Chukchi Sea and its relationship with large-scale atmospheric circu-

- lation]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2006,12:65–74. (In Russ.). EDN: JSGSPL
3. Basyuk E.O., Khen G.V., Vanin N.S. [Variability of oceanological conditions in the Bering Sea in 2002–2006]. *Izvestiya TINRO*. 2007,151:290–311. (In Russ.). EDN: IMPGAX
4. Vakulskaya N.M., Plotnikov V.V. [Estimates of parameters of ice cover condition in the Bering Sea]. *Kriosfera Zemli*. 2014,18(1):92–100. (In Russ.). EDN: RXDUGF
5. Basyuk E.O., Zuenko Yu.I. Bering Sea 2018 as the extreme low-ice and warm year. *Izvestiya TINRO*. 2019,198:119–142. (In Russ.). <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2019-198-119-142>; EDN: DRRRKW
6. Plotnikov V.V., Vrazhkin A.N., Mezentseva L.I., Druz N.I., Vakulskaya N.M., Dubina V.A. [Variability of hydrometeorological regime of the seas of the eastern Arctic sector (East Siberian and Chukchi seas) in the modern period]. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta. Inzhiniring Georesurov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020,331(7):103–115. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/7/2723>
7. Plotnikov V.V., Vakulskaya N.M., Mezentseva L.I., Dubina V.A., Pustoshnova V.I. [Variability of ice conditions in the Chukchi Sea and their relationship with the Arctic Oscillation]. *Izvestiya TINRO*. 2020,200(1):155–167. (In Russ.). <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2020-200-155-167>
8. Myslenkov S.A., Kruglova E.E., Bagatinskiy V.A. [Occurrence of storm waves in the Laptev, East Siberian and Chukchi seas]. *Gidrometeorologicheskie Issledovaniya i Prognozy*. 2024,1(391):41–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-1-41-55>
9. Plotnikov V.V., Pustoshnova V.I. Variability and conjugacy of ice conditions in the system of east arctic seas (the Laptev, East Siberian, and Chukchi Seas). *Russian Meteorology and Hydrology*. 2012,37:468–476. <https://doi.org/10.3103/S1068373912070060>
10. Vakulskaya N.M., Plotnikov V.V., Pustoshnova V.I. [Conjugacy of ice conditions of the Bering Sea with ice conditions in the seas of the eastern Arctic sector and the Pacific basin]. *Vestnik DVO RAN*. 2014,5:18–24. (In Russ.).
11. Alekseeva T.A., Raev M.D., Tikhonov V.V., Sokolova Yu.V., Sharkov E.A., Frolov S.V., Serovetnikov S.S. Comparative Analysis of Sea Ice Area in the Arctic, Derived from Satellite Microwave Radiometry (Algorithm VASIA2), with AARI Ice Charts. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021,57(9):1076–1080. <https://doi.org/10.1134/S0001433821090383>
12. Fetterer F., Knowles K., Meier W.N., Savoie M., Windnagel A.K. Sea Ice Index, Version 3 [Data set]. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center, 2017. <https://doi.org/10.7265/N5K072F8>
13. [Certificate of registration of the computer program] No. 2023688937. “Ice Data Processing”. Authors: Shumilov I.V., Romanyuk V.A., Pishchalnik V.M. No. 2023682641; appl. 30.10.2023; publ. 25.12.2023. (In Russ.). <https://fips.ru/EGD/a841422c-d905-46b5-9ce2-c2bedc0f6ff3>; EDN: GDFRGX
14. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020,146(730):1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
15. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J.-N. ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2023. <https://doi.org/10.24381/cds.fl7050d7>
16. Donlon C.J., Martin M., Stark J., Roberts-Jones J., Fiedler E., Wimmer W. The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system. *Remote Sensing of Environment*. 2012,116:140–158. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.017>
17. [Certificate of registration of the computer program] No. 2024662834. “NetCDF Processing”. Authors: Shumilov I.V., Vashchenko D.A., Romanyuk V.A. No. 2024661302; appl. 20.05.2024; publ. 30.05.2024. (In Russ.). EDN: ACXUUT
18. *Granitsy okeanov i morey. No. 9031* [Boundaries of oceans and seas. No. 9031]. St. Petersburg: GUNiO MO, 2000, 208 p. (In Russ.). <https://www.morkniga.ru/p800326.html?ysclid=mm8tez5hvv858863169>
19. Glebova S.Yu. Seasonal patterns and interannual variations of atmospheric circulation over the Bering Sea in 1995–2022. *Izvestiya TINRO*. 2024,204(1):183–205. (In Russ.). <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2024-204-183-205>; EDN: XQQOOX
20. Dumanskaya I.O. *Ledovye usloviya morey aziatskoy chasti Rossii* [Ice conditions of the seas of the Asian part of Russia]. Moscow; Obninsk: IG–SOTSIN, 2017, 640 p. (In Russ.).
21. Stabeno P.J., Kachel N.B., Moore S.E., Napp J.M., Sigler M., Yamaguchi A., Zerbini A.N. Comparison of warm and cold years on the southeastern Bering Sea shelf and some implications for the ecosystem. *Deep-Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2012,65–70:31–45. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.02.020>
22. Corlett W.B., Pickart R.S. The Chukchi slope current. *Progress in Oceanography*. 2017,153:50–65. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.04.005>
23. Clark J.B., Mannino A. The impacts of freshwater input and surface wind velocity on the strength and extent of a large high latitude river plume. *Frontiers in Ma-*

- rine Science*. 2022,8:793217. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.793217>
24. Muramatsu M., Watanabe E., Itoh M., Onodera J., Mizobata K., Ueno H. Subsurface warming associated with Pacific Summer water transport toward the Chukchi borderland in the Arctic ocean. *Scientific Reports*. 2025,15:24. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81994-8>
 25. Luchin V.A., Sokolov O.V. [Interannual variability and possibility of forecasting the thermal state of the active water layer of the Bering sea]. *Izvestiya TINRO*. 2007,151:312–337. (In Russ.).
 26. Dubinina E.O., Kossova S.A., Osadchiv A.A., Chizhova Yu.N., Avdeenko A.S. Pacific waters in the East Siberian Sea: Identification from $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$ and [DIC] characteristics. *Doklady Earth Sciences*. 2024,515(2):715–721. <https://doi.org/10.1134/S1028334X2460004X>; EDN: LMIIDZ
 27. Woodgate R.A., Weingartner T.J., Lindsay R. Observed increases in Bering strait oceanic fluxes from the Pacific to the Arctic from 2001 to 2011 and their impacts on the Arctic ocean water column. *Geophysical Research Letters*. 2012,39(24):L24603. <https://doi.org/10.1029/2012GL054092>
 28. Woodgate R.A., Stafford K.M., Prah F.G. A synthesis of year-round interdisciplinary mooring measurements in the Bering strait (1990–2014) and the RUSALCA years (2004–2011). *Oceanography*. 2015,28(3):46–67. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2015.57>

Об авторах

✉ **Шумилов Илья Валерьевич**, младший научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, i.shumilov@imgg.ru. <https://orcid.org/0009-0003-6713-779X>

Никулина Ирина Владимировна, инженер лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, i.nikulina@imgg.ru. <https://orcid.org/0009-0001-4926-7027>

Вашченко Дмитрий Алексеевич, инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории химико-биологических исследований, Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия, vashchenko_da@sakhgu.ru. <https://orcid.org/0009-0005-0692-7063>

Пищальник Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, v.pishchalnik@imgg.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1432-6741>

Романюк Валерий Анатольевич, кандидат географических наук, доцент кафедры геологии и нефтегазового дела Технический нефтегазовый институт, Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия, kunashir18@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9993-7965>

About the Authors

✉ **Shumilov, Ilya V.**, Junior Researcher, Laboratory of Wave Dynamics and Coastal Currents, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, i.shumilov@imgg.ru. <https://orcid.org/0009-0003-6713-779X>

Nikulina, Irina V., Engineer, Laboratory of Wave Dynamics and Coastal Currents, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, i.nikulina@imgg.ru. <https://orcid.org/0009-0001-4926-7027>

Dmitry A. Vashchenko., Research Engineer, Research Laboratory of Chemical and Biological Studies, Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, vashchenko_da@sakhgu.ru. <https://orcid.org/0009-0005-0692-7063>

Vladimir M. Pishchalnik., Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher, Laboratory of Wave Dynamics and Coastal Currents, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, v.pishchalnik@imgg.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1432-6741>

Valery A. Romanuk., Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Geology and Petroleum Engineering, Technical Oil and Gas Institute, Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, kunashir18@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9993-7965>

Поступила 16.06.2026

Принята к публикации 11.07.2026

Received 16 June 2026

Accepted 11 July 2026



Комплексная оценка лавинной опасности бассейна р. Паратунка (п-ов Камчатка)

А. Ю. Озеров¹, Д. А. Боброва², Д. В. Мельников¹

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

² Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН,
Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. В статье представлена комплексная оценка лавинной опасности бассейна р. Паратунка (юго-восток Камчатки) – одного из наиболее лавиноопасных, но перспективных для развития горнолыжного туризма регионов полуострова. На основе статистического анализа архивных данных о сходах лавин за период 1947–2026 гг., характеристик рельефа, климата и снежного покрова, а также ГИС-моделирования выявлены основные закономерности лавинного режима. Установлено, что более 60 % разрушительных лавин формируются на склонах вулкана Вилучинский, где зафиксированы сходы объемом до 2 млн м³ и дальностью выброса свыше 5.5 км. С использованием метода взвешенного линейного суммирования (WLC) и четырех предикторов (крутизна склона, относительная высота, растительный покров, абсолютная высота) построена карта лавинной опасности. Верификация модели показала, что 53,9 % площади бассейна (812,3 км²; общая площадь – 1507 км²) относятся к лавиноопасным зонам, при этом доминируют участки высокой (22,9 %) и умеренной (16,8 %) опасности. 46,1 % территории классифицированы как зоны геоморфологического исключения (<15° и >60°). Разработанная карта фиксирует пространственное распределение потенциальных зон отрыва лавин и может служить научно-методической основой для планирования туристической инфраструктуры, оптимизации транспортных маршрутов и минимизации лавинных рисков.

Ключевые слова: снежные лавины, лавинная опасность, бассейн реки Паратунка, Камчатка, ГИС-моделирование, взвешенное линейное суммирование, вулканические склоны

Comprehensive assessment of avalanche hazard in the Paratunka river basin (Kamchatka peninsula)

Alexey Yu. Ozerov¹, Darya A. Bobrova², Dmitry V. Melnikov¹

¹ Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

² Special Research Bureau for Automation of Marine Research, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. This paper presents a comprehensive assessment of avalanche hazard in the Paratunka river basin (southeastern Kamchatka), one of the most avalanche-prone yet promising regions of the peninsula for the development of ski tourism. Based on statistical analysis of archival avalanche data for the period 1947–2026, as well as an analysis of relief, climate, and snow cover characteristics and GIS modeling, the main patterns of the avalanche activity were identified. It was established that more than 60 % of destructive avalanches formed on the slopes of Viluchinsky volcano, where avalanche events with volumes of up to 2 million m³ and runout distances exceeding 5.5 km were recorded. An avalanche hazard map was developed using the Weighted Linear Combination (WLC) method and four predictors (slope angle, relative altitude, vegetation cover, and absolute altitude). Model verification showed that 53.9% of the basin area (812.3 km²; total area – 1507 km²) belongs to avalanche-prone zones, with high (22.9 %) and moderate (16.8 %) hazard areas predominating. The remaining 46.1% of the territory was classified as geomorphologically unsuitable for avalanche formation (with slope angles <15° and >60°). The developed map outlines the spatial distribution of potential avalanche release zones and provides a scientific and methodological basis for planning tourism infrastructure, optimizing transport routes, and minimizing avalanche-related risks.

Keywords: snow avalanches, avalanche hazard, Paratunka river basin, Kamchatka, GIS modeling, Weighted Linear Combination, volcanic slopes

Финансирование и благодарности

Статья подготовлена по теме государственного задания Специального конструкторского бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН (FWWW-2024-0003).

Для цитирования: Озеров А.Ю., Боброва Д.А., Мельников Д.В. Комплексная оценка лавинной опасности бассейна р. Паратунка (п-ов Камчатка). *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 3, с. 330–346. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.3.330-346>; <https://www.elibrary.ru/arqoac>

Funding and Acknowledgements

The paper is prepared within the framework of the state assignment of the Special Research Bureau for Automation of Marine Research of FEB RAS (No. project FWWW-2024-0003).

For citation: A. Yu. Ozerov, D. A. Bobrova, D. V. Melnikov. Comprehensive assessment of avalanche hazard in the Paratunka river basin (Kamchatka peninsula). *Geosistemyperehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 3, p. 330–346. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.3.330-346>; <https://www.elibrary.ru/arqoac>

Введение

Еще в 60-х годах XX в. на основании оценки рельефа, снежности и данных анкетного опроса о сходах лавин К.С. Лосев и Г.К. Тушинский сделали вывод о возможности лавинной опасности в горах Камчатки [1]. Тогда же В.Н. Виноградовым на основе опроса местных жителей выполнен анализ лавинного режима и составлена первая схема распространения лавин Камчатки [2].

Позже Проблемной лабораторией снежных лавин и селей МГУ были проведены полевые рекогносцировочные обследования, на основании которых Н.А. Володичева составила карту лавиноопасных районов Камчатки [3].

В связи с интенсивным развитием хозяйственной деятельности региона возникла необходимость во всестороннем исследовании лавинных процессов и составлении детальных карт лавинной опасности региона. Так, 9 августа 1982 г. приказом Камчатского УГМС была создана Снеголавинная группа (СЛГ), а позже в 1994 г. в соответствии с Постановлением Совета Министров № 443 от 11.05.93 г. «О создании противолавинной службы России» был основан Камчатский региональный противолавинный центр. С этого момента начинается наиболее активный период в плане обследования территории Камчатки на предмет лавинной опасности. В результате составлено 3 выпуска Кадастров лавин СССР, в которых собраны и

систематизированы материалы справочного характера о территориальном распространении и режиме лавин на Камчатке [4], были составлены крупномасштабные схемы лавинной опасности г. Петропавловска-Камчатского и некоторых других районов полуострова, выявлен ряд закономерностей снегонакопления, сделаны выводы о лавинном режиме, разработаны меры по защите от лавин [5–10].

Накопленный к настоящему времени материал позволяет говорить о Камчатском полуострове как об одном из самых лавиноопасных регионов России.

Однако территорию региона до сих пор нельзя назвать полностью изученной в лавинном отношении. Разнообразие климатических условий, его простираение с севера на юг, географические особенности, экстремальное снегонакопление, наличие действующих вулканов не позволяют на основании имеющихся данных сделать выводы о лавинах на всей территории полуострова. Кроме того, наблюдения за лавинами, как правило, были приурочены к крупным хозяйственным объектам, автодорогам и территории областного центра, поэтому значительная часть территории полуострова остается неизученной.

В связи с реализацией государственной программы по развитию туризма возрос интерес и к Камчатскому краю как региону, обладающему большим туристическим потенциалом. Одним из приоритетных направлений развития

является горнолыжный туризм, инфраструктура которого всегда приурочена к горным районам. В настоящее время в этом отношении особый интерес представляет южная часть полуострова, а именно долина р. Паратунка, одна из наиболее лавиноопасных районов на Камчатском полуострове. Здесь ежегодно формируются лавины объемом до 150–200 тыс. м³, а в 1997 г. была зафиксирована лавина объемом 2 млн м³, которая сошла со склона вулкана Вилучинский. Известны многочисленные случаи схода лавин в бассейне р. Паратунка, нанесших значительный экономический ущерб в виде разрушенных опор ЛЭП и завалов автомобильных дорог. Также сход лавин в этом районе неоднократно приводил к катастрофическим последствиям, к гибели людей.

Таким образом, реализация туристического потенциала в районах, отличающихся высокой степенью лавинной опасности, требует всестороннего изучения лавинных процессов в целях минимизации лавинных рисков для населения и объектов инфраструктуры. В данной работе приводится характеристика лавинных процессов в долине р. Паратунка – одном из активно развивающихся туристических центров Камчатки.

Цель данной работы – комплексная оценка лавинной опасности в бассейне р. Паратунка на основе статистического анализа исторических данных, метеоклиматических характеристик и ГИС-моделирования, с формулировкой практических рекомендаций по минимизации рисков для населения и инфраструктуры.

Материалы и методы

Архивные данные о лавинах были получены в основном из интернет-ресурсов, а также из ряда литературных источников и не являются полными, поскольку чаще всего публикуется информация о сходах лавин, приведших к катастрофическим и разрушительным последствиям, таким как попадание людей в лавину, их гибель; повреждение и разрушение зданий, сооружений, объектов инфраструктуры, транс-

порта, ЛЭП; завалы автомобильных дорог. Кроме того, из-за низкой экономической освоенности района исследований многие случаи формирования лавин не были обнаружены и описаны специалистами. Вероятно, что случаев формирования лавин в бассейне р. Паратунка существенно больше.

Для комплексной оценки лавинной опасности в бассейне р. Паратунка был применен метод взвешенного линейного суммирования (Weighted Linear Combination, WLC), позволяющий интегрировать разнородные пространственные данные в единый индекс опасности. Выбор данного метода обусловлен его широкой апробацией при решении задач многокритериальной оценки природных опасностей и возможностью учета относительной значимости различных факторов формирования лавин [11–13].

В качестве исходных данных использована цифровая модель рельефа ALOS World 3D с пространственным разрешением 30 м, предоставленная Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA). Данное разрешение представляет собой оптимальный компромисс между детализацией горного рельефа, необходимой для выявления потенциальных лавинных очагов, и вычислительной эффективностью при обработке территорий площадью более 1500 км². Все пространственные данные были приведены к единой системе координат WGS 1984 UTM Zone 59N, что обеспечило метрическую точность при расчетах площадей и дистанций.

Все операции выполнены в программной среде ArcGIS Pro 3.2 с использованием модуля Spatial Analyst.

Результаты

Случаи формирования лавин в бассейне р. Паратунка

Бассейн р. Паратунка расположен в юго-восточной части п-ова Камчатка (52°30'–53°10' с.ш., 158°00'–158°45' в.д.) и включает в себя склоны вулкана Вилучинский (2173 м),

хребтов Тополовый и Карымшина, а также долину меридионального простирания с перепадом высот от 0 до 2173 м.

Лавины объемом до 150–200 тыс. м³ в долине р. Паратунка сходят ежегодно. В большинстве случаев сход лавин связан с наступлением глубоких южных циклонов (атмосферное давление менее 940 гПа), сопровождающихся

ураганскими ветрами, сильными продолжительными метелями, обильными осадками.

Собранные архивные данные о лавинах, сошедших в бассейне р. Паратунка и соседних территориях, сведены в табл. 1.

Анализ дат схода лавин показывает, что максимальная повторяемость лавин в бассейне р. Паратунка охватывает период с ноября

Таблица 1. Сведения о снежных лавинах бассейна р. Паратунка

Table 1. Data on snow avalanches in the Paratunka River basin

№	Дата	Район схода лавины	Параметры лавины, обстоятельства схода, ущерб
1	08–09.03.1947	Бухта Вилючинская, устье р. Вилюча	Разрушена пекарня и жилой барак сезонной рыболовецкой базы
2	25.02.1948	Бухта Вилючинская, устье р. Вилюча	Полностью разрушен рабочий поселок, 54 погибших, 11 раненых. Лавина сошла в том же месте, что и 08-09.03.1947 г.
3	Май 1961	Левый борт долины р. Паратунка	Лавина засыпала долину, образовался снежный «мост» через русло
4	1979	Левый борт долины р. Паратунка	Перекрыто несколько участков автодороги
5	Начало февраля 1982	Восточный склон г. Бабий Камень (хр. Тополовый)	Три лавины объемом 10–30 тыс. м ³ каждая
6	31.12.1992–01.01.1993	Участок Верхне-Мутновской ГеоЭС	Разрушены бытовка и дизельная, буровая вышка согнута
7	1989, 1994, 2005	Участки ВЛ 220 кВ и дорога на ГеоЭС	Всего за 3 года было разрушено 6 опор ЛЭП, завалена автодорога на 6 км
8	17.01.1994	Склон влк. Вилючинский	Объем 290 тыс. м ³ , дальность выброса 5.50 км
9	05.04.1996	Юго-зап. часть хр. Быстринский	Самолет ИЛ-76 спровоцировал лавину >500 тыс. м ³ , 20 погибших. Лавина протащила самолет >2 км
10	28.01.1997	Склон влк. Вилючинский	Объем >2 млн м ³ , толщина пласта 2–8 м (ср. 5–6 м)
11	02.01.2005	Склон влк. Вилючинский	Ширина фронта ~1 км, объем ~1 млн м ³ , повреждена ЛЭП. Конус выноса пересек долину
12	Февраль 2005	Склон влк. Вилючинский	Уничтожено 2 опоры ВЛ 220 кВ
13	Зима 2005	Левый борт долины р. Паратунка	Лавины 200–500 тыс. м ³ из нескольких очагов. Впервые с 1979 г. перекрыты дороги
14	26.03.2006	Бассейн р. Паратунка (хр. Тополовый)	10 чел. в лавине, 5 погибших, объем 126 тыс. м ³ . Сход лавины был спровоцирован туристами в процессе катания по склону
15	01.01.2009	Склон влк. Вилючинский	Объем ~1.5 млн м ³ , ширина зоны аккумуляции ~1 км. Высота снега в зоне отрыва 2–2.5 м
16	15.02.2014	Район Мутновской ГеоЭС, сопка Скалистая	Объем 150 тыс. м ³ , разрушено укрытие скважины. Ранее таких лавин в данном месте не наблюдалось
17	13.03.2014	Район Мутновской ГеоЭС, сопка Горячая	Лавина сошла через горячие источники, перекрыла 300 м дороги
18	14.01.2015	Склон влк. Вилючинский	Дальность >5 км, объем на дороге 1.5 млн м ³ . Перекрыто 300 м трассы

19	27.02.2016	Склон влк. Вилучинский	В лавину попали 2 туриста, 1 погиб. Сход лавины был спровоцирован туристами, занимающимися хели-ски.
20	09.04.2017	Южный склон влк. Вилучинский	2 погибших. Тела найдены на глубине ~8 м
21	26.07.2017	Склон влк. Мутновский	—
22	29–30.12.2018	Влк. Вилучинский (28-й км трассы)	Уничтожено 2 опоры ЛЭП. Одну унесло >1 км
23	08–10.11.2019	Горные территории бассейна р. Паратунка	Массовый сход лавин
24	30.05.2020	СЗ кулуар влк. Вилучинский	Массовое формирование инсоляционных лавин до 10 тыс. м ³
25	07.06.2020	Зап. склон влк. Вилучинский	Опрокинута опора ЛЭП
26	23.04.2023	Кулуар над водопадом влк. Вилучинский	Лавина дошла почти до трассы
27	24–25.04.2023	Кулуар над водопадом влк. Вилучинский	Высота отложений >6 м
28	13–14.03.2024	Кулуар над водопадом влк. Вилучинский	—
29	21.03.2026	Район впадения р. Поперечная в р. Паратунка	Завал дороги 250 м, высота 6–10 м. На этом участке отмечается регулярное формирование лавин
30	21–22.03.2026	Склон влк. Вилучинский	Перекрыта автодорога

по апрель, что согласуется с данными о зимней циклонической деятельности на Камчатке. При этом максимальная повторяемость крупных лавин (объемом более 1 млн м³) приходится на январь–февраль, поскольку в этот период мощность снежного покрова максимальна.

Однако зафиксированы случаи схода лавин и в несезонное время. Так, 30 мая 2020 г. зафиксировано массовое формирование лавин объемом до 10 тыс. м³ на северо-западном кулуаре влк. Вилучинский (рис. 1), а 7 июня 2020 г. лавина опрокинула опору ЛЭП на западном склоне влк. Вилучинский (рис. 2). Эти случаи



Рис. 1. Снежные лавины на вулкане Вилучинский, северо-западный кулуар. 30.05.2020 г. Фото А.Ю. Озерова.

Fig. 1. Snow avalanches on Viluchinsky volcano, northwestern couloir. May 30, 2020. Photo by A. Yu. Ozerov.



Рис. 2. Опора линии электропередачи, опрокинута снежной лавиной. Западное основание вулкана Вилучинский. 7.06.2020 г. Фото А.Г. Терещенко.

Fig. 2. Power line support overturned by a snow avalanche. Western flank of Viluchinsky volcano. June 7, 2020. Photo by A.G. Tereshchenko.

свидетельствуют о возможности формирования инсоляционных лавин в теплый период года на высокогорных склонах вулканов, где снежный покров сохраняется круглогодично.

Анализ локализации лавинных очагов выявил три основные зоны формирования разрушительных лавин (табл. 2).

Диапазон зафиксированных объемов лавин чрезвычайно широк. При этом следует учитывать, что приведённые значения отражают случаи, зафиксированные в связи с

причинением ущерба или попаданием в зону воздействия людей; лавины меньшего объема, вероятно, не регистрировались из-за низкой экономической освоенности территории и отсутствия мониторинга. С учётом этого, лавины в исследуемом районе по зафиксированному объёму можно разбить на 3 группы:

Среднего объёма (10–30 тыс. м³) – сходят ежегодно. Как правило, не приводят к повреждениям и разрушениям, однако опасны для человека и могут привести к гибели.

Таблица 2. Пространственное распределение и параметры лавинных очагов в бассейне р. Паратунка
Table 2. Spatial distribution and characteristics of avalanche release areas in the Paratunka river basin

№	Зона формирования лавин	Характеристика рельефа	Доля зафиксированных лавин, %	Зафиксированный объем, м ³	Примечания
1	Склоны влк. Вилучинский	Крутизна 35–50°, наличие воронок и кулуаров, относительная высота до 1900 м	>60 %	10 ⁴ –2·10 ⁶	Наиболее активная зона; здесь зафиксированы все случаи схода лавин объемом >1 млн м ³
2	Левый борт долины р. Паратунка (хр. Тополовый, горы Бабий Камень, Зайкин Мыс)	Крутизна 35–45°, основные и лотковые лавиносборы, относительная высота 300–600 м	~30 %	10 ⁴ –5·10 ⁵	Регулярные завалы автодороги на Мутновскую ГеоЭС; лавины достигают дна долины
3	Район Мутновской ГеоЭС (сопки Скалистая, Горячая)	Пологие склоны с локальными повышением крутизны, относительная высота до 300 м	<10 %	10 ⁴ –1.5·10 ⁵	Ранее не считался лавиноопасным; сход лавины 15.02.2014 г. (150 тыс. м ³) указывает на расширение зон риска

Крупного объема (100–500 тыс. м³) – фиксируются регулярно, вызывают повреждение инфраструктуры, приводят к гибели людей.

Катастрофические (1–2 млн м³) – зарегистрированы в 1997, 2005, 2009 и 2015 гг., все со склонов влк. Вилучинский, вызывают значительные разрушения.

Примечательно, что лавины объемом более 1 млн м³ полностью перекрывают долину р. Паратунка (ширина 400–1500 м), достигая противоположного борта и создавая угрозу для объектов инфраструктуры, расположенных на значительном удалении от зоны отрыва.

Анализ последствий схода лавин позволил выделить четыре категории ущерба:

Человеческие жертвы – зафиксировано не менее 7 случаев попадания людей в лавины, общее число погибших превысило 12 человек.

Повреждение критической инфраструктуры – уничтожено или повреждено более 8 опор ВЛ 220 кВ, многократно перекрывались участки автодорог (до 6 км суммарно), что привело к системным сбоям в энергоснабжении и транспортной доступности.

Ущерб вспомогательным объектам – неоднократно разрушались временные сооружения (балки, дизельные генераторы), наблюдательные скважины, повреждалось научное и измерительное оборудование.

Косвенные экономические потери – выражались в длительных перерывах энергоснабжения, значительных затратах на восстановление инфраструктуры и прямых убытках от приостановки туристической деятельности.

Причинами схода лавин являются в первую очередь метеорологические факторы: прохождение глубоких южных циклонов, ураганные ветры и продолжительные метели, интенсивные снегопады (максимальное месячное количество осадков до 733 мм) и зимние оттепели (повышение температуры на 3–5° выше нуля). Однако нередко сход лавин вызывают туристы, которые подрезают снежный пласт. Так, 26 марта 2006 г. группа туристов на снегоходах вызвала сход лавин, в результате которого погибло 5 человек.

Основные факторы формирования лавин в бассейне р. Паратунка

Основными факторами формирования лавин традиционно считаются горный рельеф, наличие и состояние снежного покрова, а также процессы его метаморфизма. В этом отношении на п-ове Камчатка сложились крайне благоприятные условия – 75 % территории полуострова занимают горы, а мощность снежного покрова может достигать 3 м и более [6, 14].

Исследуемый район, бассейн р. Паратунка, расположен на юго-востоке полуострова. Описание основных факторов формирования лавин в долине реки приведено ниже.

Рельеф. Свое начало р. Паратунка берет на высоте 1000 м с восточного склона сопки Красная (1204 м), протекает в меридиональном направлении и впадает в Авачинскую бухту.

В верхнем течении до впадения в Паратунку правого притока р. Быстрая долина узкая и имеет V-образную форму. Вершины водоразделов в этой зоне пологие, крутизна склонов долины не превышает 30–35°, относительная высота их 100–600 м. Борта долины осложнены эрозионными врезами, воронками и мульдами, представляющими собой лотковые лавиносборы, которые чередуются с лавиносборами осовного типа. Продольные профили лавиносборов ровные с постепенным выполаживанием в зоне аккумуляции лавин.

От впадения в Паратунку р. Быстрая и до впадения р. Поперечная долина имеет U-образный профиль. Ширина дна долины составляет 400–800 м. Водоразделы здесь представлены хребтами Карымшина и Поперечным, а также вулканом Вилучинским. Склоны водоразделов в этой части бассейна имеют относительную высоту от 300 до 1900 м (вулкан Вилучинский). Характерной особенностью склонов водоразделов является их значительная крутизна (35–50°), а также подверженность активной эрозионной деятельности, которая обусловила преобладающий морфологический тип лавиносборов (воронки, врезы, мульды). Лавиносборы осовного типа здесь имеют от-

носителем небольшое превышение (до 300 м) и встречаются гораздо реже. Продольные профили склонов ровные, местами резко обрываются уступом ко дну долины. Исключение составляет вулкан Вилучинский, имеющий крутые ровные склоны в верхней части и плавно-вогнутую форму склона в средней и нижней частях.

Ниже впадения р. Поперечная в среднем и нижнем течении р. Паратунка ширина долины составляет 1.2–1.5 км. Превышение лавиносборов – 200–600 м, крутизна – 35–45°.

Климат. Одной из климатических особенностей полуострова является активная циклоническая деятельность в холодный период года. Зимние циркуляционные процессы здесь преобладают с ноября по март. Зона наибольшей повторяемости циклонов приходится на южную половину полуострова, где и расположен рассматриваемый в работе район [7]. Зимние циклоны приводят к оттепелям, сильным ветрам и обильному выпадению твердых осадков.

В южных районах Камчатки холодный период длится около 160 сут. (с середины ноября до конца апреля). В долинах и на побережьях температура воздуха различается за счет отопляющего воздействия моря. Значения среднемесячных температур по данным ГМС Начики, расположенной в долинной части полуострова, и ГМС Петропавловск-Камчатский, расположенной на побережье, приведены в табл. 3.

Температурной особенностью всей территории Камчатки являются частые оттепели.

Даже в самый холодный период (январь–февраль) возможны случаи положительной температуры (на 3–5° выше нуля). Средняя продолжительность оттепели между морозными периодами составляет 3 дня.

Количество осадков за ноябрь–март, по данным ближайших к району исследования метеостанций Начики и Петропавловск-Камчатский, составляет 410 мм и 611 мм соответственно*. Однако следует учесть, что метеостанции расположены в низменностях, а с учетом вертикального градиента значение осадков в горах выше. Ниже приведены значения среднего/максимального количества осадков по данным ГМС Петропавловск-Камчатский [15]:

X	XI	XII	I	II	III	IV	V
143/378	182/733	115/554	111/631	88/298	174/657	107/186	76/158

Камчатка относится к районам с наиболее активной метелевой деятельностью. Метели здесь обычно возникают при прохождении циклонов и связанных с ними фронтов. В среднем для исследуемого района насчитывается 40 дней с метелью за год. В отдельные годы число дней с метелью может значительно отклоняться от среднего значения. Метели возможны с октября по май, наибольшее их количество приходится на декабрь–январь. Продолжительность метели для восточного побережья может достигать 350 ч. В прибрежной юго-восточной части Камчатки в 30–40 % случаев метели наблюдаются при скорости ветра 10–13 м/с, но нередки метели и при

Таблица 3. Среднемесячная температура воздуха по ГМС Начики и ГМС Петропавловск-Камчатский*

Table 3. Mean monthly air temperature according to Nachiki and Petropavlovsk-Kamchatsky hydrometeorological stations*

Среднемесячная температура воздуха за зимний период, °С	X	XI	XII	I	II	III	IV	V
ГМС Начики	1.1	–8.4	–16.3	–18.4	–15.8	–10.8	–3.4	2.6
ГМС Петропавловск-Камчатский	5.3	–0.9	–5.1	–6.69	–6.5	–3.9	0.1	4.5

* По: СП 131.13330.2020. Свод правил. Строительная климатология. М.: ГУП ЦПП, 2020, 112 с. According to: Code of practice SP 131.13330.2020: Construction climatology. Moscow: State Unitary Enterprise TsPP, 2020, 112 p. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358>.

скоростях 18–20 м/с и более: повторяемость их составляет 10–25 %. Нередки для Камчатки и поземки, которые в большей степени зависят от местных условий. На открытых участках в южных частях побережий поземка наблюдается в течение 10–17 дней, в долинах – 3–6 дней. Однако вопрос снегопереноса при поземках в горах Камчатки остается неизученным.

Снежный покров. Особенностью Камчатки, существенно влияющей на лавинную опасность, является значительная высота снежного покрова, что отмечается всеми авторами, проводившими исследования снежного покрова на полуострове. Снежный покров отличается также неравномерностью его распределения, что связано с особенностями рельефа и ветровым снегопереносом, в результате которого образуются снежные карнизы.

Вопрос высоты и распределения снежного покрова на Камчатке можно считать малоизученным. Долинное и прибрежное расположение метеостанций не позволяет судить о высоте снежного покрова в горах, а имеющиеся данные маршрутных снегосъемок очень ограничены в пространстве и имеют непродолжительные ряды наблюдений.

Тем не менее, есть работы, позволяющие судить о высоте и распределении снежного покрова в горах. Так, в одной из работ на схематической карте распределения высоты снежного покрова Камчатки в период максимального снегонакопления бассейн р. Паратунка отнесен к району с высотой снежного покрова, составляющей более 150 см [16]. Позже была составлена карта средних многолетних снегозапасов на дату максимума [17]. Исходными материалами для этого послужили данные климатической сети, гляциологических и метеорологических наблюдений в высокогорье Камчатки, выполненных Институтом вулканологии, а также каталог ледников СССР.

Согласно карте максимальных снегозапасов, в горной части бассейна р. Паратунка мощность снежного покрова может достигать 9 м, что соответствует 3000 мм водного эквивалента на карте [17].

На основе материалов станций и постов о среднем числе дней со снежным покровом, а также на основе гляциологической информации о высоте фирновой границы на климатически репрезентативных ледниках была построена карта среднего числа дней со снежным покровом. По данным этой карты, снежный покров в горной части бассейна р. Паратунка залегает более 250–300 дней в году, т.е. большую часть года [17].

Факторы формирования лавин на склонах вулкана Вилучинский. В научной литературе подробно описаны случаи формирования лавин на склонах вулканов в период извержений [18, 19], когда вулканическая активность выступает основным триггерным фактором. Вместе с тем исследований, посвященных специфике зарождения и динамике снежных лавин на вулканических сооружениях в межэруптивный период, в настоящее время практически не встречается. Очевидно, что рельеф вулканов обладает уникальным комплексом морфометрических характеристик, которые существенно влияют на метаморфизм снежной толщи, режим снегонакопления, периодичность сходов и кинематику лавинных потоков. Анализ исторических данных по бассейну р. Паратунка позволяет уверенно выделить вулкан Вилучинский в качестве наиболее активной зоны лавинной деятельности в рассматриваемом бассейне.

Исключительная лавинная активность склонов Вилучинского вулкана обусловлена сочетанием ряда морфологических факторов. Прежде всего, крутизна верхних и средних частей склона составляет 35–50°, что полностью соответствует критическому диапазону отрыва снежных масс; при этом плавное выполаживание профиля в нижней части создает условия для значительной дальности выброса. Глубокие радиальные эрозионные формы – барранкосы, кулуары и эрозионные врезы – выступают в роли естественных лавинных логов, эффективно накапливающих снежные массы. Сочетание широких и узких кулуаров определяет морфогенетическое разнообразие лавин,

формируя условия как для осовных, так и для лотковых лавин. Высокая интенсивность эрозионных процессов обеспечивает постоянное обновление и углубление лавиносборов, препятствуя их стабилизации и зарастанию.

В то же время одной из главных причин формирования лавин является метаморфизм снежного покрова – совокупность физических процессов перекристаллизации льда, обусловленных градиентами температуры, влажности и механического напряжения внутри снежной толщи. В результате конструктивного (градиентного) метаморфизма при наличии значительного вертикального температурного градиента (>10 °C/м), водяной пар мигрирует от более теплых слоев к холодным, формируя кристаллы скелетного класса форм (глубинную изморозь). Таким образом формируются слои низкой прочности – лавиноопасные слои, по которым и происходит обрушение всей вышележащей толщи снега – формирующие лавину слои.

Температура подстилающей поверхности напрямую влияет на величину и знак температурного градиента в нижней части снежного покрова. При положительной или близкой к нулю температуре грунта формируется восходящий тепловой поток, усиливающий испарение льда у основания снежной толщи. В результате ускоряется миграция пара вверх, к более холодным слоям, что стимулирует конструктивный метаморфизм и формирование глубинной изморози. В контексте лавинной опасности бассейна р. Паратунка данный аспект приобретает особое значение в связи с наличием геотермально активных зон, вулканических пород с повышенной теплопроводностью и значительными сезонными колебаниями температур.

Как неоднократно отмечалось в литературе, при одинаковой толщине снежного покрова именно наличие мощных слоев перекристаллизованного (вторично-идиоморфного) снега играет важнейшую роль в формировании катастрофических лавин [20]. Можно предположить, что значительные перепады высот (от 700

до 1900 м), создающие топографические предпосылки, в совокупности с метаморфизмом, потенциально усиленным геотермальным теплом, способствуют развитию высокоэнергетических лавин, дальность выброса которых нередко превышает 5 км.

Карта лавинной опасности бассейна р. Паратунка

На основе анализа физико-географических условий бассейна р. Паратунка и обобщения литературных данных были выделены четыре ключевых предиктора лавинной опасности: крутизна склона, относительная высота, растительный покров и абсолютная высота. Выбор предикторов обусловлен их фундаментальной ролью в процессах снегонакопления и формирования лавин.

Крутизна склона получила максимальный весовой коэффициент 0.35, что отражает ее доминирующую роль среди всех факторов лавинообразования. Расчет крутизны склонов производился планарным методом с последующей реклассификацией в дискретную шкалу уязвимости от 1 до 10. При этом склоны крутизной менее 15° и более 60° были исключены из анализа: первые крайне редко достигают критического напряжения сдвига, необходимо для отрыва снежной массы, вторые же характеризуются неспособностью накапливать устойчивый снежный покров.

Относительная высота (вес 0.30) характеризует топографическую позицию склона относительно окружающего рельефа и влияет на аккумуляцию снега, ветровой перенос и объемы лавин. Расчет проводился как разность между абсолютными отметками ЦМР (цифровая модель рельефа) и локальным средним значением в окне радиусом 500 м. Положительные значения указывают на возвышенные формы рельефа (склоны хребтов, вершины), где наблюдается интенсивное снегонакопление за счет метелевого переноса, тогда как отрицательные значения соответствуют днищам долин и понижениям. Данный предиктор

особенно значим для горных систем Камчатки, где сложная морфоструктура хребтов создает выраженные контрасты в распределении снежного покрова.

Растительный покров (вес 0,20) включён в модель как фактор, снижающий вероятность схода лавин и ограничивающий их объём. Для оценки использованы данные ESA WorldCover 2021 с разрешением 10 м, рекодированные следующим образом: древесная растительность получила значение 9 (максимальная стабилизация снежного покрова), кустарники – 5, открытые безлесные склоны – 2 (минимальная стабилизация). Следует отметить, что наличие леса не исключает лавинную опасность полностью; однако, как показано в работе Н. А. Казакова [21], наличие леса в лавиносборах способствует уменьшению частоты схода и объёмов лавин, но не препятствует в полной мере их формированию. Согласно данным ESA WorldCover 2021, в бассейне р. Паратунка лесные и кустарниковые сообщества характерны преимущественно для нижних гипсометрических уровней (до 600–800 м), тогда как высокогорные тундры, каменистые россыпи и нивальные зоны лишены данного защитного механизма, что повышает их предрасположенность к лавинообразованию.

Абсолютная высота (вес 0.15) включена в модель как косвенный индикатор снегового режима: чем выше абсолютные отметки, тем больше высота снежного покрова и продолжительность его залегания и, как следствие, выше повторяемость лавин. Нормализация проводилась линейным методом: значения менее 500 м получили оценку 1–3 (минимальное снегонакопление), 500–1000 м – 4–6 (умеренное снегонакопление), 1000–1500 м – 7–8 (высокое снегонакопление), более 1500 м – 9–10 (очень высокое снегонакопление).

Интеграция нормализованных предикторов осуществлялась по формуле взвешенного линейного суммирования для определения индекса лавинной опасности LHI (Landslide Hazard Index) [13]:

$$LHI = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i^* \text{ при условии, что } \sum_{i=1}^n \omega_i = 1, \quad (1)$$

где n – количество предикторов ($n = 4$ в данной работе); ω_i – весовой коэффициент i -го предиктора ($0 < \omega_i < 1$); x_i^* – нормализованное значение i -го предиктора, приведенное к единой шкале уязвимости (в данной работе – от 1 до 10).

Для модели, применяемой авторами, формула имеет следующий вид:

$$LHI = 0.35 \cdot S^* + 0.30 \cdot R^* + 0.20 \cdot V^* + 0.15 \cdot E^*, \quad (2)$$

где S^* , R^* , V^* , E^* – нормализованные предикторы (крутизна склона – Slope, относительная высота – Relative Height, растительность – Vegetation, абсолютная высота – Elevation).

Итоговый растр был классифицирован на пять интервалов методом ручной классификации (Manual Interval) с учетом естественных разрывов в распределении значений и экспертной оценки пороговых значений: исключенные зоны ($<15^\circ$ и $>60^\circ$), низкая опасность (2.0–3.5), умеренная опасность (3.5–5.5), высокая опасность (5.5–7.5) и очень высокая опасность (7.5–10.0) (рис. 3).

Верификация модели проводилась через сопоставление расчётной площади бассейна с литературными данными, а также через анализ пространственного соответствия зон высокой и очень высокой опасности известным лавинным очагам, зафиксированным в таблице 1 настоящей работы. Высокая пространственная корреляция с историческими случаями схода лавин, включая трагедию 26 марта 2006 года и массовые сходы лавин 2020 и 2026 годов, подтверждает адекватность выбранной методики и обоснованность весовых коэффициентов.

Для количественной оценки площадей классов лавинной опасности был выполнен расчёт статистики по атрибутивной таблице итогового растра в среде ArcGIS Pro 3.2. Общая площадь бассейна р. Паратунка составила 1507 км², что с высокой точностью совпадает с данными, приведёнными в литературных источниках [22]. Анализ распределения пикселей по классам показал, что потенциально лавиноопасные зоны охватывают 53,9 % территории водосбора (812,3 км²). При этом доминируют

участки высокой (22,9 %, 345,1 км²) и умеренной (16,8 %, 253,1 км²) опасности, пространственно приуроченные к верхним и средним частям вулканических склонов. Зоны очень высокой опасности (7,2 %, 108,6 км²) концентрируются в кулуарах и воронках с максималь-

ной крутизной и снегонакоплением, что соответствует лавиноопасным очагам (табл. 2). Участки с низкой опасностью занимают 7,0 % площади бассейна (105,5 км²) и приурочены преимущественно к пологим формам рельефа в нижних частях склонов.

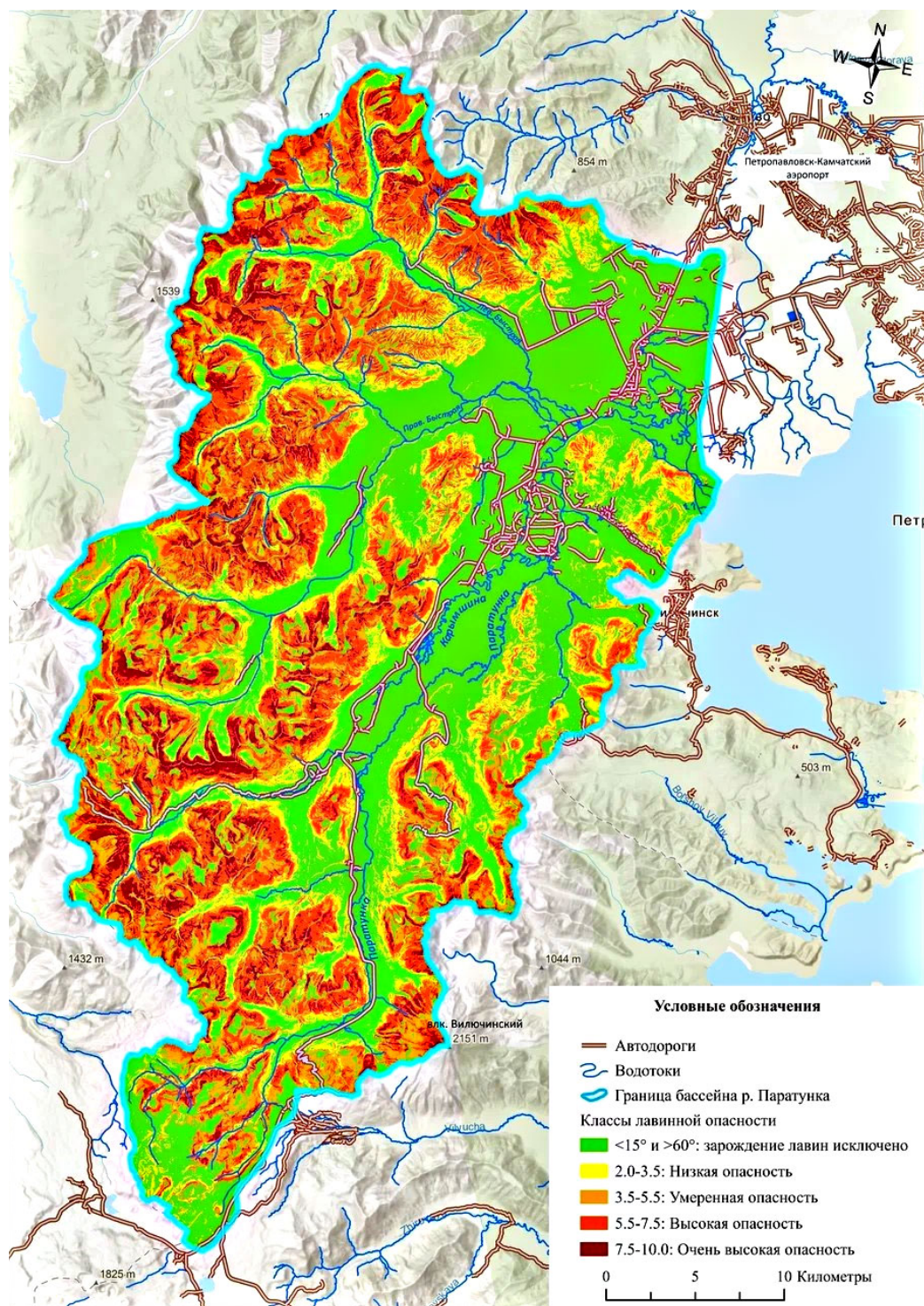


Рис. 3. Карта лавинной опасности бассейна р. Паратунка.

Fig. 3. Avalanche hazard map of the Paratunka River basin.

Обсуждение

Собранный архив данных о лавинах в бассейне р. Паратунка отражает в основном опубликованные в открытых источниках данные, однако на такой обширной горной территории лавины формируются значительно чаще, а площадь поражения лавинными процессами – больше. Между тем даже описанные случаи схода лавин и последствия, к которым они привели (см. табл. 1), позволяют включить долину р. Паратунка в категорию чрезвычайно лавиноопасных территорий.

Максимальные параметры лавин, представленные в табл. 1, не являются предельно возможными, поскольку статистические данные довольно короткие, а наблюдения не охватывают всю территорию и приурочены лишь к экономически освоенной ее части. Так, на Кавказе при схожих геоморфологических условиях (абсолютные высоты – 2000 м, большая глубина расчлененности рельефа – 800–1500 м, уклоны склонов – 30–40°) и большой высоты снежного покрова (на высотах 2000 м – более 200 см) зафиксированы случаи схода лавин объемом 5 млн м³, тогда как в долине р. Паратунка – 1.5–2 млн м³. Учитывая зарегистрированную максимальную высоту снежного покрова в бассейне реки, составляющую 900 см, можно говорить о большом риске формирования лавин объемом более 3 млн м³.

Представленная карта лавинной опасности (рис. 3) отражает вероятность формирования стартовых зон лавин, однако не учитывает динамику движения снежных масс и зоны их аккумуляции. Это фундаментальное ограничение модели, которое необходимо учитывать при интерпретации результатов и практическом применении карты.

Во-первых, методика взвешенного линейного суммирования, примененная в данной работе, ориентирована на оценку предрасположенности склонов к отрыву снежной массы, но не моделирует процесс движения лавины после схода. Как следствие, зоны с низкими значениями индекса опасности, расположенные в днищах долин и на пологих участках,

могут ошибочно восприниматься как безопасные, тогда как именно эти территории часто становятся зонами аккумуляции лавинных отложений. Исторические данные, приведенные в табл. 1, наглядно демонстрируют, что наиболее значительный ущерб инфраструктуре – разрушение опор ЛЭП, завалы автомобильных дорог – наносится не в зонах отрыва лавин, а в нижней части движения лавин, где скорость и масса снежного потока достигают максимальных значений.

Во-вторых, модель не учитывает параметр дальности выброса лавины, который для бассейна р. Паратунка может достигать 5.5 км (лалина 17 января 1994 г.) и более. Крупные лавины, сошедшие со склонов вулкана Вилучинский в 1997 и 2009 гг., полностью пересекали долину р. Паратунка и достигали противоположного борта, что свидетельствует о способности лавин преодолевать значительные расстояния и выходить за пределы морфологически очерченных лавиносборов. Игнорирование этого фактора может привести к недооценке рисков для объектов, расположенных на значительном удалении от крутых склонов.

В-третьих, пространственное разрешение исходной цифровой модели рельефа (30 м) не позволяет выявлять малые лавинные очаги площадью менее 1–2 га, а также учитывать микрорельеф, влияющий на локальную аккумуляцию снега и формирование снежных карнизов. Это особенно актуально для сложных морфоструктур вулканического происхождения, характерных для исследуемого района.

Кроме того, в модели использованы статистические данные о растительном покрове (ESA WorldCover 2021), что не учитывает сезонную динамику (листопад, снеговая нагрузка на кроны) и долгосрочные изменения (послепожарное восстановление, антропогенная трансформация). Аналогично, абсолютная высота использована как косвенный индикатор снегового режима, тогда как реальное распределение снежного покрова определяется сложным взаимодействием рельефа, ветрового переноса и температурной инверсии, что требует применения специализированных моделей снегонакопления.

Наконец, весовые коэффициенты предикторов, определенные на основе авторской оценки и литературных данных, могут нуждаться в региональной калибровке по мере накопления инструментальных наблюдений за лавинными процессами в бассейне р. Паратунка. В частности, роль растительного покрова как стабилизирующего фактора может быть переоценена, поскольку древесная растительность не препятствует формированию лавин, а лишь снижает частоту формирования и их объемы [21], тогда как влияние ветрового переноса снега, критически важное для Камчатки, в текущей версии модели представлено лишь косвенно через предиктор относительной высоты.

Таким образом, разработанную карту следует рассматривать как первый этап комплексной оценки лавинной опасности, отражающей пространственное распределение потенциальных зон отрыва лавин. Для перехода к оценке рисков и разработке инженерно-защитных мероприятий в дальнейшем необходимо проводить изыскания в соответствии с действующим нормативным документом СП 428.1325800.2018 «Инженерные изыскания для строительства в лавиноопасных районах»*. В то же время для целей научных исследований и более детального физического моделирования лавинных процессов в сложных условиях вулканического рельефа, перспективным представляется использование динамических моделей (таких как RAMMS или AVAL-1D) в качестве вспомогательного инструмента, дополняющего нормативные методики. Кроме того, необходимо интегрировать данные о критической инфраструктуре и рекреационной нагрузке для количественной оценки уязвимости. Такой многоуровневый подход позволит обеспечить научно обоснованную минимизацию лавинных рисков при освоении туристического потенциала долины р. Паратунка.

Заключение

Проведенное исследование позволило впервые комплексно оценить лавинную опасность бассейна р. Паратунка на юго-востоке Камчатского полуострова, сочетая статистический анализ исторических данных, характеристику метеоклиматических условий и ГИС-моделирование. Установлено, что исследуемый район относится к числу наиболее лавиноопасных территорий региона, где ежегодное формирование лавин объемом до 150–200 тыс. м³ сочетается с периодическим сходом катастрофических объемов снежных масс, превышающих 1–2 млн м³. Систематизация сведений за период 1947–2026 гг. выявила четкую пространственную приуроченность лавинных процессов: более 60 % катастрофических лавин сконцентрировано на склонах вулкана Вилучинский, где благоприятное сочетание крутизны (35–50°), глубоких радиальных эрозионных форм и экстремального снегонакопления (до 9 м) формирует условия для лавин с дальностью выброса свыше 5.5 км. Оставшаяся часть очагов приурочена к левому борту долины (хр. Тополовый, гора Бабий Камень) и району Мутновской ГеоЭС, причём фиксация лавин в зонах, где ранее не документировались случаи их схода, свидетельствует о недостаточной изученности отдельных участков бассейна и необходимости расширения сети наблюдений для уточнения границ лавиноопасных территорий.

Результаты исследования также подтверждают, что склоны вулкана Вилучинский представляют собой наиболее активную и опасную зону лавинообразования в бассейне р. Паратунка. В научной литературе подробно описаны случаи формирования лавин на вулканических склонах в период извержений, где триггером выступают сейсмические процессы, пирокластические потоки или обрушение куполов. Вместе с тем специфика зарождения

* СП 428.1325800.2018. *Инженерные изыскания для строительства в лавиноопасных районах. Общие требования*. Москва: Минстрой России, 2019. IV+58 с.

SP 428.1325800.2018. *Engineering surveys for construction in avalanche-prone areas. General requirements*. Moscow: Minstroy Rossii, 2019. IV+58 p. (In Russ.).

и динамики исключительно снежных лавин в межэруптивный период остается малоизученной. Наши данные показывают, что даже без вулканической активности стратовулканы обладают уникальным комплексом морфометрических характеристик, которые в сочетании с региональным климатом и термическим режимом создают условия для регулярного формирования высокоэнергетических лавин.

На основе метода взвешенного линейного суммирования (WLC) разработана карта лавинной опасности, отражающая пространственное распределение вероятности формирования стартовых зон. Интеграция четырех предикторов (крутизна склона, относительная высота, растительный покров и абсолютная высота) с экспертно обоснованными весовыми коэффициентами позволила выделить четыре класса опасности и зону геоморфологического исключения.

Несмотря на доказанную адекватность модели, отмечено, что разработанная карта отражает лишь предрасположенность склонов к отрыву снежной массы и не учитывает динамику движения лавин, дальность выброса и зоны аккумуляции. Пространственное разрешение исходной ЦМР (30 м) и статический характер данных о растительном покрове не позволяют учитывать микроформы рельефа, сезонную изменчивость стабилизирующих факторов и влияние геотермальных аномалий на метаморфизм снега. Тем не менее, высокая пространственная корреляция зон высокой и очень высокой опасности с историческими точками схода лавин, включая трагедию 2006 г. и массовые события 2020 и 2026 гг., подтверждают научную обоснованность выбранной методологии и весовых коэффициентов.

Для перехода от оценки опасности к управлению рисками необходимо дополнить разработанную модель динамическим модулем расчета лавинных траекторий (например, RAMMS или AVAL-1D), провести полевую верификацию на репрезентативных склонах и интегрировать карту с данными о критической инфраструктуре, туристических маршрутах и рекреационных потоках. Регулярный

мониторинг температурного режима грунтов, мощности снежного покрова и метеоусловий позволит уточнить региональные весовые коэффициенты и разработать эффективные критерии раннего предупреждения.

Полученные результаты закладывают научно-методическую основу для минимизации лавинных рисков при развитии горнолыжного туризма и расширении хозяйственной деятельности в долине р. Паратунка. Предложенная карта лавинной опасности и систематизированный архив лавинных событий могут служить надежной базой для проектирования противолавинных сооружений, оптимизации транспортной сети и формирования стратегий устойчивого развития одного из наиболее перспективных, но природно-опасных районов Камчатского края.

Список литературы

1. Чепур А.А. История лавиноведения на Камчатке. В кн.: *Ветер веков в парусах России: материалы XX Крашенинниковских чтений, г. Петропавловск-Камчатский, 24-25 апреля, 2003*. Петропавловск-Камчатский: Камчатская обл. науч. б-ка, 2003, с. 135–138.
2. Виноградов В.Н. Снежные лавины на Камчатке. *Вопросы географии Камчатки*. 1965, 3: 43–48.
3. Тушинский Г.К. *Лавиноопасные районы Советского Союза*. М.: Изд-во МГУ, 1970, 200 с.
4. *Кадастр лавин СССР*. Т. 20. Л.: Гидрометеиздат, 1986, 1988, 1991.
5. Шайхутдинов Р.Ш. *Особенности условий лавинообразования на Камчатке*. Л.: Гидрометеиздат, 1987, с. 398–404. (Труды Второго Всесоюзного совещания по лавинам).
6. Шайхутдинов Р.Ш. *О возможности защиты г. Петропавловска-Камчатского от снежных лавин*. Л.: Гидрометеиздат, 1989, с. 28–33. (Труды Третьего Всесоюзного совещания по лавинам).
7. Шайхутдинов Р.Ш. О снежных лавинах Камчатки. Нальчик: ВГИ, 2012, с. 60–67. (Труды Высокогорного геофизического института; вып. 97).
8. Мягков С.М. (ред.), Канаев Л.А. (ред). *География лавин*. М.: Изд-во МГУ, 1992, 332 с.
9. Котляков В.М. (ред.). *Атлас снежно-ледовых ресурсов мира*. М.: Изд-во РАН, 1997, т. 1. 392 с. EDN: YLUUXL

10. Гинзбург Н.А., Турчанинова А.С. Проблема лавинной безопасности г. Петропавловска-Камчатского. В кн.: *Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации*. Москва: Геомаркетинг, 2022, с. 222–227. EDN: HXHDJB
11. Michael E.A., Samanta S. Landslide vulnerability mapping (LVM) using weighted linear combination (WLC) model through remote sensing and GIS techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2016,2(2):1–14. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0141-7>
12. Malczewski J. On the use of weighted linear combination method in GIS: Common and best practice approaches. *Transactions in GIS*. 2002,4(1):5–22. <https://doi.org/10.1111/1467-9671.00035>
13. Malczewski J. *GIS and multicriteria decision analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1999, 392 p.
14. Маркин В. На «полюсе снежности». *Наука и жизнь*. М.: Изд-во «Правда», 1981, №8: 33–40.
15. Кондратюк В.И. *Климат Камчатки*. М.: Гидрометеиздат, 1974, 202 с.
16. Виноградов В.Н., Ходаков В.Г. Итоги и перспективы исследования географии снежного покрова Камчатки. *Гляциологические исследования*. 1976,25:5–12.
17. Муравьев Я.Д. Снежный покров горных районах Камчатки. *Вопросы географии Камчатки*. 1985,9: 30–41. URL: <http://repo.kscnet.ru/id/eprint/2118> (дата обращения 14.04.2026 г.).
18. Pierson T.C., Janda R.J. Volcanic mixed avalanches: A distinct eruption-triggered mass-flow process at snow-clad volcanoes. *Geological Society of America Bulletin*. 1994,106(10):1351–1358.
19. Waitt R.B. Jr., Pierson T.C., Macleod N.S., Janda R.J., Voight B., Holcomb R.T. Eruption-triggered avalanche, flood, and lahar at Mount St. Helens – effects of winter snowpack. *Science*. 1983,221(4618):1394–1397.
20. Казаков Н.А., Генсировский Ю.В., Жируев С.П. 2018. Литолого-стратиграфические комплексы снежного покрова. *Криосфера Земли*, XXII (1): 72–93. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-1\(72-93\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-1(72-93))
21. Казаков Н.А. О формировании снежных лавин в лесу. *Материалы гляциологических исследований*. 2007,102:192–196.
22. Васильковского М.Г. (ред). *Ресурсы поверхностных вод СССР. Камчатка*. Л.: Гидрометеиздат, 1973, т. 20. 366 с.
2. Vinogradov V.N. [Snow avalanches in Kamchatka]. *Voprosy geografii Kamchatki [Questions of Kamchatka Geography]*. 1965,3:43–48. (In Russ.).
3. Tushinskiy G.K. [Avalanche-prone regions of the Soviet Union]. Moscow: MSU Publ., 1970, 200 p. (In Russ.).
4. [Cadastral of avalanches of the USSR]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986, 1988, 1991, vol. 20. (In Russ.).
5. Shaikhutdinov R.Sh. [Features of avalanche formation conditions in Kamchatka]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, 398–404. (Proceedings of the Second All-Union Conference on Avalanches). (In Russ.).
6. Shaikhutdinov R.Sh. [On the possibility of protecting Petropavlovsk-Kamchatsky from snow avalanches]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989, 28–33. (Proceedings of the Third All-Union Conference on Avalanches). (In Russ.).
7. Shaikhutdinov R.Sh. [On snow avalanches of Kamchatka]. Nalchik: VGI, 2012, p. 60–67. (Proceedings of the High-Mountain Geophysical Institute; issue 97). (In Russ.).
8. Myagkov S.M., Kanaev L.A. (eds) [Geography of avalanches]. Moscow: MSU Publ., 1992, 332 p. (In Russ.).
9. Kotlyakov V.M. (ed.). [Atlas of snow and ice resources of the world]. Moscow: Izd-vo AN, 1997, vol. 1. 392 p. (In Russ.).
10. Ginzburg N.A., Turchaninova A.S. [The problem of avalanche safety in Petropavlovsk-Kamchatsky]. In: *Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation*, Moscow: Geomarketing, 2022, p. 222–227. (In Russ.).
11. Michael E.A., Samanta S. Landslide vulnerability mapping (LVM) using weighted linear combination (WLC) model through remote sensing and GIS techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2016,2,88. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0141-7>
12. Malczewski J. On the use of weighted linear combination method in GIS: Common and best practice approaches. *Transactions in GIS*. 2002,4(1):5–22. <https://doi.org/10.1111/1467-9671.00035>
13. Malczewski J. *GIS and multicriteria decision analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1999, 392 p.
14. Markin V. [At the “pole of snowiness”]. *Nauka i zhizn [Science and Life]*. 1981,8:33–40. (In Russ.).
15. Kondratyuk V.I. [Climate of Kamchatka]. Moscow: Gidrometeoizdat, 1974, 202 p. (In Russ.).
16. Vinogradov V.N., Khodakov V.G. [Results and prospects of studying the geography of snow cover in Kamchatka]. *Glaciological Studies*. 1976,25:5–12. (In Russ.).
17. Murav'ev Ya.D. [Snow cover in mountainous areas of Kamchatka]. *Voprosy geografii Kamchatki [Questions of Kamchatka Geography]*. 1985,9: 30–41. (In Russ.).

References

1. Chepur A.A. History of avalanche studies in Kamchatka. In: *Wind of Ages in the Sails of Russia: proceedings of the XX Krashenninnikov Readings, Petropavlovsk-Kamchatsky, 24-25 april, 2003*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatka Regional Scientific Library, 2003, p. 135–138. (In Russ.).

- URL: <http://repo.kscnet.ru/id/eprint/2118> (accessed on 14.04.2026).
18. Pierson T.C., Janda R.J. Volcanic mixed avalanches: A distinct eruption-triggered mass-flow process at snow-clad volcanoes. *Geological Society of America Bulletin*. 1994,106(10):1351–1358.
 19. Waitt R.B. Jr., Pierson T.C., Macleod N.S., Janda R.J., Voight B., Holcomb R.T. Eruption-triggered avalanche, flood, and lahar at Mount St. Helens – effects of winter snowpack. *Science*. 1983,221(4618):1394–1397.
 20. Kazakov N.A., Gensiorovskiy Yu.V., Zhiruev S.P. [Lithological and stratigraphic complexes of snow cover]. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*. 2018. XXII (1):72–93. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-1\(72-93\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-1(72-93)) (In Russ.).
 21. Kazakov N.A. [On the formation of snow avalanches in forests]. *Materials of Glaciological Studies*. 2007,102:192–196. (In Russ.).
 22. Vaskovskiy M.G. (ed.) [*Surface water resources of the USSR. Kamchatka*]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973, vol. 20, 366 p. (In Russ.).

Об авторах

Озеров Алексей Юрьевич, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, директор, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ИВиС ДВО РАН), Петропавловск-Камчатский, Россия, ozarov@kscnet.ru. <https://orcid.org/0000-0002-6296-4441>

✉ **Боброва Дарья Андреевна**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории оптимизации измерительных платформ, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН (СКБ САМИ ДВО РАН), г. Южно-Сахалинск, Россия, darya-kononova@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0002-5768-2677>

Мельников Дмитрий Владимирович, старший научный сотрудник лаборатории геодезии и дистанционных методов исследования, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ИВиС ДВО РАН), Петропавловск-Камчатский, Россия, dvmivs@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-6882-3124>

About the Authors

Ozerov, Alexey Yu., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Director, Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences (IVS FEB RAS), Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, ozarov@kscnet.ru. <https://orcid.org/0000-0002-6296-4441>

✉ **Bobrova, Darya A.**, Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, Head of the Laboratory for optimization of measurement platforms, Special Research Bureau for Automation of Marine Researches, Far East Branch, Russian Academy of Sciences (SDB MRAT FEB RAS), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, darya-kononova@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0002-5768-2677>

Melnikov, Dmitry V., Senior Researcher, Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences (IVS FEB RAS), Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, dvmivs@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-6882-3124>

Поступила 16.06.2026

Принята к публикации 11.07.2026

Received 16 June 2026

Accepted 11 July 2026

© Авторы, 2026 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2026.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 504.4.054

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.3.347-357>
<https://www.elibrary.ru/ewruvq>

Сезонное и пространственное распределение химического загрязнения водотоков урбанизированной территории с рекреационной специализацией (на примере города Светлогорска Калининградской области)

Е. А. Архипов, С. И. Зотов, Т. А. Яковчук, М. И. Колягина

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия

Резюме. Малые водотоки городов с рекреационной специализацией на побережье Калининградской области испытывают значительную антропогенную нагрузку от коммунально-бытовых стоков и диффузного загрязнения. Однако сезонная динамика и пространственное распределение их химического загрязнения в этих курортных центрах до настоящего времени оставались неизученными. Город Светлогорск имеет статус курорта федерального значения, и качество его водных объектов является важным индикатором экологического благополучия территории. В течение 2025–2026 гг. проведён гидрохимический мониторинг двух водотоков в трех пунктах: ручей Отрадненка и река Светлогорка выше и ниже озера Тихого. Установлено, что приоритетными загрязнителями являются аммоний-ион, фосфат-ион (до 2,5 ПДК), ХПК и общее железо. Сезонная динамика характеризуется летним максимумом и зимним минимумом. ИЗВ варьирует от 0,6 до 3,6. Воды ручья Отрадненка круглый год остаются «умеренно загрязнёнными» или «загрязнёнными». Река Светлогорка выше озера зимой «чистая», летом и осенью загрязняется, а ниже озера в тёплые сезоны качество воды ухудшается максимально.

Ключевые слова: Калининградская область, урбанизированные территории, рекреация, малые водотоки, приоритетные загрязнители, индекс загрязнения вод, сезонная динамика, пространственная изменчивость

Seasonal and spatial distribution of chemical pollution of watercourses in an urbanized area with a recreational specialization (using the example of Svetlogorsk, Kaliningrad Region)

Egor A. Arkhipov, Sergey I. Zotov, Taisiia A. Iakovchuk, Maria I. Kolyagina

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Abstract. Small watercourses of coastal cities with a recreational specialization in the Kaliningrad Region are experiencing significant anthropogenic stress from municipal wastewater and diffuse pollution. However, the seasonal dynamics and spatial distribution of chemical pollution in these resorts have not been sufficiently studied to date. The city of Svetlogorsk has the status of a resort of federal importance, and the quality of its water bodies is an important indicator of the ecological well-being of the area. During 2025–2026, hydrochemical monitoring of two watercourses was carried out at three sampling sites: the Otradnenka stream, the Svetlogorka river upstream and downstream the Tikhoye lake. The results showed that the priority pollutants were ammonium ions, phosphate ions (up to 2.5 times the maximum permissible concentration MPC), chemical oxygen demand (COD), and total iron. Seasonal dynamics were characterized by a summer maximum and a winter minimum. The water pollution index (WPI) ranged from 0.6 to 3.6. The waters of the Otradnenka stream remained either “moderately polluted” or “polluted” throughout the

year round. The Svetlogorka river upstream the lake was classified as “clean” in winter but became polluted in summer and autumn. Downstream of the lake, the water quality deteriorated most markedly during the warm seasons.

Keywords: Kaliningrad Region, urbanized territories, recreation, small watercourses, priority pollutants, water pollution index, seasonal dynamics, spatial variability

Для цитирования: Архипов Е.А., Зотов С.И., Яковчук Т.А., Колягина М.И. Сезонное и пространственное распределение химического загрязнения водотоков урбанизированной территории с рекреационной специализацией (на примере города Светлогорска Калининградской области). *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 3, с. 347–357. <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.3.347-357>; <https://www.elibrary.ru/ewruvq>

For citation: Arkhipov E.A., Zotov S.I., Yakovchuk T.A., Kolyagina M.I. Seasonal and spatial distribution of chemical pollution of watercourses in an urbanized area with a recreational specialization (using the example of Svetlogorsk, Kaliningrad Region). *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 3, p. 347–357. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.3.347-357>; <https://www.elibrary.ru/ewruvq>

Введение

Малые водотоки составляют основу гидрографической сети Калининградской области – на их долю приходится 96 % от общего числа рек региона [1]. Они выполняют важные средообразующие, дренажные и рекреационные функции, однако из-за низкой водности и ограниченной способности к самоочищению

являются наиболее уязвимым звеном при антропогенном воздействии. В условиях урбанизированных территорий качество воды малых рек становится прямым индикатором экологического благополучия города.

Город Светлогорск Калининградской области – курорт федерального значения, находящийся на побережье Балтийского моря (рис. 1). Такая специализация определяет высокие



Рис. 1. Схема расположения пунктов мониторинга малых водотоков г. Светлогорска.

Fig. 1. The layout of monitoring points for small watercourses in the city of Svetlogorsk.

требования к состоянию окружающей среды, в том числе к водным объектам. Река Светлогорка и расположенное на ней озеро Тихое формируют ядро ландшафтного каркаса города, активно используются населением и гостями курорта [2]. Вместе с тем эти водотоки испытывают значительную антропогенную нагрузку от коммунально-бытовых стоков, ливневых сбросов, а также от диффузного загрязнения с водосбора

Предшествующие исследования малых водотоков на территории Калининграда указывали на эпизодическое загрязнение рек органикой и биогенами [3]. Непосредственно для системы река Светлогорка – озеро Тихое в 2019–2021 гг. были получены данные о мягкой, слабощелочной воде с повышенным содержанием нитритов, органических веществ и общего железа (превышение рыбохозяйственного норматива почти в 10 раз). Качество воды по большинству показателей соответствовало III классу («удовлетворительно чистые»), а по содержанию нитритов и органики – IV классу («загрязнённые») [4].

Рекреационная нагрузка служит значимым фактором ухудшения экологического состояния малых водотоков: рост показателей ХПК, БПК₅ и концентраций биогенных элементов (азот, фосфор) напрямую коррелирует с интенсивностью посещения береговых зон [5]. Кроме того, антропогенная нагрузка, связанная с отдыхом и туризмом, вызывает прямую физическую деградацию экосистем – вытапывание берегов, уничтожение растительности, захламление отходами – что снижает устойчивость долинно-речных комплексов [6]. Водотоки, протекающие в пределах городов, являются одними из наиболее чувствительных индикаторов геоэкологического состояния и испытывают значительную антропогенную нагрузку, а их комплексная оценка позволяет выявить кумулятивный эффект загрязнения [7, 8].

Однако эти работы охватывали главным образом осенне-зимний периоды без детального анализа внутригодовой динамики загрязнения, а также не включали оценку по индексу загрязнения вод (ИЗВ) и не выделяли приоритетные загрязнители в зависимости от сезона. Систематические гидрохимические исследо-

вания малых водотоков г. Светлогорска, охватывающие все фазы водного режима, до настоящего времени не проводились.

Цель данной работы – оценить химическое загрязнение и качество вод малых водотоков г. Светлогорска по результатам гидрохимического мониторинга 2025–2026 гг. с выявлением особенностей сезонных и пространственных изменений.

Задачи исследования:

1. Провести полевой гидрохимический мониторинг трех створов в четыре сезона с охватом всех фаз водного режима.
2. Выявить перечень приоритетных загрязнителей и оценить кратность их превышения ПДК.
3. Рассчитать интегральный индекс загрязнения вод (ИЗВ) для каждого створа и сезона.
4. Оценить влияние озера Тихое на трансформацию качества воды реки Светлогорки путем анализа интегральных показателей качества воды (ИЗВ) и концентраций приоритетных поллютантов в створах выше и ниже водоема.

Объекты и методы исследований

Экономика г. Светлогорска базируется на санаторно-курортном и туристическом обслуживании, основу местной экономики формирует рекреационная функция – комплекс услуг, связанных с проведением отдыха, восстановлением сил и здоровья людей. Большая часть территории отведена под 1 и 2 зоны округов санитарной и горно-санитарной охраны лечебно-оздоровительных местностей и курортов федерального значения. На 2026 г. численность населения г. Светлогорска составляет 15 тыс. чел., однако в курортный сезон антропогенная нагрузка, связанная с отдыхом и туризмом, возрастает многократно [9].

Поверхностная гидрографическая сеть города представлена малыми водотоками, впадающими в Балтийское море. Основным водотоком является река Светлогорка, берущая начало в лесном массиве. В нижнем течении, в пределах городской черты, на реке образован пруд после постройки плотины на реке в XIII веке, ныне носит название – озеро Тихое

(глубиной в центральной части до 8 м), после которого река впадает в море.

Для изучения гидрохимического состояния малых водотоков г. Светлогорска была организована система мониторинга, включающая три пункта (рис. 1).

Пункт №1 – ручей Отраденка, малый водоток, ширина варьирует от 1,00 м весной до 1,70 м зимой, а глубина изменяется от 0,13 м в летнюю межень до 0,26 м весной. Крайне низкие скорости течения (0,040–0,065 м/с во все сезоны) обуславливают слабопроточный режим воды. В летнюю межень при минимальной глубине и ширине водоток превращается в узкий, слабопроточный ручей, где турбулентное перемешивание практически отсутствует.

Пункт №2 – река Светлогорка выше озера Тихое – характеризуется более благоприятными условиями для разбавления. Ширина русла стабильна (2,30–2,35 м во все сезоны), глубина колеблется от 0,22 м весной до 0,26 м летом. Скорость течения существенно выше, чем в ручье Отраденка: минимальная отмечена зимой (0,155 м/с), максимальная – осенью (0,555 м/с). В летнюю межень при скорости 0,263 м/с и глубине 0,26 м сохраняется умеренный водообмен, что несколько снижает риск застойных явлений. Однако следует учитывать, что именно в этот створ поступают ливневые и поверхностные стоки с центральной части города, включая объекты общественного питания и придомовые территории.

Пункт №3 – река Светлогорка после озера Тихое – находится ниже озера, перед впадением в Балтийское море. Это самый широкий створ наблюдений (2,4–2,6 м) с наибольшими глубинами (до 0,35 м зимой). Скорость течения здесь максимальна среди всех створов: от 0,292 м/с весной до 0,555 м/с летом. Озеро Тихое выполняет роль отстойника: в нём осаждаются взвешенные вещества и происходит частичная трансформация биогенных элементов.

Полевые исследования выполнены в течение 2025–2026 гг. с охватом четырёх основных фаз водного режима: вторая декада апреля 2025 г. (весеннее половодье), вторая декада июля 2025 г. (летняя межень), вторая декада октября 2025 г. (осенний паводочный период)

и первая декада марта 2026 г. (зимний период). Перенос зимнего пробоотбора с января на начало марта связан с аномальными синоптическими условиями января–февраля 2026 г. на территории Калининградской области [10], когда устойчивые отрицательные температуры и осадки привели к длительному промерзанию водотоков, что сделало невозможным отбор проб воды. Отбор проб воды проводили в соответствии с ГОСТ Р 59024-2020 «Вода. Общие требования к отбору проб».

Кроме того, для интерпретации сезонной динамики загрязнения одновременно с отбором проб воды в каждом створе фиксировались морфометрические характеристики русла и скорость течения (гидрологическая микровертушка ГМЦМ-1).

Гидрохимические исследования выполнены в лаборатории Высшей школы живых систем БФУ им. И. Канта. Аналитический контроль включал определение комплекса показателей по утвержденным методикам: содержание взвешенных веществ (РД 52.24.468-2019), ХПК (ПНД Ф 14.1:2:4.190-2003), БПК₅ (ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97), нитратов (ПНД Ф 14.1:2:4-95), нитритов (ПНД Ф 14.1:2:4.3-95), аммонийного азота (ПНД Ф 14.1:2.1-95), фосфатов (ПНД Ф 14.1:2:4.157-99), сухого остатка (ПНД Ф 14.1:2:4.261-2010), хлоридов (ГОСТ 4245-72), сульфатов (ПНД Ф 14.1:2.159-2000), общего железа (ПНД Ф 14.1:2:3.2-95) и нефтепродуктов (ПНД Ф 14.1:2:4.128-98). Измерения проводили на двухлучевом спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu, Япония), спектрофлуориметра RF-5301PC (Shimadzu, Япония) и системы капиллярного электрофореза (КАПЕЛЬ-105М, Россия).

Оценка загрязнения выполнена путём сравнения измеренных концентраций с предельно допустимыми концентрациями (ПДК), установленными СанПиН 1.2.3685-21 для водных объектов хозяйственно-бытового значения. Для интегральной характеристики качества вод применялся индекс загрязнения вод (ИЗВ), согласно СП 502.1325800.2021.

Обработка данных с использованием Microsoft Excel (Пакет R) для определения сходимости результатов лабораторных определе-

ний включала расчет стандартных параметров описательной статистики выборок: среднее арифметическое, стандартное отклонение, минимальное и максимальное значения, а также доверительный интервал для среднего при уровне значимости 0,05. Картографическое обеспечение исследований базировалось на данных открытых источников картографических данных [11, 12]. Визуализация данных и построение тематических картографических схем пространственно-временной изменчивости качества вод [13–16] выполнены в графическом редакторе CorelDRAW.

Результаты и обсуждение

Данные гидрохимического мониторинга по четырём сезонам показывают, что все обследованные водотоки испытывают устойчивое загрязнение, характер и интенсивность которого закономерно меняются в зависимости от фазы гидрологического режима.

В весеннее половодье (табл. 1), несмотря на повышенные расходы воды, в водотоках г. Светлогорска фиксируется устойчивое био-

генное загрязнение. Максимальная нагрузка приурочена к ручью Отрадненка, где БПК₅ и ХПК превышают ПДК в 3,7 и 2,6 раза соответственно, а аммоний-ион в 2,2 раза, что свидетельствует о свежем поступлении коммунально-бытовых стоков. На реке Светлогорке выше озера Тихое уровень загрязнения ниже, однако аммоний-ион также превышает норматив. Ниже озера происходит заметное снижение концентраций аммония и органики, что подтверждает аккумулирующую роль озера, которое эффективно осаждает взвеси и частично трансформирует биогенные элементы в весенний период.

В летнюю межень (табл. 1), при минимальных расходах воды, максимальной температуре и пиковой рекреационной нагрузке, качество воды резко ухудшается во всех створах. В ручье Отрадненка концентрации аммоний-иона и фосфат-иона достигают 5,9 и 2,5 ПДК соответственно, что связано с интенсивным использованием моющих средств и поступлением сточных вод от санаторно-курортных объектов. Выше озера Тихое отмечается локальное снижение аммония, но фосфаты и железо превышают нормативы.

Таблица 1. Гидрохимические показатели весной и летом 2025 года в исследуемых водотоках

Table 1. The content of pollutants in the spring and summer of 2025 in the studied watercourses

Показатель	Концентрация загрязняющих веществ мг/л						ПДК хоз-быт
	Весенний сезон			Летний сезон			
	1	2	3	1	2	3	
рН	7,55	7,62	7,65	7,44	7,25	7,58	6-9
БПК5	14,60	1,70	1,70	6,5	7	8,4	4
Растворенный кислород	5,64	5,65	5,08	5,42	4,95	4,36	>4
Взвешенные в-ва	0,253	0,306	0,235	0,124	0,119	0,113	0,75
Сухой остаток	476,7	220	223,3	31,1	8,3	10,3	1000
Нефтепродукты	0,0252	0,0298	0,0244	0,0326	0,0321	0,0503	0,1
ХПК	77,5	25,8	7,6	42,6	78,1	75,8	30
Нитраты	0,983	0,7053	0,1299	0,463	0,695	0,922	50
Нитриты	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,1
Аммоний-ион	3,339	2,504	1,414	8,784	0,5482	5,70	1,5
Сульфаты	5,401	18,08	25,12	8,98	15,14	36,65	100
Хлориды	11,11	12,9	13,05	47,37	20,34	25	300
Фосфат-ион	0,0601	0,2552	<0,01	2,461	0,8843	<0,01	1
Железо общее	0,495	<0,01	<0,01	2,0386	0,7604	0,374	0,3

Осенью (табл. 2), в фазу паводков, несмотря на некоторое увеличение водности по сравнению с летней меженью, качество воды остаётся напряжённым, а кислородный режим становится критическим. Во всех трёх створах содержание растворённого кислорода опускается ниже 4 мг/л (2,97–3,03 мг/л), что свидетельствует о продолжающемся окислении органического вещества, накопленного за летний сезон. В ручье Отрадненка сохраняются превышения ПДК по БПК₅ (1,4 ПДК), ХПК (2,3 ПДК) и аммоний-иону (1,5 ПДК). На реке Светлогорке выше озера концентрации большинства показателей снижаются до уровней, близких к норме, однако ниже озера вновь фиксируется превышение фосфат-иона (1,1 ПДК) и общего железа (2,7 ПДК).

В зимний период (табл. 2), при установлении ледостава и минимальной биологической активности, происходит относительная стабилизация гидрохимического режима. Концентрации БПК₅, ХПК, аммоний-иона и фосфат-иона во всех створах снижаются до значений ниже ПДК, а содержание растворённого кислорода

возрастает до 5,2–6,1 мг/л благодаря повышенной растворимости газов при низких температурах и сокращению процессов потребления кислорода на окисление органики. Исключение составляет общее железо: в ручье Отрадненка и выше озера Тихое его концентрация превышает норматив в 3,6 и 2,3 раза соответственно, что подтверждает постоянный, не зависящий от сезона характер поступления железа.

Обобщение результатов по всем 12 пробам (три створа, четыре сезона) позволяет выделить группу приоритетных загрязнителей, для которых превышение ПДК носит систематический характер (рис. 2). Аммоний-ион превышает норматив в 50 % проб, достигая максимальной кратности 5,9 ПДК летом в ручье Отрадненка. Фосфат-ион фиксируется выше ПДК в 17 % проб, причём максимальные значения (2,5 ПДК) также приурочены к летней межени. ХПК превышает норматив в 58 % проб, а БПК₅ – в 50 % проб.

Общее железо превышает ПДК в 67 % проб, но его сезонная динамика отличается, даже зимой, при общем улучшении качества воды,

Таблица 2. Гидрохимические показатели осенью 2025 года и зимой 2026 года в исследуемых водотоках
Table 2. The content of pollutants in the autumn of 2025 and winter of 2026 in the studied watercourses

Показатель	Концентрация загрязняющих веществ мг/л						ПДК хоз-быт
	Осенний сезон			Зимний сезон			
	1	2	3	1	2	3	
рН	7,43	7,46	7,52	7,6	7,88	7,62	6-9
БПК5	5,6	3,4	5,3	1,1	0,6	2,8	4
Растворенный кислород	2,97	3,03	2,98	5,23	5,6	6,05	4
Взвешенные в-ва	0,85	0,06	0,61	0,034	0,101	0,023	0,75
Сухой остаток	520	466,7	303,3	43,3	110,0	153,3	1000
Нефтепродукты	0,0043	0,0123	0,0168	0,0033	0,0102	0,0156	0,1
ХПК	67,6	52,2	61,4	19,2	22,4	25,6	30
Нитраты	7,6	1,366	0,6481	0,01	7,068	4,168	50
Нитриты	<0,01	<0,01	<0,01	0,1095	<0,01	0,0845	0,1
Аммоний-ион	2,21	1,543	0,314	0,3137	0,1174	0,1296	1,5
Сульфаты	37,49	18,29	30,19	34,25	18,68	21,13	100
Хлориды	25,22	16,13	18,52	17,47	12,04	26,25	300
Фосфат-ион	<0,01	0,1025	1,124	0,753	0,304	0,1653	1
Железо общее	0,1116	0,329	0,8224	1,0848	0,676	0,034	0,3

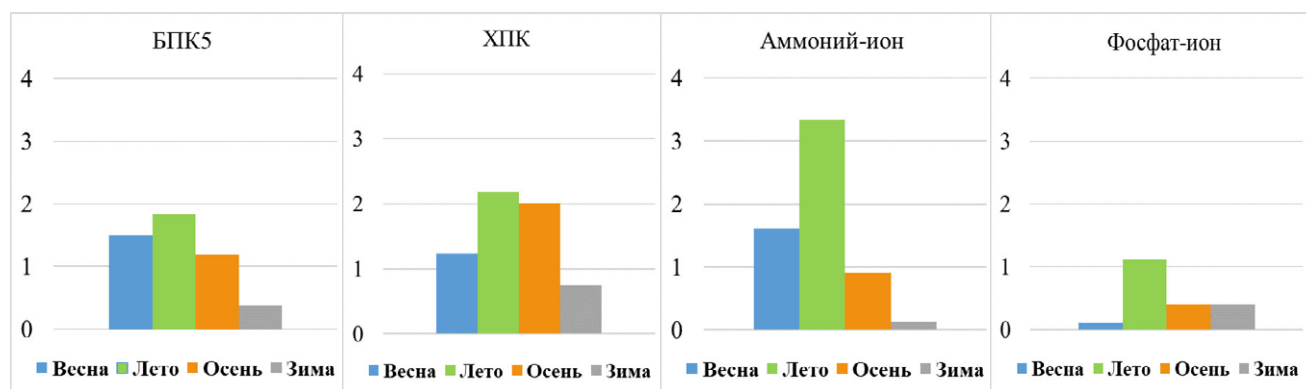


Рис. 2. Сезонная динамика преобладающих загрязнителей водотоков в г. Светлогорске (значения даны в кратности превышения ПДК).
Fig. 2. Seasonal dynamics of priority pollutants of watercourses in the city of Svetlogorsk (values are given as multiples of the MPC).

железо остаётся выше норматива. Такая динамика может говорить о поступлении этого элемента преимущественно от литогенных источников, и в меньшей степени от антропогенных.

Все четыре выделенных приоритетных загрязнителя демонстрируют однотипный сезонный ритм с резким летним максимумом и зимним минимумом, однако амплитуда колебаний различается. Наиболее контрастная динамика характерна для аммоний-иона и фосфат-иона: их средние концентрации возрастают от весны к лету в 2–3 раза, а затем снижаются осенью и достигают минимальных значений зимой. Органическое загряз-

нение (ХПК) также максимально летом, но и весной, и осенью сохраняется на уровне, превышающем ПДК, что указывает на круглогодичное поступление органики. Такая сезонная ритмика тесно связана с гидрологическим режимом: летняя межень с минимальными расходами воды и скоростями течения создаёт условия для накопления загрязнителей, тогда как зимой, несмотря на ледостав, повышенная растворимость кислорода и снижение биологической активности способствуют частичному самоочищению [17].

Для интегральной оценки качества воды рассчитан индекс загрязнения вод (рис. 3).

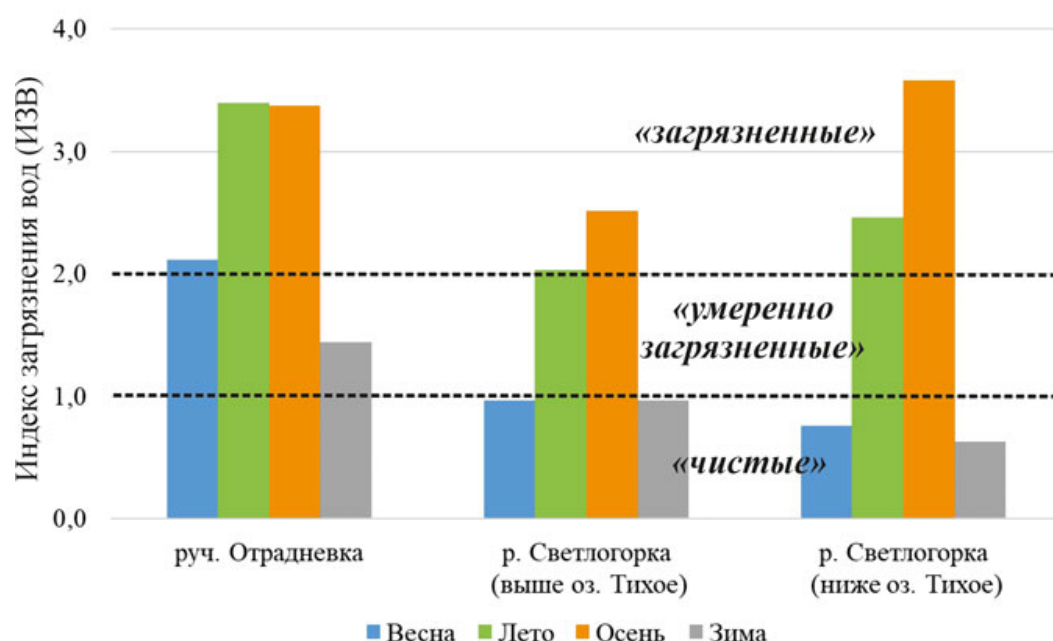


Рис. 3. Сезонная динамика качества вод исследуемых водотоков в г. Светлогорске.

Fig. 3. Seasonal dynamics of water quality of the studied watercourses in the city of Svetlogorsk.

Наиболее неблагоприятный водоток ручей Отраденка, где ИЗВ весной составляет 2,1, летом и осенью достигает 3,4 (категория «загрязнённые»), а зимой снижается до 1,4 («умеренно загрязнённые»). В реке Светлогорке выше озера Тихое качество воды весной и зимой соответствует категории «чистые», но летом и осенью переходит в категорию «загрязнённые». Ниже озера Тихое значения ИЗВ весной и зимой ещё ниже и также соответствуют категории «чистые», а в летний и особенно осенний периоды качество вод значительно снижается, возможно, это указывает на трансформацию озера из аккумулятора загрязнителей в их вторичный источник [18–21].

Пространственное распределение качества вод (рис. 4) обнаруживает, что устойчивая и максимальная антропогенная нагрузка приурочена к ручью Отраденке, протекающему в восточной части города.

В центральной части (р. Светлогорка выше озера) качество воды варьирует от «чистых» до «загрязнённых» с сезонным пиком летом. Ниже озера Тихое, благодаря аккумулирующей функции озера, показатели улучшаются в весенний и зимний периоды, однако летом и осенью озеро само становится источником вторичного загрязнения (вынос биогенных элементов). Пространственный градиент загрязнения направлен от верховий к устью, но с локальным ухудшением после озера в тёплые сезоны.

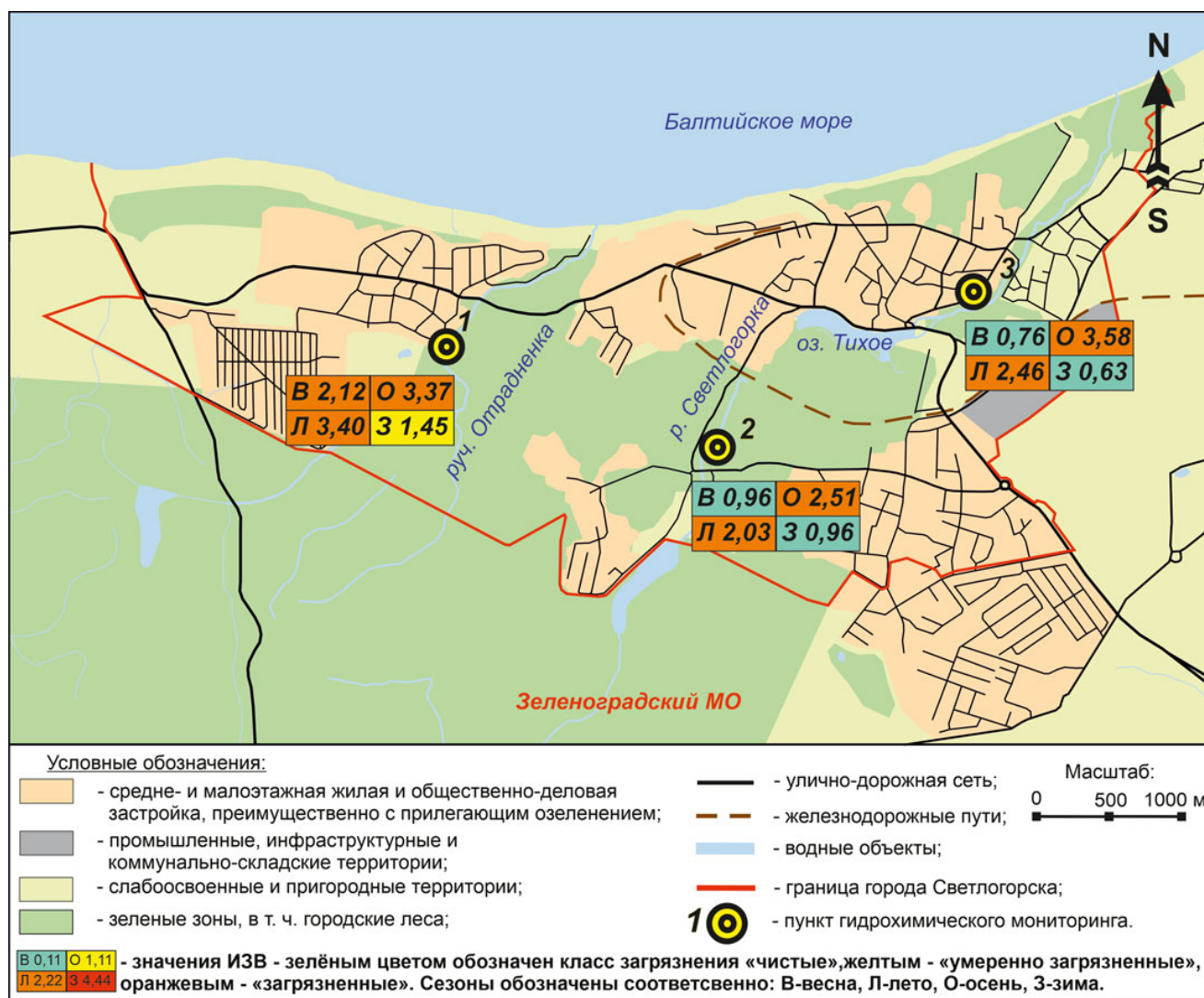


Рис. 4. Сезонное и пространственное распределение качества вод исследуемых водотоков в г. Светлогорске.

Fig. 4. Seasonal and spatial distribution of water quality of the studied watercourses in the city of Svetlogorsk.

Заключение

Проведённые исследования показали, что малые водотоки г. Светлогорска испытывают устойчивую антропогенную нагрузку, формирующую выраженную сезонную и пространственную динамику качества воды. Установлено, что основными источниками загрязнения служат коммунально-бытовые стоки и рекреационная деятельность, а приоритетными поллютантами являются аммоний-ион, фосфат-ион, органические вещества (ХПК, БПК₅) и общее железо. Сезонный ритм характеризуется резким ухудшением в летнюю межень, когда концентрации биогенных элементов достигают максимальных значений, и относительной стабилизацией в зимний период, однако повышенное содержание железа сохраняется круглогодично. Интегральный индекс загрязнения вод варьировал от 0,6 до 3,6, что соответствует категориям от «чистых» до «загрязнённых».

Наиболее неблагополучным водотоком признан ручей Отрадненка, где качество воды даже зимой не поднимается выше класса «умеренно загрязнённые». Озеро Тихое, выступая в роли естественного отстойника в холодное время года, в тёплые сезоны утрачивает буферную функцию и становится источником вторичного загрязнения, что подтверждается ростом ИЗВ ниже по течению. Полученные результаты свидетельствуют об исчерпании ассимиляционного потенциала водотоков (в первую очередь руч. Отрадненка) под воздействием рекреационного пресса и диктуют необходимость водоохранных мероприятий: модернизации ливневой канализации, организации очистки сточных вод санаторно-курортных объектов.

Список литературы

- Нагорнова Н.Н., Берникова Т.А., Цупикова Н.А. Гидрогеохимическая характеристика малых рек Калининградской области. *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта*. 2011,7:160–166. EDN: NYCYTH
- Алферов В.О., Цветкова Н.Н. Результаты гидрохимического мониторинга реки Светлогорки и оз. Тихого в осенне-зимний период по наблюдениям в 2019–2020 гг. *Вестник молодежной науки*. 2020,5(7):14. DOI: 10.46845/2541-8254-2020-5(7)-14-14
- Архипов Е.А., Платоненко Г.О., Зотов С.И. Оценка химического загрязнения малых водотоков города Калининграда. В кн.: *Проблемы приграничья. Новые траектории международного сотрудничества: Материалы IX Международной научно-практической конференции, Калининград, 21–24 октября 2025 года*. Калининград: Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 2025, т. 9, с. 202–210. EDN: KDQNHU
- Алферов В.О., Цветкова Н.Н. Геоэкологическая характеристика системы река Светлогорка–пруд Тихий по наблюдениям 2019–2021 гг. *Вестник молодежной науки*. 2022. [https://doi.org/10.46845/2541-8254-2022-2-2\(34\)-10-10](https://doi.org/10.46845/2541-8254-2022-2-2(34)-10-10)
- Севостьянова Е.А., Меньшенин А.С., Никрашевская А.Э., Глинская А.С., Цупикова Н.А. Современное экологическое состояние водоемов рекреационного назначения Калининграда. В кн.: *Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: XIII национальная (всероссийская) научно-практическая конференция, Петропавловск-Камчатский, 29-30 марта, 2022*. Петропавловск-Камчатский: 2022, с. 193–197.
- Широкова В.А., Хуторова А.О., Юрова Ю.Д. Оценка антропогенного влияния на экологическое состояние рекреационных зон на примере реки Осётр в Московской области. *Московский экономический журнал*. 2017,(4):50. EDN: ZWIMDJ
- Архипов Е.А., Зотов С.И. Методический подход к геоэкологической оценке урбанизированных территорий. *Геосферные исследования*. 2026,2:187–200. <https://doi.org/10.17223/25421379/39/11>.
- Майорова Л.П., Архипов Е.А., Кошельков А.М. Комплексная оценка экологического состояния урбанизированной территории. *Экология и промышленность России*. 2025,29(5):44–50. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2025-5-44-50>
- Гапанович А.В. Рекреационное зонирование территории Калининградской области. *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта*. 2014,1:148–158. EDN: RVLNMZ
- Калининградский ЦГМС — филиал ФГБУ «Северо-Западное УГМС». Гидрометеорологическая обстановка в феврале 2026 г. по Калининградской области. URL: <https://mete039.ru/gidro/531-2026-hydromet-m1-2.html> (дата обращения: 20.05.2026).
- Open Street Map. URL: www.openstreetmap.org (дата обращения 20.12.2025).
- Генеральные планы муниципальных образований. URL: <https://mingrad.gov39.ru/> (дата обращения 20.12.2025).

13. Бегдай И.В., Мишвелов Е.Г., Харин К.В., Шкарет К.Ю. Эколого-геохимическая оценка состояния реки Уруп в зоне действия Урупского ГОК. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2025,(4):94–110. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-94-110>
14. Цупикова Н.А., Федоров Л.С. Информационно-аналитическое обеспечение водоохранной деятельности в Калининградской области. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2025,(6):80–99. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-80-99>
15. Джамалов Р.Г., Мироненко А.А., Мягкова К.Г., Решетняк О.С., Сафронова Т.И. Пространственно-временной анализ гидрохимического состава и загрязнения вод в бассейне Северной Двины. *Водные ресурсы*. 2019,46(2):149–160. doi: 10.31857/S0321-0596462149-160
16. Lämmchen M., Klasmeier J., Hernandez-Leal L., Berlekamp J. Spatial modelling of micro-pollutants in a strongly regulated cross-border lowland catchment. *Environmental Processes*. 2021,1(8):973–992.
17. Злышко А.С., Чеснокова С.М., Бородин И.А. Антропогенная трансформация и самоочищающая способность малой реки. *Теоретическая и прикладная экология*. 2012,3:44–49. EDN: OIUYSK
18. Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Решетняк О.С., Решетняк В.Н. Донные отложения как индикатор первичного и источник вторичного загрязнения речных вод углепромышленных территорий Восточного Донбасса. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2020,2:259–271. <https://doi.org/10.31857/S2587556620020168>
19. Усманов И.А., Магай М.П. Донные отложения как источник загрязнения природных вод. *Экологический вестник Северного Кавказа*. 2020,16(1):73–76. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42562605>
20. Иващенко Т.И., Архипов Е.А. Моделирование взаимосвязи загрязнения донных отложений с внешними факторами на примере р. Силинка, г. Комсомольск-на-Амуре. *Инженерный вестник Дона*. 2024,1(109):334–341.
21. Jiang M., Wang Q., Tian X., Zhu X., Dong X., Wu Z., Yuan Y. Spatiotemporal variation and ecological risk assessment of sediment heavy metals in two hydrologically connected lakes. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2022,10:1005194. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.1005194>
2. Alferov V.O., Tsvetkova N.N. Results of hydrochemical monitoring of the Svetlogorka river and Tikhoye lake in autumn and winter according to observations in 2019–2020. *Vestnik molodezhnoj nauki = Bulletin of Youth Science*. 2020,5(7):14. (In Russ.). DOI: 10.46845/2541-8254-2020-5(27)-14-14
3. Arkhipov E.A., Platonenko G.O., Zotov S.I. Assessment of chemical pollution of small watercourses in the city of Kaliningrad. In: *Problems of Borderlands. New Trajectories of International Cooperation: Proceedings of the IX International scientific and practical conference, Kaliningrad, October 21–24, 2025*. Kaliningrad: Immanuel Kant Baltic Federal University, 2025, v. 9, p. 202–210. (In Russ.). EDN: KDQHJU
4. Alferov V.O., Tsvetkova N.N. Geoecological characteristics of the Svetlogorka River – Tikhoye Pond system based on observations in 2019–2021. *Vestnik molodezhnoj nauki = Bulletin of Youth Science*. 2022. (In Russ.). [https://doi.org/10.46845/2541-8254-2022-2-2\(34\)-10-10](https://doi.org/10.46845/2541-8254-2022-2-2(34)-10-10)
5. Sevostyanova E.A., Men'shenin A.S., Nikrashevskaya A.E., Glinskaya A.S., Tsupikova N.A. Current ecological state of recreational water bodies in Kaliningrad. In: *National (All-Russian) Scientific and Practical Conference "Natural Resources, Their Current State, Protection, Commercial and Technical Use"*. 2022. (In Russ.)
6. Shirokova V.A., Khutorova A.O., Yurova Yu.D. Assessment of anthropogenic impact on the ecological state of recreational areas on the example of the Osetr river in the Moscow Region. *Moskovskij ekonomicheskij zhurnal = Moscow Economic Journal*. 2017,4:50. (In Russ.). EDN: ZWIMDJ
7. Arkhipov E.A., Zotov S.I. Methodological approach to geoecological assessment of urbanized territories. *Geosfernye issledovaniya = Geosphere Research*. 2026,2:187–200. (In Russ.) <https://doi.org/10.17223/25421379/39/11>
8. Mayorova L.P., Arkhipov E.A., Koshel'kov A.M. Comprehensive assessment of the ecological state of an urbanized territory. *Ecology and Industry of Russia*. 2025,29(5):44–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2025-5-44-50>
9. Gapanovich A.V. Recreational zoning of the Kaliningrad Region. *Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta = Bulletin of the Immanuel Kant Baltic Federal University*. 2014,1:148–158. (In Russ.). EDN: RVLNMZ
10. Kaliningradskij TsGMS – filial FGBU «Severo-Zapadnoe UGMS». Hydrometeorological situation in February 2026 in the Kaliningrad region. URL: <https://meteo39.ru/gidro/531-2026-hydromet-m1-2.html> (accessed: 20.05.2026). (In Russ.)

References

11. Open Street Map. URL: www.openstreetmap.org (accessed: 20.12.2025).
12. General plans of municipalities. URL: <https://mingrad.gov39.ru/> (accessed: 20.12.2025). (In Russ.)
13. Begdaj I.V., Mishvelov E.G., Kharin K.V., Shkaret K. Yu. Ecogeochemical assessment of the state of the Urup River in the zone of influence of the Urup Mining and Processing Plant. *Vodnoe khozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie = Water sector of Russia: problems, technologies, management*. 2025,(4):94–110. (In Russ.). <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-94-110>
14. Tsupikova N.A., Fedorov L.S. Information and analytical support for water protection activities in the Kaliningrad Region. *Vodnoe khozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie = Water sector of Russia: problems, technologies, management*. 2025,(6):80–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-80-99>
15. Dzhamalov R.G., Mironenko A.A., Myagkova K.G., Reshetnyak O.S., Safronova T.I. Spatio-temporal analysis of hydrochemical composition and water pollution in the Northern Dvina basin. *Water Resources*. 2019,46(2):149–160. (In Russ.). doi: 10.31857/S0321-0596462149-160
16. Lämmchen M., Klasmeier J., Hernandez-Leal L., Berlekamp J. Spatial modelling of micro-pollutants in a strongly regulated cross-border lowland catchment. *Environmental Processes*. 2021,1(8):973–992.
17. Zlyvko A.S., Chesnokova S.M., Borodina I.A. Anthropogenic transformation and self-purification capacity of a small river. *Theoretical and Applied Ecology*. 2012,3:44–49. (In Russ.). EDN: OIUYKC
18. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Reshetnyak O.S., Reshetnyak V.N. Bottom sediments as an indicator of primary and a source of secondary pollution of river waters in coal-mining areas of the Eastern Donbass. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2020,2:259–271. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587556620020168>
19. Usmanov I.A., Magaj M.P. Bottom sediments as a source of pollution of natural waters. *Ekologicheskij Vestnik Severnogo Kavkaza = Ecological Bulletin of the North Caucasus*. 2020,16(1):73–76. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42562605>
20. Ivashchenko T.I., Arkhipov E.A. Modeling of the relationship between pollution of bottom sediments and external factors on the example of the Silinka river, Komsomolsk-on-Amur. *Inzhenernyj vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*. 2024,1(109):334–341. (In Russ.).
21. Jiang M., Wang Q., Tian X., Zhu X., Dong X., Wu Z., Yuan Y. Spatiotemporal variation and ecological risk assessment of sediment heavy metals in two hydrologically connected lakes. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2022,10:1005194. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.1005194>.

Об авторах

✉ **Архипов Егор Александрович**, аспирант, Институт естественных наук, ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта», Калининград, Россия, egor.arhipov2000@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0007-8946-2648>

Зотов Сергей Игоревич, доктор географических наук, профессор, Институт естественных наук, ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта», Калининград, Россия, zotov.prof@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-6509-7398>

Яковчук Таисия Андреевна, студент, Институт естественных наук, ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта», Калининград, Россия, tayataya010705@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0008-0883-9536>

Колягина Мария Игоревна, студент, Институт естественных наук, ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта», Калининград, Россия, mikoljagina@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0001-2922-4433>

Поступила 19.06.2026

Принята к публикации 26.08.2026

About the Authors

✉ **Arkhipov, Egor A.**, Postgraduate Student of the Institute of Natural Sciences, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, egor.arhipov2000@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0007-8946-2648>

Zotov, Sergey I., Doctor of Geography, Professor of the Institute of Natural Sciences, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, zotov.prof@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-6509-7398>

Iakovchuk, Taisiia A., Student of the Institute of Natural Sciences, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, tayataya010705@gmail.com. <http://orcid.org/0009-0008-0883-9536>

Kolyagina, Maria I., Student of the Institute of Natural Sciences, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, mikoljagina@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0001-2922-4433>

Received 19 June 2026

Accepted 26 August 2026



Влияние использования консорциума эффективных микроорганизмов на биологические свойства и содержание гумуса в почвах трех контрастных агроэкосистем

Е. А. Евсеева^{1,2}, Я. О. Тимофеева²

¹ ООО «Приморский ЭМ-Центр», Владивосток, Россия

² Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия

Резюме. В условиях современного землепользования одним из ключевых экологических вызовов является нарушение баланса между процессами деструкции и гумификации органического вещества почв, что ведёт к прогрессирующей дегумификации и снижению устойчивости агроэкосистем. Целью проводимых исследований являлось изучение воздействия консорциума эффективных микроорганизмов (препарат «Восток ЭМ-1») на структурно-функциональные изменения микробного сообщества и процессы трансформации органического вещества в почвах трёх контрастных агроэкосистем земледельческих регионов России. Полевые опыты были заложены в период 2018–2024 гг. в Самарской области (агрочернозёмы), Красноярском крае (агротемно-серые почвы) и Приморском крае (агротемногумусовые подбелы). В работе использованы общепринятые в микробиологии почв (общая биогенность, целлюлозоразлагающая активность), почвоведении (содержание гумуса), агрохимии (учет урожайности выращиваемых культур) аналитические и расчетные методы. Установлено, что применение препарата увеличивает общую биогенность (от 10 до 295%) и целлюлозоразлагающую активность (в среднем на 60%) всех исследованных почв. В почвах всех регионов проведения исследований отмечена смена типа микробного сообщества с грибного (минерализующего) на бактериальный (гумусообразующий). Выявлен накопительный эффект использования препарата в экологической регуляции формирования гумуса. В агрочернозёмах Самарской области трансформация микробного сообщества и последующая стабилизация гумусовых соединений достигнуты на третий год применения препарата (потери гумуса сократились в 8 раз). В агротемно-серых почвах Красноярского края устойчивый положительный эффект зафиксирован на второй год (прирост гумуса 32%, рост *B:F ratio* в 2.3 раза) использования препарата. В агротемногумусовых подбелах Приморского края положительный эффект от использования препарата (прирост гумуса 36%) отмечен уже в первый год его применения. Полученные результаты свидетельствуют о направленной регуляции почвенной микробиоты применяемым консорциумом эффективных микроорганизмов, что позволяет рассматривать его как эффективный инструмент оптимизации процессов деструкции и гумификации органических соединений, сопровождающихся депонированием углерода в пахотных горизонтах различных типов почв и повышением экологической устойчивости почвенной системы.

Ключевые слова: почвы агроэкосистем, гумус, эффективные микроорганизмы, Восток ЭМ-1, биотическая регуляция, экологическая устойчивость

Effects of applying an effective microorganism consortium on the biological properties and humus content of soils in three contrasting agroecosystems

Ekaterina A. Evseeva^{1,2}, Yana O. Timofeeva²

¹ Limited Liability Company «Primorsky EM-Center», Vladivostok, Russia

² Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

Abstract. One of the key environmental problems in modern agriculture is the imbalance between the processes of organic matter decomposition and humification in soils, leading to the progressive soil dehumification and reduced agroecosystem sustainability. The aim of the study was to investigate the influence of the effective microorganism consortium (Vostok EM-1) on structural and functional alteration of the microbial community and the processes of organic matter transformation in soils of three contrasting agroecosystems located in agricultural regions of Russia. Field experiments were conducted during 2018–2024 in Samara Oblast (agrochernozems), Krasnoyarsk Krai (agro-dark gray soils), and Primorsky Krai (agro-dark humus podbels). The analytical and calculation methods commonly accepted in soil microbiology (total soil biogenicity, cellulolytic activity), soil science (humus content), and agrochemistry (crop yield assessment) were employed. It was found that the application of the microbiological agent increased the overall biogenicity (from 10 to 295%) and cellulolytic activity (by an average of 60%) in all studied soils. The shift in the microbial community from a fungal (mineralizing) to a bacterial (humus-forming) type was observed in soils from all studied regions. A cumulative effect of the microbiological agent application on the ecological regulation of humus formation was identified. The transformation of the microbial community and subsequent stabilization of humus compounds were achieved in the third year of the microbiological agent application in agrochernozems from the Samara Oblast, with humus losses decreasing eightfold. A stable positive effect was determined in the second year of the microbiological agent application in agro-dark gray soils from Krasnoyarsk Krai, including a 32% increase in humus and a 2.3-fold increase in *B:F ratio*. A positive effect from the microbiological agent was observed as early as the first year of its application in agro-dark humus podbels from Primorsky Krai, with a 36% increase in humus. The obtained results indicate directed regulation of soil microbiota by the applied effective microorganism consortium, which allows it to be considered an effective instrument for optimizing the decomposition and humification of organic compounds, accompanied by carbon sequestration in the plough layer of various soil types and by increased environmental sustainability of the soil system.

Keywords: soils of agroecosystems, humus, effective microorganisms, Vostok EM-1, biotic regulation, ecological sustainability

Финансирование и благодарности

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124012400285-7). Авторы благодарят уважаемых рецензентов за внимание к данной работе и конструктивные замечания.

Funding and Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 124012400285-7). The authors thank the respected Reviewers for their attention to this paper and their constructive comments.

Для цитирования: Евсеева Е.А., Тимофеева Я.О. Влияние использования консорциума эффективных микроорганизмов на биологические свойства и содержание гумуса в почвах трех контрастных агроэкосистем. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 3, с. 358–370. <https://doi.org/10.30730/grtz.2026.10.3.358-370>; <https://www.elibrary.ru/sblmaj>

For citation: Evseeva E.A., Timofeeva Ya.O. Effects of applying an effective microorganism consortium on the biological properties and humus content of soils in three contrasting agroecosystems. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 3, p. 358–370. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/grtz.2026.10.3.358-370>; <https://www.elibrary.ru/sblmaj>

Введение

Современное состояние агроэкосистем характеризуется нарастающими процессами деградации почвенного покрова, что приводит к нарушению ключевых экосистемных функций почв [1]. Одной из центральных агрохимических и экологических проблем почв агрофитоценозов является дисбаланс в процессах трансформации органического вещества, выражающийся в преобладании процессов минерализации над гумификацией. Такое смещение

обусловлено интенсивной агротехнической нагрузкой, приводящей к снижению разнообразия почвенных микробоценозов — основных регуляторов трансформации органических соединений [2, 3]. Следствием становятся прогрессирующая дегумификация, активизация эмиссии парниковых газов и потеря углерода почвами [4].

Экологическая устойчивость почвы определяется сбалансированностью процессов деструкции и гумификации [5, 6]. Деструкция обеспечивает мобилизацию элементов питания

и замыкание биологических циклов, гумификация — депонирование углерода, формирование агрономически ценной структуры и долговременной устойчивости агроэкосистем. Одним из перспективных направлений экологизации земледелия является применение комплексных микробных консорциумов, способных восстанавливать функциональную активность и разнообразие почвенной биоты. Технология эффективных микроорганизмов (ЭМ-технология), представленная в России препаратом «Восток ЭМ-1» [7], основана на использовании симбиотического сообщества фотосинтезирующих, молочнокислых бактерий, дрожжей и актиномицетов. Результаты использования препарата в почвах различных регионов мира позволили установить механизм увеличения содержания органических соединений в почвах. Однако комплексная оценка роли препарата в регуляции разнонаправленных процессов трансформации органических соединений в почвах, формирующихся в различных природно-климатических условиях, остается недостаточно изученной.

Цель работы — изучение воздействия консорциума эффективных микроорганизмов (препарат «Восток ЭМ-1») на структурно-функциональные изменения микробного сообщества и процессы трансформации органического вещества в почвах трёх контрастных агроэкосистем, расположенных в различных земледельческих регионах России.

Исходя из цели, были поставлены следующие задачи:

1. выявить изменения общей биогенности и соотношения основных эколого-трофических групп микроорганизмов (*B:F ratio*) в пахотных горизонтах различных типов почв при использовании препарата «Восток ЭМ-1»;
2. исследовать динамику целлюлозоразлагающей активности как интегрального показателя интенсивности деструкционных процессов при применении тестируемого препарата;
3. определить влияние консорциума эффективных микроорганизмов на содержание гумуса в пахотных горизонтах разных типов почв;
4. установить региональную специфику и временной период действия препарата в пахотных почвах различных регионов.

Материалы и методы

Исследования проведены в период с 2018 по 2024 гг. на территории трех регионов РФ с контрастно отличными факторами формирования почв и ведения сельского хозяйства. Объектом исследования являлись пахотные горизонты (глубиной до 30 см) агрочернозёмов (Самарская область), агротемно-серые почвы (Красноярский край) и агротемногумусовых подбелов (Приморский край).

В каждом регионе были заложены полевые опыты с применением полного блочного метода и 3–5-кратной повторностью. Схемы опытов включали контрольный вариант (без применения препарата) и варианты с внесением препарата «Восток ЭМ-1» в дозах 5–6 л/га. Препарат вносили в виде аэрозольного распыления раствора на поверхность почвы перед началом посева культур и в конце вегетационного периода проводили обработку стерни. Учетные площадки были заложены с соблюдением принципа однородности почвенного покрова на площадях от 2 до 300 га в трёх контрастных агроэкосистемах:

1. Интенсивная зернобобовая система (Самарская область, КФХ «Орловка», трехлетний период (2018–2020 гг.), агрочернозём). Опыт закладывался на трёх полях в севообороте: поле №1 (кукуруза – соя – яровая пшеница), поле №2 (соя – яровая пшеница – подсолнечник), поле №3 (чечевица – озимая пшеница – соя). Препарат «Восток ЭМ-1» применялся в дозе 6 л/га.

2. Зернопаровая система на малоплодородных почвах (Красноярский край, ООО «Емельяновское», двухлетний период 2019–2020 гг., агротемно-серые почвы). В 2019 году поле находилось под паром (без возделывания культуры), в 2020 году — яровая пшеница. Препарат «Восток ЭМ-1» применялся в дозе 5 л/га.

3. Овощная система в условиях климата с муссонными чертами (Приморский край, ООО «Овощевод», 2024 г., агротемногумусовый подбел) в агроценозе картофеля с применением препарата в дозе 5 л/га.

Отбор почвенных образцов осуществляли в июне и сентябре методом конверта на глубине мощности пахотного горизонта.

Биологическую активность оценивали по общей численности микроорганизмов (посев на МПА, КАА, среда Чапека) [8]. Интенсивность деструкции органических соединений в почвах определяли по целлюлозоразлагающей активности (метод льняных полотен) [9]. Содержание органического углерода определяли методом Тюрина (ГОСТ 26213-91) с последующим пересчетом показателя на содержание гумуса. Для оценки направленности трансформации микробного сообщества и соотношения интенсивности прохождения процессов гумификации и минерализации органических соединений рассчитывали уровень отношения численности бактерий и актиномицетов к микромикетам (*B:F ratio*) [10, 11].

Анализ каждого параметра в отдельном образце проводили в 3-кратной аналитической повторности. Статистическая обработка полученных данных проведена методами описательной и тестовой статистики (расчёт средних арифметических значений, стандартной ошибки среднего арифметического значения, значимости различий средних (*t*-критерий для независимых выборок)) по общепринятым методикам с применением программы Microsoft Excel 2007 и SPSS software (SPSS Inc., version 13, 2018). Расчёты осуществляли при заданном уровне значимости $p \leq 0.05$. В таблицах значимые различия обозначены разными буквенными индексами.

Результаты

Согласно шкале оценки гумусного состояния почв [12], почвы исследуемых агроэкосистем различались по уровню содержания гумуса в пахотном горизонте в начале проведения опытных работ (табл. 1). Агрочернозёмы Самарской области характеризовались содержанием гумуса ниже средних значений, агротемно-серые почвы Красноярского края и агротемногумусовые подбелы Приморского края – низким содержанием гумуса.

При использовании препарата во всех исследованных типах почв наблюдалось достоверное увеличение общей биогенности па-

хотного горизонта относительно контрольных вариантов (табл. 2). Различия в уровне общей биогенности, установленной в разных регионах проведения исследований и при разных периодах внесения препарата, статистически значимы. Однако наиболее показательные результаты получены с опытных полей Самарской области, где препарат применялся в течение трёх лет на трёх полях в севообороте, что позволило проследить более долговременный эффект использования технологии. В первый год применения (2018) на всех полях Самарской области препарат оказал умеренное стимулирующее действие на изученные показатели. Отмечен рост общей биогенности и целлюлозоразлагающей активности (табл. 2). Установленные различия величины целлюлозоразлагающей активности являлись статистически значимыми. Однако разница в содержании гумуса в почвах контрольного и экспериментального вариантов в начале и конце вегетации в первый год проведения опыта оставалась отрицательной, хотя потери гумуса в экспериментальном варианте были меньше, чем в контрольном варианте (табл. 1). Во второй год применения (2019) эффективность препарата возросла. В почвах всех экспериментальных полей зафиксировано увеличение биогенности, целлюлозоразлагающей активности и уровня отношения *B:F ratio* (табл. 1). Различия уровня отношения *B:F ratio* являлись статистически значимыми. Следует отметить, что за вегетационный период второго года использования препарата потери гумуса в почвах опытных вариантов сократились в 2.5 раза по сравнению с контрольным вариантом опыта. На третий год применения (2020) зафиксирован максимальный эффект от его использования. В почвах поля №1 (яровая пшеница) общая биогенность возросла на 74%, целлюлозоразлагающая активность — на 31%, величина отношения *B:F ratio* увеличилась на 16%. Потери гумуса в почвах варианта опыта с использованием препарата за вегетационный период сократились в 8 раз по сравнению с контрольным вариантом. В почвах опытных полей №2 и №3 также отмечен значительный рост биогенности (в среднем на 37%), целлюлозо-

Таблица 1. Влияние препарата «Восток ЭМ-1» на содержание гумуса и соотношение численности различных групп микроорганизмов**Table 1.** Effects of the “Vostok EM-1” application on the humus content and the ratio of the number of different groups of microorganisms

Схема севооборота Crop rotation scheme	Вариант опыта Variant of experiment	Отношение численности бактерий и актиномицетов к микромицетам (<i>B:F ratio</i>) The ratio of the number of bacteria and actinomycetes to micromycetes (<i>B:F ratio</i>)	Гумус, % Humus, %	
			На начало сезона At the beginning of the season	На конец сезона At the end of the season
1-й год применения препарата «Восток ЭМ-1» / 1st year of Vostok EM-1 application				
Самарская область / Samara Oblast				
Поле №1 2018 – кукуруза / Field No. 1 2018 – maize	Контроль / Control	562 <i>a</i>	4.2±0.03 <i>a</i>	4.0±0.02 <i>a</i>
	Восток ЭМ-1 6 л/га / Vostok EM-1 (6 L/ha)	201 <i>b</i>	4.2±0.02 <i>a</i>	4.1±0.02 <i>a</i>
Поле №2 2018 – соя/ Field No. 2 2018 – soybean	Контроль / Control	920 <i>c</i>	4.2±0.03 <i>a</i>	4.0±0.02 <i>a</i>
	Восток ЭМ-1 6 л/га / Vostok EM-1 (6 L/ha)	227 <i>d</i>	4.2±0.01 <i>a</i>	4.1±0.03 <i>a</i>
Поле №3 2018 – чечевица / Field No. 3 2018 – lentil	Контроль / Control	754 <i>e</i>	4.2±0.02 <i>a</i>	4.0±0.01 <i>a</i>
	Восток ЭМ-1 6 л/га / Vostok EM-1 (6 L/ha)	804 <i>fe</i>	4.2±0.04 <i>a</i>	4.2±0.02 <i>a</i>
Красноярский край / Krasnoyarsk Krai				
2019 – пар / 2019 – bare fallow	Контроль / Control	272 <i>a</i>	3.9±0.03 <i>a</i>	3.6±0.02 <i>b</i>
	Восток ЭМ-1 5 л/га / Vostok EM-1 (5 L/ha)	634 <i>b</i>	3.9±0.02 <i>a</i>	3.5±0.01 <i>b</i>
Приморский край / Primorsky Krai				
2024 – картофель / 2024 – potato	Контроль / Control	136 <i>a</i>	3.23±0.03 <i>a</i>	3.06±0.02 <i>a</i>
	Восток ЭМ-1 5 л/га / Vostok EM-1 (5 L/ha)	261 <i>b</i>	3.11±0.01 <i>a</i>	4.15±0.03 <i>b</i>
2-й год применения препарата «Восток ЭМ-1» / 2nd year of Vostok EM-1 application				
Самарская область / Samara Oblast				
Поле №1 2019 – соя / Field No. 1 2019 – soybean	Контроль / Control	236 <i>a</i>	4.0±0.02 <i>a</i>	3.7±0.01 <i>b</i>
	Восток ЭМ-1 6 л/га / Vostok EM-1 (6 L/ha)	245 <i>a</i>	4.1±0.04 <i>a</i>	3.9±0.02 <i>a</i>
Поле №2 2019 – яровая пшеница / Field No. 2 2019 – spring wheat	Контроль / Control	272 <i>b</i>	4.0±0.02 <i>a</i>	3.6±0.03 <i>b</i>
	Восток ЭМ-1 6 л/га / Vostok EM-1 (6 L/ha)	561 <i>c</i>	4.1±0.02 <i>a</i>	4.0±0.02 <i>a</i>

Схема севооборота Crop rotation scheme	Вариант опыта Variant of experiment	Отношение численности бактерий и актиномицетов к микромицетам (<i>B:F ratio</i>) The ratio of the number of bacteria and actinomycetes to micromycetes (<i>B:F ratio</i>)	Гумус, % Humus, %	
			На начало сезона At the beginning of the season	На конец сезона At the end of the season
Поле №3 2019 – озимая пшеница / Field No. 3 2019 – winter wheat	Контроль / Control	343 <i>d</i>	4.0±0.01 <i>a</i>	3.7±0.02 <i>b</i>
	Восток ЭМ-1 6 л/га / Vostok EM-1 (6 L/ha)	399 <i>e</i>	4.2±0.02 <i>a</i>	4.1±0.03 <i>a</i>
Красноярский край / Krasnoyarsk Krai				
2020 – яровая пшеница / 2020 – spring wheat	Контроль / Control	272 <i>a</i>	3.9±0.01 <i>a</i>	2.8±0.02 <i>b</i>
	Восток ЭМ-1 5 л/га / Vostok EM-1 (5 L/ha)	634 <i>b</i>	3.9±0.03 <i>a</i>	3.7±0.02 <i>a</i>
3-й год применения препарата «Восток ЭМ-1» / 3rd year of Vostok EM-1 application				
Самарская область / Samara Oblast				
Поле №1 2020 - яровая пшеница / Field No. 1 2020 – spring wheat	Контроль / Control	333 <i>a</i>	3.7±0.02 <i>a</i>	3.4±0.01 <i>c</i>
	Восток ЭМ-1 6 л/га / Vostok EM-1 (6 L/ha)	387 <i>b</i>	3.9±0.01 <i>a</i>	4.0±0.02 <i>b</i>
Поле №2 2020 – подсолнечник / Field No. 2 2020 – sunflower	Контроль / Control	216 <i>c</i>	3.6±0.02 <i>a</i>	3.3±0.03 <i>c</i>
	Восток ЭМ-1 6 л/га / Vostok EM-1 (6 L/ha)	308 <i>d</i>	4.0±0.01 <i>b</i>	3.9±0.01 <i>a</i>
Поле №3 2020 – соя / Field No. 3 2020 – soybean	Контроль / Control	160 <i>e</i>	3.7±0.03 <i>a</i>	3.4±0.02 <i>c</i>
	Восток ЭМ-1 6 л/га / Vostok EM-1 (6 L/ha)	239 <i>f</i>	4.1±0.02 <i>b</i>	4.1±0.03 <i>b</i>

Примечание: разные буквенные индексы обозначают статистически значимые различия между вариантами опыта в пределах одного года и региона ($p \leq 0.05$, t-критерий для независимых выборок), одинаковые индексы указывают на отсутствие достоверных различий, двойной буквенный индекс (например, *fe*) указывает на статистическую неразличимость данного варианта с двумя разными группами, которые при этом значимо различаются между собой.

Note: Different letters indicate significant differences among variants of experiment within the same year and region ($p \leq 0.05$; t-test for independent samples); identical letters, no significant differences. Double letters (e.g., *fe*) mean the variant is not significantly different from either of two groups that are significantly different from each other.

разлагающей активности (на 20% и 59% соответственно) и величины отношения *B:F ratio* (на 43% и 49% соответственно).

В почвах опытных полей Красноярского края стабильный эффект от использования

препарата был достигнут за 2 года. В первый год использования препарата (2019) поле находилось под паром (культура не возделывалась), поэтому оценка урожайности не проводилась. Тем не менее, фитосанитарное и

агрохимическое состояние почвы оценивалось в полном объёме. Внесение препарата в паровом поле (2019) сопровождалось повышением целлюлозоразлагающей активности до 67.5% по сравнению с почвой контрольного варианта опыта (табл. 2). Во второй год (2020) после предпосевного внесения препарата под яровую пшеницу общая биогенность почв возросла в 2.95 раза, уровень отношения $B:F$ ratio увеличился в 2.3 раза, содержание гумуса повысилось на 32% относительно почв контрольного варианта. Различия величин изученных показателей, установленные

за двухлетний период, являлись статистически значимыми.

В почвах опытного поля Приморского края стабильный положительный эффект от использования препарата был зафиксирован уже в первый год его применения. Рост общей биогенности почв составил 22%, целлюлозоразлагающей активности - 30%, уровень отношения $B:F$ ratio увеличился в 1.9 раза. Содержание гумуса за вегетационный период увеличилось на 35.6 %. Различия изученных показателей пахотных горизонтов почв Приморского края являлись статистически значимыми.

Таблица 2. Влияние препарата «Восток ЭМ-1» на биологические показатели почв и продуктивность агроценозов

Table 2. Effects of the “Vostok EM-1” application on the biological parameters of soils and the productivity of agrocenoses

Схема севооборота Crop rotation scheme	Вариант опыта Variant of experiment	Общая биогенность, тыс. КОЕ/г аб.с.п. Total microbial abundance, thousand CFU/g dry soil	Целлюлозо-разлагающая активность (%) Cellulose-degrading activity (%)	Урожайность, ц/га Yield, c/ha	Прибавка урожая, ц/га Increased yield, c/ha
1-й год применения препарата «Восток ЭМ-1» / 1st year of Vostok EM-1 application					
Самарская область / Samara Oblast					
Поле №1 2018 – кукуруза / Field No. 1 2018 – maize	Контроль / Control	4552±101a	24.4a	55.2±0.2a	—
	Восток ЭМ-1 6 л/га / Vostok EM-1 (6 L/ha)	4970±205b	31.1b	58.4±0.3ba	+3.2
Поле №2 2018 – соя / Field No. 2 2018 – soybean	Контроль / Control	3922±23c	20.1c	15.4±0.3c	—
	Восток ЭМ-1 6 л/га / Vostok EM-1 (6 L/ha)	6872±210d	22.1d	15.1±0.04c	-0.3
Поле №3 2018 – чечевица / Field No. 3 2018 – lentil	Контроль / Control	3123±54e	9.3e	11.1±0.1d	—
	Восток ЭМ-1 6 л/га / Vostok EM-1 (6 L/ha)	4139±138f	15.4f	11.6±0.01d	+0.5
Красноярский край / Krasnoyarsk Krai					
2019 – пар / 2019 – bare fallow	Контроль / Control	3980±103a	42.1a	—	—
	Восток ЭМ-1 5 л/га / Vostok EM-1 (5 L/ha)	7340±175b	67.5b	—	—

Схема севооборота Crop rotation scheme	Вариант опыта Variant of experiment	Общая биогенность, тыс. КОЕ/г аб.с.п. Total microbial abundance, thousand CFU/g dry soil	Целлюлозо-разлагающая активность (%) Cellulose-degrading activity (%)	Урожайность, ц/га Yield, c/ha	Прибавка урожая, ц/га Increased yield, c/ha
Приморский край / Primorsky Krai					
2024 – картофель / 2024 – potato	Контроль / Control	8747±213 a	36.6 a	300.7±8 a	—
	Восток ЭМ-1 5 л/га / Vostok EM-1 (5 L/ha)	10701±303 b	47.7 b	322.3±11 b	+21.6
2-й год применения препарата «Восток ЭМ-1» / 2nd year of Vostok EM-1 application					
Самарская область / Samara Oblast					
Поле №1 2019 – соя / Field No. 1 2019 – soybean	Контроль / Control	4406±55 a	23.9 a	11.7±0.1 a	—
	Восток ЭМ-1 6 л/га / Vostok EM-1 (6 L/ha)	7690±74 b	29.1 b	11.9±0.2 a	+0.2
Поле №2 2019 – яровая пшеница / Field No. 2 2019 – spring wheat	Контроль / Control	3753±79 c	13.2 c	21.5±0.3 b	—
	Восток ЭМ-1 6 л/га / Vostok EM-1 (6 L/ha)	4406±107 a	18.6 d	21.7±0.2 b	+0.2
Поле №3 2019 – озимая пшеница / Field No. 3 2019 – winter wheat	Контроль / Control	3222±143 d	11.6 c	19.5±0.3 c	—
	Восток ЭМ-1 6 л/га / Vostok EM-1 (6 L/ha)	4462±89 a	19.6 ed	19.4±0.1 c	-0.1
Красноярский край / Krasnoyarsk Krai					
2020 – яровая пшеница / 2020 – spring wheat	Контроль / Control	4130±23 a	42.1 a	45.0±1 a	—
	Восток ЭМ-1 5 л/га / Vostok EM-1 (5 L/ha)	12190±135 b	67.5 b	57.3±2 b	+12.3
3-й год применения препарата «Восток ЭМ-1» / 3rd year of Vostok EM-1 application					
Самарская область / Samara Oblast					
Поле №1 2020 – яровая пшеница / Field No. 1 2020 – spring wheat	Контроль / Control	5338±230 a	20.1 a	42.9±0.1 a	—
	Восток ЭМ-1 6 л/га / Vostok EM-1 (6 L/ha)	9306±321 b	26.3 b	45.6±0.2 ba	+2.7

Схема севооборота Crop rotation scheme	Вариант опыта Variant of experiment	Общая биогенность, тыс. КОЕ/г аб.с.п. Total microbial abundance, thousand CFU/g dry soil	Целлюлозо-разлагающая активность (%) Cellulose-degrading activity (%)	Урожайность, ц/га Yield, c/ha	Прибавка урожая, ц/га Increased yield, c/ha
Поле №2 2020 – под-солнечник / Field No. 2 2020 – sunflower	Контроль / Control	5644±157 ac	13.2 c	18.0±0.1 c	—
	Восток ЭМ-1 6 л/га / Vostok EM-1 (6 L/ha)	7727±145 d	15.9 d	18.3±0.2 c	+0.3
Поле №3 2020 – соя / Field No. 3 2020 – soybean	Контроль / Control	3859±125 e	9.6 e	10.7±0.3 d	—
	Восток ЭМ-1 6 л/га / Vostok EM-1 (6 L/ha)	5285±101 a	15.3 d	11.1±0.2 e	+0.4

Примечание: разные буквенные индексы обозначают статистически значимые различия между вариантами опыта в пределах одного года и региона ($p \leq 0.05$, t-критерий для независимых выборок), одинаковые индексы указывают на отсутствие достоверных различий, двойной буквенный индекс (например, ac , ba) указывает на статистическую неразличимость данного варианта с двумя разными группами, которые при этом значимо различаются между собой.

Note: Different letters indicate significant differences among variants of experiment within the same year and region ($p \leq 0.05$; t-test for independent samples); identical letters, no significant differences. Double letters (e.g., ba , ac) mean the variant is not significantly different from either of two groups that are significantly different from each other.

По завершении полевых экспериментов в почвах контрольных вариантов всех трёх регионов проведения исследований отмечено снижение содержания гумуса (табл. 1). В почвах Самарской области в контрольных вариантах через 3 года уровень содержания гумуса снизился в 1.2 раза, что соответствует переходу содержания гумуса из градации «ниже среднего» в «низкое». В почвах Красноярского края в контрольных вариантах через 2 года содержание гумуса уменьшилось в 1.4 раза и осталось в рамках градации «низкое». В почвах Приморского края в контрольных вариантах за 1 год проведения опыта показатель гумуса снизился только в 1.06 раза, оставшись в рамках градации «низкое».

Отмеченная положительная динамика биологических показателей и активизация механизмов гумификации в почвах при использовании опытного препарата закономерно отразилась на содержании гумуса в почвах и

в конечном итоге на урожайности выращиваемых культур (табл. 1, 2). Относительный прирост гумуса в почвах при применении препарата варьировал от 21% в Самарской области (на третий год применения препарата) до 35.6% в Приморском крае (в первый год применения препарата) по сравнению с почвами контрольных вариантов опыта. Оценка исследуемых почв по величине содержания гумуса позволила отразить наиболее значимое влияние препарата на гумусированность агротемногумусового подбела Приморского края, где за один год использования препарата содержание гумуса увеличилось в 1.36 раза и изменилось с оценки «низкое» на «ниже среднего». Установленные различия содержания гумуса в почвах Приморского края являлись статистически значимыми. Также на опытных полях Приморского края зафиксирована значительная прибавка урожая выращиваемого картофеля на 7.2% (табл. 2). В агротемно-серых почвах Красноярского края

использование препарата на протяжении двух-летнего периода сопровождалось увеличением содержания гумуса (в 1.32 раза), однако это не привело к смене оценочных градаций почв, но позволило добиться увеличения урожая яровой пшеницы на 27,3% по сравнению с контролем. В агрочерноземах Самарской области применение опытного препарата не оказало значимого влияния на увеличение содержания гумуса, однако позволило избежать его потерь при выращивании сельскохозяйственных культур. Прибавка урожая (+6,3%) на полях Самарской области была достигнута только на третий год использования препарата под яровой пшеницей, что подтверждает накопительный характер его действия в почвах с изначальным высоким уровнем содержания органического вещества.

Обсуждение

Различное содержание гумуса в пахотных горизонтах почв трех агроэкосистем позволило оценить влияние использования препарата «Восток ЭМ-1» на изменение исследуемых параметров в различных почвенных и климатических условиях. Во всех исследованных агроэкосистемах внесение консорциума эффективных микроорганизмов достоверно вызвало значительные изменения в структуре и функционировании почвенного микробного сообщества.

Результаты исследований указывают на смену состава микробного сообщества почв опытных полей при использовании препарата с преобладания микромицетов, активно минерализующих органические соединения почв, на доминирование бактерий и актиномицетов, участвующих в процессах формирования гумуса [13]. Во всех регионах проведения исследований на разных типах почв установлен рост уровня отношения *B:F ratio*, что свидетельствует о доминировании бактерий и актиномицетов – ключевых агентов синтеза гуминовых кислот. С точки зрения экологического состояния почв, отмеченные смещения в структуре микробного сообщества и доминирование бактериального компонента (рост *B:F ratio*) ука-

зывают на активизацию биотической регуляции углеродного цикла, что в конечном итоге вносит вклад в повышение буферной способности агроэкосистемы в целом. Это подтверждается разницей в содержании гумуса в начале и конце вегетационного периода (табл. 1) в почвах всех исследованных агроэкосистем.

Одним из основных результатов проведенного исследования являлось установление сочетания процессов интенсификации деградации органического вещества почв при использовании консорциума эффективных микроорганизмов и накопления гумусовых соединений в пахотных горизонтах различных типов почв. Согласно концепции синтропии, эффективные микроорганизмы образуют стабильное сообщество в почвах, основанное на принципах сопряженного питания [14]. Консорциум продуцирует широкий спектр ферментов, обеспечивая интенсивный «ферментативный удар» по сложным органическим полимерам [15]. Ключевое значение для понимания отмеченной в исследовании активизации процесса гумусообразования при использовании препарата имеют результаты Fan et al., в которых было показано, что под действием консорциума эффективных микроорганизмов происходит селективная деструкция алифатических структур гумусовых кислот, в то время как ароматические структуры накапливались и поликонденсировались [15]. Дополнительно, результаты, полученные Żukowska et al., подтвердили увеличение соотношения углерода гуминовых кислот к углероду фульвокислот и снижение доли гумина в гумусе при применении консорциума эффективных микроорганизмов для рекультивации деградированных почв [16]. В целом, совокупность литературных данных и результатов собственных исследований свидетельствует о формировании более стабильных пулов органического вещества в почвах различных типов природопользования. Таким образом, консорциум эффективных микроорганизмов выполняет функции своеобразного биологического регулятора, направляя поток углерода из разлагающихся органических остатков не преимущественно

в атмосферу (в виде CO_2), а в стабильный почвенный резервуар – гумус.

Анализ полученных данных позволяет выявить региональную специфику и временную динамику действия препарата в почвах различных регионов проведения исследований. В Самарской области (агрочернозёмы) препарат «Восток ЭМ-1» демонстрирует постепенное нарастание эффективности: устойчивые положительные результаты были достигнуты только на третий год применения препарата. Вероятнее всего, в почвах, имеющих высокое содержание органического вещества, необходим более длительный период для смены доминантов в микробном сообществе и достижения баланса между деструкцией и гумификацией органических соединений. В Красноярском крае (агротемно-серые почвы, низкий уровень естественного плодородия) заметный эффект от использования препарата проявился уже на второй год применения. Резкий рост биогенности и отношения $B:F$ ratio привёл к выраженному относительному приросту гумуса и значительной прибавке урожая зерновой культуры. Это подтверждает, что в почвах с изначально низким содержанием органического вещества потенциал препарата «Восток ЭМ-1» раскрывается наиболее быстро и полно. В Приморском крае (агротемногумусовые подбелы, стрессовые условия переувлажнения) устойчивый положительный эффект зафиксирован уже за один год применения препарата, что свидетельствует о высокой эффективности препарата в почвах муссонного климата, где при сезонном переувлажнении доминируют процессы выщелачивания и минерализации органических соединений [17].

Заключение

Изучение изменения отдельных биологических показателей и содержания гумуса при использовании микробиологического препарата «Восток ЭМ-1» в различных типах почв агрофитоценозов трех крупных земледельческих регионов РФ позволило достоверно установить эффективное влияние препарата на

смену доминантов в микробном сообществе пахотных горизонтов (увеличение уровня $B:F$ ratio в 1.2–2.3 раза по сравнению с контролем), на повышение содержания гумуса (прирост относительно контрольных вариантов опыта от 21 до 36%) и продуктивность агроценозов (прибавка урожая относительно контроля от 6.3 до 27.3%) во всех регионах проведения исследований.

Свойства различных типов почв определяют некоторую специфику действия тестируемого препарата. В почвах, характеризующихся изначально более высоким уровнем биогенности, но более низким показателем $B:F$ ratio и содержанием гумуса (агротемногумусовые подбелы Приморского края и агротемно-серые почвы Красноярского края), значимое влияние препарата на улучшение биологических показателей и содержания гумуса установлено через 1 и 2 года использования препарата, соответственно. В почвах, имеющих изначально более высокое содержание гумуса (агрочернозёмы Самарской области) максимальная эффективность препарата достигнута на третий год его системного применения.

Полученные результаты указывают на направленную регуляцию микробиологического сообщества почв с помощью сбалансированных микробных консорциумов препарата, что является одним из эффективных методов оптимизации баланса деструкции и гумификации органических соединений в почвах и лежит в основе повышения экологической устойчивости агроэкосистем, депонирования углерода и формирования адаптивного плодородия.

Список литературы

1. Сабодина Е.П., Мельников Ю.С. Развитие фундаментального почвоведения, особой охраны почв и научно-философская деятельность В.В. Докучаева, Г.В. Добровольского, Е.Д. Никитина. *Тенденции развития науки и образования*. 2019, 47(2):70–74. <https://doi.org/10.18411/lj-02-2019-40>
2. Камилов М.К., Камилова П.Д., Камилова З.М. Экологические проблемы в сельском хозяйстве как следствие интенсификации развития агропромышленного комплекса России. *Региональные проблемы преобразования экономики*. 2017, 75(1):11–20. <http://doi.org/10.26726/2305-4484-2017-1-11-20>

3. Трофимов С.Я., Трофимова Л.С. *Биологическая активность почв и трансформация органического вещества*. М.: ГЕОС, 2015, 316 с.
4. Беляев В.И., Варлагин А.В., Дридигер В.К., Курганова И.Н., Орлова Л.В., Орлов С.В., Попов А.И., Романовская А.А., Тойгильдин А.Л., Троц Н.М., Фомин А.А., Хомяков Д.М. Мировая климатическая повестка. Почвозащитное ресурсосберегающее (углеродное) земледелие как стандарт межнациональных и национальных стратегий по сохранению почв и аграрных карбоновых рынков. *International agricultural journal*. 2022,1:421–441. <http://doi.org/10.55186/25876740-2022-6-1-26>
5. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А. и др. *Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв*. М.: ГЕОС, 2010, 416 с.
6. Lehmann J., Bossio D.A., Kögel-Knabner I., Rillig M.C. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2020,1:544–553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0083-8>
7. Евсеева Е.А. Биотехнологические приемы получения экологически чистой высококачественной продукции (на примере технологии эффективных микроорганизмов). *Аграрный вестник Приморья*. 2018,3(11):35–38. EDN: UWZNIR
8. Нетрусов А.И., Котова И.Б. *Микробиология: теория и практика*. М.: Издательство Юрайт, 2026, 676 с.
9. Зинченко М.К., Зинченко С.И. Влияние агротехнических факторов на целлюлозоразлагающую активность микробценоза серой лесной почвы. *Владимирский земледелец*. 2025,1:21–28. <https://doi.org/10.24412/2225-2584-2025-4110-21-28>
10. Звягинцев Д.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.М. *Биология почв*. М.: Изд-во МГУ, 2005, 445 с.
11. Anderson J. P. E., Domsch K. H. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils. *Soil Science*. 1980,130(4):211–216. URL: https://journals.lww.com/soilsci/abstract/1980/10000/QUANTITIES_OF_PLANT_NUTRIENTS_IN_THE_MICROBIAL.8.aspx
12. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов. *Почвоведение*. 2004,(8):918–926. EDN: OWPLCP
13. Wang S., Dou S., Liu Y.L. et al. Characterization of soil humus by FTIR spectroscopic analyses after being inoculated with different microorganisms plus wheat straw. *Guang pu xue yu guang pu fen xi*. 2012,32(9):2409–2413. [https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2012\)09-2409-05](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2012)09-2409-05)
14. Schenck zu Schweinsberg-Mickan M., Müller T. Impact of effective microorganisms and other biofertilizers on soil microbial characteristics, organic-matter decomposition, and plant growth. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 2009,172(5):704–712. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800021>
15. Van Fan Y., Lee C.T., Klemeš J.J., Chua L.S., Sarmidi M.R., Leow C.W. Evaluation of Effective Microorganisms on home scale organic waste composting. *Journal of environmental management*. 2018,216:41–48. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.019>
16. Żukowska G., Myszura-Dymek M., Durczyńska Z. et al. Evaluation of the efficacy of effective microorganisms in the reclamation of degraded soils. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2024,18(1):360–369. <https://doi.org/10.12913/22998624/176633>
17. Пуртова Л.Н., Тимофеева Я.О. Содержание, запасы гумуса и биологическая активность агро-темногумусовых подбелов Приморского края. *Плодородие*. 2024,4:64–67. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2024.139.14>

References

1. Sabodina E.P., Melnikov Yu.S. Development of fundamental soil science, special soil protection, and scientific and philosophical work of V.V. Dokuchaev, G.V. Dobrovolsky, E.D. Nikitin. *Trends in the Development of Science and Education*. 2019,47(2):70–74. (in Russ.). <https://doi.org/10.18411/lj-02-2019-40>
2. Kamilov M.K., Kamilova P.D., Kamilova Z.M. Environmental problems in agriculture as a consequence of the intensification of development of the agro-industrial complex of Russia. *Regional Problems of Economic Transformation*. 2017,75(1):11–20. (in Russ.). <http://doi.org/10.26726/2305-4484-2017-1-11-20>
3. Trofimov S.Ya., Trofimova L.S. *Biological activity of soils and transformation of organic matter*. Moscow: GEOS, 2015, 316 p. (in Russ.).
4. Belyaev V.I., Varlagin A.V., Dridiger V.K., Kurganova I.N., Orlova L.V., Orlov S.V., Popov A.I., Romanovskaya A.A., Toygildin A.L., Trots N.M., Fomin A.A., Khomyakov D.M. Global climate agenda. Soil conservation resource-saving (carbon) agriculture as a standard for international and national strategies for soil conservation and agricultural carbon markets. *International agricultural journal*. 2022,1:421–441. <http://doi.org/10.55186/25876740-2022-6-1-26>
5. Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A. et al. *Dynamics of agricultural lands in Russia in the 20th century and post-agrogenic restoration of vegetation and soils*. Moscow: GEOS, 2010, 416 p. (in Russ.).
6. Lehmann J., Bossio D.A., Kögel-Knabner I., Rillig M.C. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2020,1:544–553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0083-8>
7. Evseeva E.A. Biotechnological methods for obtaining environmentally friendly high-quality products (using effective microorganism technology as an example).

- Agrarian Bulletin of Primorye*. 2018,3(11):35–38. (in Russ.). EDN: UWZNIR
8. Netrusov A.I., Kotova I.B. *Microbiology: theory and practice*. Moscow: Yurait Publishing House, 2026, 676 p. (in Russ.).
 9. Zinchenko M.K., Zinchenko S.I. The influence of agrotechnical factors on the cellulolytic activity of the gray forest soil microbiocenosis. *Vladimirsky Zemledelets*. 2025,1:21–28. (in Russ.). <https://doi.org/10.24412/2225-2584-2025-4110-21-28>
 10. Zvyagintsev D.G., Babieva I.P., Zenova G.M. *Soil Biology*. Moscow: Moscow State University Press, 2005, 445 p. (in Russ.).
 11. Anderson J.P.E., Domsch K.H. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils. *Soil Science*. 1980,130(4):211–216. URL: https://journals.lww.com/soilsci/abstract/1980/10000/QUANTITIES_OF_PLANT_NUTRIENTS_IN_THE_MICROBIAL.8.aspx
 12. Orlov D.S., Biryukova O.N., Rozanova M.S. Additional indicators of the humus status of soils and their genetic horizons. *Soil Science*. 2004,(8):918–926. (in Russ.). EDN: OWPLCP
 13. Wang S., Dou S., Liu Y.L. et al. Characterization of soil humus by FTIR spectroscopic analyzes after being inoculated with different microorganisms plus wheat straw. *Guang pu xue yu guang pu fen xi*. 2012,32(9):2409–2413. [https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2012\)09-2409-05](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2012)09-2409-05)
 14. Schenck zu Schweinsberg-Mickan M., Müller T. Impact of effective microorganisms and other biofertilizers on soil microbial characteristics, organic-matter decomposition, and plant growth. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 2009,172(5):704–712. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800021>
 15. Van Fan Y., Lee C.T., Klemeš J.J., Chua L.S., Sarmidi M.R., Leow C.W. Evaluation of Effective Microorganisms on home scale organic waste composting. *Journal of environmental management*. 2018,216:41–48. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.019>
 16. Żukowska G., Myszura-Dymek M., Durczyńska Z. et al. Evaluation of the efficacy of effective microorganisms in the reclamation of degraded soils. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2024,18 (1):360–369. <https://doi.org/10.12913/22998624/176633>
 17. Purtova L.N., Timofeeva Ya.O. Humus content, reserves, and biological activity of agro-dark-humus podbels of Primorsky krai. *Fertility*. 2024,4:64–67. (in Russ.). <https://doi.org/10.25680/S19948603.2024.139.14>

Об авторах

✉ **Евсеева Екатерина Александровна**, аспирант, лаборатории почвоведения и экологии почв, Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия, eka-evseeva@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0002-0273-0659>

Тимофеева Яна Олеговна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории почвоведения и экологии почв, Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия, timofeeva@biosoil.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0829-7107>

About the Authors

✉ **Evseeva, Ekaterina A.**, Postgraduate Student, the Laboratory of Soil Science and Soil Ecology, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity FEB RAS, Vladivostok, Russia, eka-evseeva@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0002-0273-0659>

Timofeeva, Yana O., Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Leader of the Laboratory of Soil Science and Soil Ecology, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity FEB RAS, Vladivostok, Russia, timofeeva@biosoil.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0829-7107>

Поступила 08.05.2026

Принята к публикации 24.08.2026

Received 08 May 2026

Accepted 24 August 2026

© Авторы, 2026 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2026.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 639.227

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.3.371-379>
<https://www.elibrary.ru/weizdx>

Анализ воздействия погодных факторов на поведение пелагических промысловых рыб и возможность обнаружения их косяков и скоплений с использованием беспилотных летательных аппаратов

Е. А. Летунова, А. В. Скорик, В. Н. Филатов

Сахалинский филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии»
(«СахНИРО»), Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. В работе рассмотрено влияние погодных и гидрометеорологических факторов на поведение пелагических промысловых рыб и эффективность обнаружения их косяков с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Основное внимание уделено тихоокеанской сайре как одному из наиболее сложных объектов поиска в северо-западной части Тихого океана. Проанализированы особенности реакции рыб на искусственный свет, влияние штормов, циклонов, ветрового волнения и изменений термоструктуры верхнего слоя океана на распределение и устойчивость рыбных скоплений. Показано, что погодные условия оказывают двойственное воздействие: ухудшают визуальные условия наблюдения и одновременно изменяют пространственное распределение косяков, вызывая их заглубление и рассредоточение. Также проведён анализ эксплуатационных возможностей различных типов БПЛА при мониторинге морской поверхности. Установлено, что эффективность применения БПЛА определяется совокупностью метеорологических, океанологических, технических факторов и требует комплексного подхода к организации наблюдений.

Ключевые слова: пелагические промысловые рыбы, тихоокеанская сайра, рыбные скопления, косяки рыб, беспилотные летательные аппараты, погодные факторы, мониторинг

Analysis of the impact of weather factors on the behavior of pelagic commercial fish and the possibility of detecting their schools and aggregations using unmanned aerial vehicles

Elizveta A. Letunova, Andrey V. Skorik, Viktor N. Filatov

Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography
(SakhNIRO), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. The paper examines the influence of weather and hydrometeorological factors on the behavior of pelagic commercial fish and the effectiveness of detecting their schools and aggregations using unmanned aerial vehicles (UAVs). The focus is on the Pacific saury, one of the most challenging targets for detection in the North-Western Pacific Ocean. The responses of the fish to artificial light, the impact of storms, cyclones, and wind waves were analyzed, as well as the changes in the thermostructure of the upper ocean layer on the distribution and stability of fish aggregations. It has been shown that weather conditions have a dual effect: they worsen the visual conditions of observation and simultaneously change the spatial distribution of schools, causing them to move into deeper waters and disperse. The operational capabilities of various types of UAVs for monitoring the sea surface were also assessed. It was established that the effectiveness of UAV-based monitoring is determined by a combination of meteorological, oceanographic, and technical factors and requires an integrated approach to observation planning and implementation.

Keywords: pelagic commercial fish, Pacific saury, fish aggregations, fish schools, unmanned aerial vehicles (UAVs), weather factors, monitoring

Финансирование и благодарности

Данная работа выполнена в рамках гранта РНФ № 24-61-00025 на тему «Разработка методов поиска скопленных промысловых рыб с помощью беспилотных летательных аппаратов».

Funding and Acknowledgements

This study was carried out within the framework of the RNF grant No. 24-61-00025 on the topic “Development of methods for searching for commercial fish schools using unmanned aerial vehicles”.

Для цитирования: Летунова Е.А., Скорик А.В., Филатов В.Н. Анализ воздействия погодных факторов на поведение пелагических промысловых рыб и возможность обнаружения их косяков и скоплений с использованием беспилотных летательных аппаратов. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 3, с. 371–379. <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.3.371-379>; <https://www.elibrary.ru/weizdx>

For citation: Letunova E.A., Skorik A.V., Filatov V.N. Analysis of the impact of weather factors on the behavior of pelagic commercial fish and the possibility of detecting their schools and aggregations using unmanned aerial vehicles. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 3, p. 371–379. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.3.371-379>; <https://www.elibrary.ru/weizdx>

Введение

В исследованиях морских экосистем всё более активно применяются методы дистанционного наблюдения. Одним из наиболее перспективных технологических решений выступает использование беспилотных летательных аппаратов, обеспечивающих получение высокодетализированных изображений морской поверхности, позволяющих осуществлять оперативный мониторинг распределения гидробионтов, а также осуществлять измерения фоновых условий поверхностного слоя. Результаты использования БПЛА демонстрируют высокую эффективность при обнаружении рыбных скоплений и анализе их пространственного распределения, особенно в прибрежных акваториях и зонах интенсивной промысловой деятельности [1–4]. Использование методов дистанционного зондирования с помощью беспилотных систем наблюдения позволяет повысить эффективность поиска промысловых объектов и уточнить данные о распределении рыбных скоплений [5–10].

Не вызывает сомнений, что возможность визуального обнаружения косяков пелагических рыб с БПЛА будет ограничена такими погодными явлениями, как туман, осадки и сильные порывы ветра. Например, интенсивное волнение поверхности воды и возникновение солнечных бликов способны существенно затруднить выявление рыбных скоплений на аэрофотоснимках [11–12]. Кроме того, есте-

ственный ход сезонных процессов в океане и космофизические факторы могут приводить к тому, что даже при благоприятных метеорологических условиях обнаружить косяки будет затруднительно, а результаты поиска могут быть неверно интерпретированы.

В данной работе обобщен опыт использования различных типов БПЛА в рыбопромысловых исследованиях при разных погодных условиях. Кроме того, проведен анализ результатов исследований влияния погодных факторов на поведение и перемещение косяков пелагических рыб, а также на формирование ими промысловых скоплений и их распределение в суточном и синоптическом масштабе. Исследования базировались преимущественно на данных, полученных при изучении тихоокеанской сайры, которая является одним из самых проблемных объектов для обнаружения и облова в северо-западной части Тихого океана. Специфика лова сайры путем привлечения к борту судна с применением электрического света позволила собрать более обширный материал по особенностям поведения косяков по сравнению с другими промысловыми пелагическими рыбами. Сардина и скумбрия в данном регионе обитают при сходных с сайрой океанологических условиях, а также имеют сходные черты поведения в период нагула, но специфика их промысла кошельковым неводом и пелагическим тралом затрудняют визуальное наблюдение за поведением стай.

Результаты и обсуждение

Анализ практики использования самолетного и коптерного типов БПЛА при мониторинге морской поверхности показал, что они имеют принципиальные различия в применении, обусловленные технико-эксплуатационными и приборно-фиксирующими возможностями, а также воздействием метеорологических факторов. БПЛА самолетного типа характеризуются значительно большей дальностью полёта, большей продолжительностью миссии и возможностью использования более тяжелой специализированной полезной нагрузки, включая гиросtabilизированные системы наблюдения, а также приборы сканирования характеристик поверхности океана. Для таких БПЛА оптимальной является съёмка с высот порядка 150–300 м, обеспечивающая компромисс между площадью обзора

и различимостью косяков. При этом непрерывная видеофиксация может вестись на скоростях порядка 20–25 м/с, позволяя обеспечивать высокое качество съёмки. Однако их запуск и возвращение затруднительно осуществлять в морских условиях с судна. Запуск и возвращение необходимо осуществлять с привязкой к берегу. Коптерного типа БПЛА, несмотря на ограниченные продолжительность полёта и более слабую устойчивость к ветру, обладают рядом эксплуатационных преимуществ, включающих возможность контроля изображения в реальном времени, настройки параметров съёмки и оперативного переключения между режимами фото и видеосъёмки (рис. 1). Возможность визуального контроля взлета и посадки позволяет использовать такие БПЛА в судовых условиях для оперативного поиска косяков рыб, а также проведения локальных измерений состояния поверхности моря.

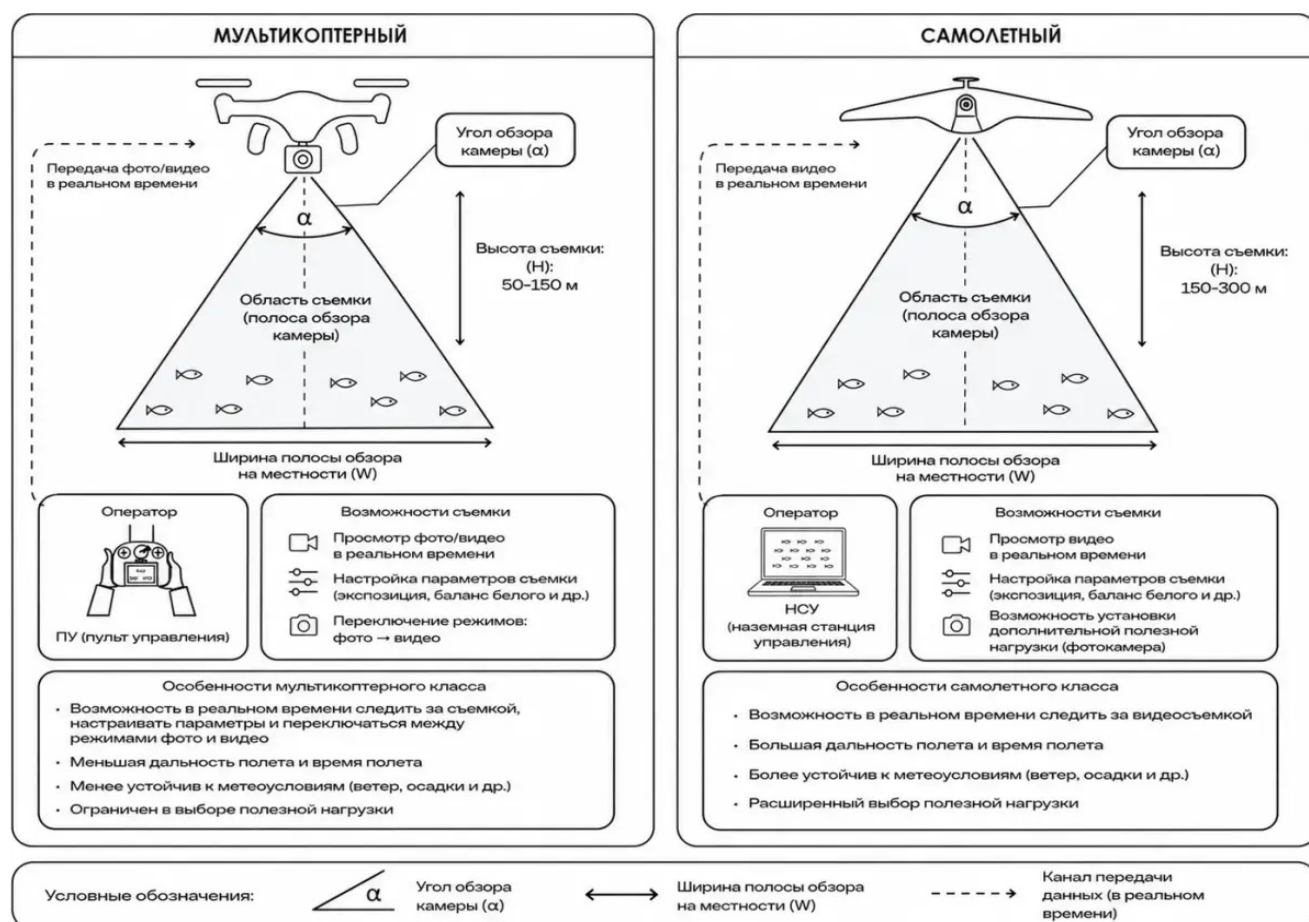


Рис. 1. Схема съемки и основные различия мультикоптерных и самолетных БПЛА при мониторинге морской поверхности.

Fig. 1. Survey scheme and main differences between multirotor and fixed-wing UAVs for monitoring the sea surface.

Для обоих типов БПЛА препятствием для полноценной эксплуатации будут служить такие погодные явления, как туман и осадки, существенно ограничивающие видимость. При видимости менее 300 м будет сложно использовать БПЛА самолетного типа, а при видимости менее 100 м и коптерные БПЛА. Значительным препятствием для эксплуатации БПЛА является ветровое воздействие. При силе ветра более 10 м/с БПЛА коптерного типа будет очень затруднительно вернуть на судно, что ограничит его использование в такие периоды. БПЛА самолетного типа может вести видеонаблюдения и сканирование поверхности моря при силе ветра 10-15 м/с. Однако при силе ветра 13-15 м/с волнение моря будет достигать 4 б, а ветровые волны высотой 2 м и более, что затруднит видеофиксацию косяков из-за бурунов. Волнение моря в виде зыби высотой волн более 2 м, вызванное удаленными от района глубокими циклонами, даже при слабом ветровом воздействии также будет затруднять видеофиксацию косяков. Еще одним фактором, снижающим эффективность обнаружения косяков рыб, является отражение солнечного света от поверхности моря в безоблачную или малооблачную погоду. Так называемые «солнечные блики» будут вынуждать строить галсы и вести поиски косяков, чтобы их воздействие минимизировать.

Перечисленные факторы физически затрудняют видеофиксацию косяков, а также влияют на безопасность использования БПЛА. Кроме этого, есть большая вероятность неверной интерпретации полученных данных в различные периоды жизни гидробионтов. Для уменьшения вероятности ошибок при интерпретации данных важно учитывать поведенческие особенности стайных пелагических рыб. Фиксировать изменение поведения стай пелагических рыб в масштабах промысловой экспедиции наиболее полно удалось на примере тихоокеанской сайры. Тихоокеанская сайра, как большинство пелагических рыб-планктофагов и пелагических кальмаров, в значительную часть жизненного цикла положительно реагирует на искусственный свет. Причиной положительной реакции на свет является безуслов-

ный пищевой рефлекс, что используется при её ловле [13–19]. Другими словами, свет судна является сигналом к возобновлению активных пищевых поисковых действий с наступлением темноты, которые были прекращены, либо затруднены в светлое время суток. Рыбы, имеющие пустые кишечники, лучше привлекаются светом, чем накормленные [20–22]. Поэтому преимущественная часть пойманной рыбы имеет пустые кишечники. У накормленной рыбы реакция на свет усиливается после того, как пищеварительная система освободится от пищи, что при обильном питании в вечерние сумерки происходит во второй половине ночи, а иногда только перед рассветом. Соответственно, если на участке со скоплением сайры пищи (кормового зоопланктона) много, то ее реакция на свет судна до полуночи будет плохой. При этом усиление мощности света, как правило, не вызывает улучшения реакции, а наоборот, может отпугивать рыб от судна [23, 24]. Однако к утру, по мере усвоения пищи, реакция улучшается, что позволяет вести лов сайры более результативно, чем в первую половину ночи. В целом, на таких участках эффективность промысла может быть не очень высока, однако вероятность того, что скопление на таком участке в ближайшие дни не распадется, может быть высокой. Как правило, обстановка на промысле с высокой эффективностью лова в таком районе сохраняется в течение ближайших 2–3 суток. Напротив, если реакция рыбы на свет положительная в первую половину ночи, то это может означать, что пищи мало и условия для нагула сайры на данном участке не очень хорошие. Сайра здесь не наедается, что способствует сохранению положительной реакции ее на свет в течение всей ночи. В результате на таких участках уловы сайры могут быть велики в течение 1–2 суток. Однако в целом для промысла, особенно в июле-августе, такие ситуации являются не очень благоприятными, так как на подобном участке из-за плохих кормовых условий очень велика вероятность распада скопления.

Слабо реагирует на свет сайра в дни, предшествующие прохождению через район промысла глубокого циклона, что отражается на

эффективности лова. Кроме того, плохая реакция на свет у сайры отмечается в те ночи, когда глубокий циклон проходит на удалении до 500 миль от района лова, даже если и не вызывает на его акватории штормовых условий [25, 26]. В обоих случаях наблюдается заглубление сайровых косяков и нередко происходит их рассредоточение. Если циклон не вызывает шторм, то сразу после его прохождения лов сайры в большинстве случаев возобновляется с прежней интенсивностью. Аналогичное поведение отмечается и в отношении косяков сардины. Особого внимания заслуживает рассмотрение особенностей поведения косяков сайры в отношении глубоких циклонов и шторма. Обычно при прохождении над районом нагула циклона, вызывающего шторм, косяки стайных пелагических рыб-планктофагов (сайра, сардина и др.) становятся очень подвижны либо заглубляются, что вместе с сильным ветром и волнением затрудняет их поиск и облов как бортовыми ловушками, так и кошельковыми неводами. Однако не только в штормовые дни, но еще за сутки-двое до шторма у рыб резко ухудшается реакция на искусственные источники света, что негативно сказывается на эффективности их промысла [25, 27, 28]. Более того, такая ситуация может возникать при прохождении глубоких циклонов на удалении от района, причем даже в тех случаях, когда в районе промысла циклон штормовой погоды не вызывает. Для того чтобы разобраться в причинах такого поведения, следует обратиться к вертикальной структуре верхнего слоя океана.

Во-первых, следует учесть, что толщина благоприятного для обитания рыбного косяка квазиоднородного слоя может стать меньше в результате усиления ветрового волнения. Собственно глубина залегания термоклина и толщина верхнего квазиоднородного слоя может не измениться. Но здесь важно то, что рыбы избегают слоя ветрового волнения, так как в нем нет возможности сохранить структуру стаи [29-31]. Соответственно, чем значительнее воздействие ветра, тем больше заглубляются косяки и тоньше становится слой воды, доступный им для маневрирования, что увели-

чивает вероятность распада скопления. Наблюдения показали, что на участках с комплексом благоприятных для нагула сайры условий при толщине верхнего квазиоднородного слоя менее 6 м сайровые скопления не отмечаются, а при толщине верхнего квазиоднородного слоя 6–8 м сайровые скопления наблюдались лишь в 7 % случаев. Аналогичные параметры обитания характерны для косяков сардины. Таким образом, приближающийся к району нагула циклон вынуждает рыбные косяки заглубляться, чтобы избежать пребывания в слое ветрового волнения. Из мест, где толщина верхнего квазиоднородного слоя сравнительно мала, косяки переходят в места с большей толщиной верхнего квазиоднородного слоя, что приводит к их рассредоточению и даже к распаду скопления. В противоположность этому на участках со сравнительно большой (более 15 м) толщиной верхнего квазиоднородного слоя распада скоплений обычно не происходит, так как косякам, чтобы избежать слоя ветрового волнения, достаточно заглубиться. При этом они не будут испытывать ограничений для маневрирования по вертикали даже в случае, когда слой ветрового волнения будет значительным (более 5 м). На таких участках сразу после прохождения циклона эффективность промысла восстанавливается до уровня, предшествующего подходу циклона, а иногда даже улучшается.

В результате штормового воздействия в пределах участка со скоплением, как и на всей акватории, охваченной штормом, характеристики среды могут существенно измениться. Их изменение может привести к разрушению комплекса благоприятных для нагула сайры условий. Это, в свою очередь, приведет к распаду скопления. В 32 % случаев в районе Курильских островов нагульные сайровые скопления после шторма распадаются. При этом наибольшая вероятность (65–72 %) распада скоплений отмечена в июле-августе, а наименьшая (11–23 %) в ноябре-декабре [32]. С другой стороны, сайровые косяки, в том числе из распавшегося скопления, могут сформировать скопления на тех участках, где ранее отсутствовал комплекс благоприятных для нагула сайры условий, но

в результате изменений параметров среды под влиянием шторма такой комплекс возник.

Под влиянием ветрового перемешивания верхний квазиоднородный слой становится более гомотермным. Температура воды на поверхности несколько понижается, а на горизонте непосредственно у пикноклина, наоборот, повышается. Это приводит к обострению градиентов в термо- и пикноклине. Кроме того, сам пикноклин заглубляется [33, 34]. Увеличение градиента в пикноклине не приводит к разрушению комплекса благоприятных для нагула сайры условий. Наоборот, такие участки становятся устойчивее, и вероятность распада скоплений в их пределах может даже уменьшиться. Кроме того, участки, которые до шторма характеризовались высоким содержанием кормового зоопланктона, но не являлись благоприятными для нагула сайры из-за отсутствия пикноклина с градиентом достаточной величины, в результате воздействия шторма могут стать благоприятными для нагула и образования скоплений сайры. Здесь может сформироваться новое скопление.

Изменение толщины верхнего квазиоднородного слоя может иметь несколько последствий. Как упоминалось выше, от толщины верхнего квазиоднородного слоя зависит значение концентрации в нем кормового зоопланктона и фитопланктона. Чем больше толщина верхнего квазиоднородного слоя, тем меньше концентрация планктона. Увеличение толщины верхнего квазиоднородного слоя, которое происходит под воздействием шторма, приводит к уменьшению в этом слое концентрации кормового зоопланктона. Естественно, что на тех участках со скоплением, где значение этой характеристики станет меньше, чем на соседних, скопление распадается. Сайровые косяки будут переходить на участки с более благоприятными для нагула условиями, характеризующимися более высокой концентрацией кормового зоопланктона. При этом они будут задерживаться и скапливаться в местах с наибольшими значениями концентрации кормового зоопланктона. Вдобавок участки, которые имели высокое содержание кормо-

вого зоопланктона, но избегались сайровыми косяками из-за высоких концентраций фитопланктона и (или) малой толщины верхнего квазиоднородного слоя, после шторма могут стать благоприятными для нагула и образования скоплений.

Заключение

Таким образом, погодные факторы оказывают двойственное влияние на эффективность применения БПЛА. С одной стороны, они ухудшают условия визуального наблюдения, а с другой – вызывают изменения в поведении и пространственном распределении косяков рыб, включая их заглубление и рассредоточение. В результате снижается вероятность обнаружения скоплений даже при технически исправной работе беспилотных систем. Эффективность применения БПЛА для мониторинга промысловых скоплений пелагических рыб будет определяться комплексом факторов, включающим погодные условия, выбор типа платформы, параметры съёмки и экономическую целесообразность, и требует системного подхода к планированию наблюдений и обработке данных. К условиям, непосредственно ограничивающим выполнение полётов, относятся сильный ветер, превышающий допустимые значения для конкретного типа платформы, а также атмосферные осадки, снижающие безопасность эксплуатации. К факторам, затрудняющим обнаружение и видеофиксацию скоплений морских рыб, относятся туман и дымка, уменьшающие дальность видимости, солнечные блики и волнение моря свыше 4 баллов, формирующее динамичную и визуально неоднородную поверхность. Дополнительно необходимо учитывать влияние гидрометеорологических процессов на поведение и пространственное распределение косяков рыб, включая последствия штормов и прохождение глубоких циклонов на удалении до 500 морских миль от района промысла (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики погодных условий, влияющих на возможность обнаружения косяков рыб с помощью БПЛА**Table 1.** Characteristics of weather conditions affecting the possibility of detecting fish schools using UAVs

Погодные условия, препятствующие эксплуатации БПЛА	Погодные условия, затрудняющие видеофиксацию косяков.	Погодные условия, влияющие на поведение косяков, затрудняя их обнаружение.
- Ветер более 15 м/с - Осадки	- Туман, дымка (видимость менее 100 м) - Солнечные блики при малой облачности - Волнение более 4 б (высота волн более 2 м)	- Последствия шторма - Прохождение глубокого циклона на удалении до 500 миль от района промысла

Список литературы

- Hardin P.J., Jensen R.R. Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: challenges and opportunities. *GIScience & Remote Sensing*. 2011,48(1):99–111.
- Anderson K., Gaston K.J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2013,11(3):138–146
- Harris J.M. et al. Use of unmanned aircraft systems in fishery science. *Transactions of the American Fisheries Society*. 2019,148(4):687–697.
- Dong D. et al. Intelligent detection of marine offshore aquaculture with high-resolution optical remote sensing images. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024,12(6):1012.
- Шилова Н.А., Данилов А.А. Использование беспилотных летательных аппаратов для мониторинга объектов морской фауны. *Arctic Environmental Research*. 2014,3:130–134. EDN: SZDMMJ
- Запорожец О.М., Запорожец Г.В. Использование фото- и видеофиксации для оценки количества производителей тихоокеанских лососей на нерестилищах и путях их миграций: некоторые методические подходы. *Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана*. 2017,47:77–90.
- Запорожец О.М. и др. Оценка численности производителей нерки и их распределение по нерестовым стадам в бассейне Начикинского озера (Камчатка) в 2019 г. *Известия ТИНРО*. 2020,200(3):618–634.
- Колпаков Н.В. и др. Эксперименты по определению с помощью БПЛА площади нерестилищ сельди *Clupea pallasii* и численности рыбаков-любителей на подлёдном лове морской малоротой корюшки *Hypomesus japonicus* в заливе Анива (о. Сахалин). *Труды СахНИРО*. 2022,18:68–78.
- Макоедов А.А. и др. Аэрофотограмметрический мониторинг нерестовой миграции горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* с использованием БПЛА потребительского класса применительно к топографическим условиям рек Сахалина. *Известия ТИНРО*. 2025,205(4):807–820.
- Hou Q. et al. Research on tuna purse seine fishing target detection and recognition method for unmanned aerial vehicle aerial images based on knowledge distillation. *ICES Journal of Marine Science*. 2025,82(12).
- Дуленин А.А. и др. Опыт и перспективы использования малых беспилотных летательных аппаратов в морских прибрежных биологических исследованиях. *Труды ВНИРО*. 2021,185:134–151.
- Zhao C. et al. Deep learning-based object detection in maritime unmanned aerial vehicle imagery: review and experimental comparisons. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024,128:107513.
- Зуссер С.Г. *Суточные вертикальные миграции рыб*. М.: Пищевая промышленность, 1971, 224 с.
- Борисов П.Г. Поведение рыб под воздействием искусственного света. В кн.: *Труды совещания по вопросам поведения и разведки рыб*. М.: Изд-во АН СССР, 1955, с. 20–25.
- Борисов П.Г. Применение искусственного света в мировой рыбодобывающей промышленности. *Рыбная промышленность за рубежом*. М.: 1956, с. 27–29.
- Протасов В.Р. О реакциях рыб на свет в связи с особенностями их световосприятия. В кн.: *Вопросы ихтиологии*. М.: Изд-во АН СССР, 1961, т. 1, 519–533. (вып. 3)
- Протасов В.Р. *Биоэлектрические поля в жизни рыб*. М.: ЦНИИТЭИРХ, 1971, 228 с.
- Гирса И.И. Биологические основы привлечения рыбы на свет. В кн.: *Биологические основы управления поведением рыб*. М.: Наука. 1970, с. 191–225.
- Гирса И.И. *Освещённость и поведение рыб*. М.: Наука, 1981, 164 с.
- Зуссер С.Г. Влияние светового режима на поведение рыб в море. В кн.: *Поведение промысловых рыб*. М.: 1985, с. 51–66.
- Новиков Ю.В. Условия образования промысловых скоплений сайры. *Труды ВНИРО*. 1966,60:143–149.
- Hotta H. *Biological studies and fisheries of the saury (Cololabis saira Brevoort)*. Tokyo: 1964, 96 p.
- Сидельников И.И. Распределение косяков сайры, привлечённых светом к борту судна. В кн.: *Сбор-*

- ник научно-технической информации ВНИРО. 1965,4:35–43.
24. Сидельников И.И. Результаты исследований по определению реакции сайры на свет от различных источников. *Известия ТИНРО*. 1967,56:191–197.
 25. Филатов В.Н. Влияние штормов на образование и распад скоплений нагульной сайры. *Биология моря*. 1993,1:67–74.
 26. Новиков Ю.В., Филатов В.Н. Разработка вероятностного прогноза распада нагульных скоплений сайры после шторма. В кн.: *Комплексные исследования морских гидробионтов и условий их обитания*. Владивосток: ТИНРО, 1994, с. 57–65.
 27. Филатов В.Н. Опыт оценки промысловой перспективности районов нагула сайры. В кн.: *Изменчивость состава ихтиофауны, урожайность поколений и методы прогнозирования запасов рыб в северной части Тихого океана*. Владивосток: ТИНРО, 1988, с. 130–135.
 28. Новиков Ю.В., Филатов В.Н. Влияние штормов на эффективность промысла сайры в ЮКР. В кн.: *Тезисы докладов VIII Всесоюзной конференции, Ленинград, 15–19 октября 1990 г.* Л.: 1990, с. 224–225.
 29. Мантейфель Б.П. *Экология поведения животных*. М.: Наука, 1980, 220 с.
 30. Герасимов В.В. *Эколого-физиологические закономерности стайного поведения рыб*. М.: Наука, 1983, 125 с.
 31. Герасимов В.В. Стайное поведение рыб и его пластичность. В кн.: *Экологические аспекты поведения рыб*. М.: Наука, 1984, с. 64–74.
 32. Летунова Е.А., Филатов В.Н. Условия формирования скоплений косяков сардины иваси у Южных Курил в летне-осенний период. В кн.: *Актуальные вопросы становления и развития рыбного хозяйства России: материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Владивосток, 5–6 июня 2025 г.* Владивосток: Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 2025, с. 241–248.
 33. Филатов В.Н. *Миграции и формирование скоплений массовых пелагических гидробионтов (на примере тихоокеанской сайры)*. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2015, 168 с. EDN: VBZCLJ
 34. Григоркина Р.Г., Фукс В.Р. *Воздействие тайфунов на океан*. Л.: Гидрометеониздат, 1986, 243 с.
 35. Старицын Д.К., Фукс В.Р. Синоптическая изменчивость фронтальных зон и разделов в системе вод Ойясио. *Вестник ЛГУ. Серия 7*. 1990,4:91–95.
 2. Anderson K., Gaston K.J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2013,11(3):138–146.
 3. Harris J.M. et al. Use of unmanned aircraft systems in fishery science. *Transactions of the American Fisheries Society*. 2019,148(4):687–697.
 4. Dong D. et al. Intelligent detection of marine offshore aquaculture with high-resolution optical remote sensing images. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024,12(6):1012.
 5. Shilova N.A., Danilov A.A. Use of unmanned aerial vehicles for monitoring marine fauna objects. *Arctic Environmental Research*. 2014,3:130–134. (In Russ.). EDN: SZDMMJ
 6. Zaporozhets O.M., Zaporozhets G.V. Use of photo and video recording to assess the number of Pacific salmon spawners in spawning grounds and migration routes: some methodological approaches. *Studies of Aquatic Biological Resources of Kamchatka and the Northwest Pacific Ocean*. 2017,47:77–90. (In Russ.).
 7. Zaporozhets O.M. et al. Assessment of sockeye salmon spawner abundance and their distribution across spawning stations in the Nachikinskoye Lake basin (Kamchatka) in 2019. *Izvestiya TINRO*. 2020,200(3):618–634. (In Russ.).
 8. Kolpakov N.V. et al. Experiments on determining the area of Pacific herring (*Clupea pallasii*) spawning grounds and the number of recreational fishers during ice fishing for Pacific sand lance (*Hypomesus japonicus*) in Aniva Bay (Sakhalin Island) using UAVs. *Trudy SakhNIRO*. 2022,18:68–78. (In Russ.).
 9. Makoedov A.A. et al. Aero photogrammetric monitoring of pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) spawning migration using consumer-grade UAVs adapted to the topographic conditions of Sakhalin rivers. *Izvestiya TINRO*. 2025,205(4):807–820. (In Russ.).
 10. Hou Q. et al. Research on tuna purse seine fishing target detection and recognition method for unmanned aerial vehicle aerial images based on knowledge distillation. *ICES Journal of Marine Science*. 2025,82(12).
 11. Dulenin A.A. et al. Experience and prospects of using small unmanned aerial vehicles in marine coastal biological research. *Trudy VNIRO*. 2021,185:134–151. (In Russ.).
 12. Zhao C. et al. Deep learning-based object detection in maritime unmanned aerial vehicle imagery: review and experimental comparisons. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024,128:107513.
 13. Zusser S.G. *Diurnal vertical migrations of fish*. Moscow: Pishchevaya Promyshlennost, 1971, 224 p. (In Russ.).
 14. Borisov P.G. Fish behavior under artificial light exposure. In: *Proceedings of the Meeting on Fish Behavior and Detection*. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1955, p. 20–25. (In Russ.).

References

1. Hardin P.J., Jensen R.R. Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: challenges and opportunities. *GIScience & Remote Sensing*. 2011,48(1):99–111.

15. Borisov P.G. Application of artificial light in global fisheries. *Foreign Fish Industry*. Moscow: 1956, p. 27–29. (In Russ.).
16. Protasov V.R. On fish reactions to light in relation to their light perception characteristics. In: *Journal of Ichthyology*. Moscow: USSR Academy of Sciences Publ., 1961, vol. 1, p. 519–533 (issue 3). (In Russ.).
17. Protasov V.R. *Bioelectric fields in fish life*. Moscow: TsNIITEIRKh, 1971, 228 p. (In Russ.).
18. Girsia I.I. Biological foundations of attracting fish with light. In: *Biological bases of fish behavior management*. Moscow: Nauka, 1970, p. 191–225. (In Russ.).
19. Girsia I.I. *Light exposure and fish behavior*. Moscow: Nauka, 1981, 164 p. (In Russ.).
20. Zusser S.G. Influence of light regime on fish behavior in the sea. In: *Behavior of Commercial Fish*. Moscow: 1985, p. 51–66. (In Russ.).
21. Novikov Yu. V. Conditions for the formation of commercial saury aggregations. *Trudy VNIRO*. 1966, 60:143–149. (In Russ.).
22. Hotta H. *Biological studies and fisheries of the saury (Cololabis saira Brevoort)*. Tokyo: 1964, 96 p.
23. Sidelnikov I.I. Distribution of saury schools attracted by light to the vessel's side. In: *Collection of scientific and technical information of VNIRO*. 1965, 4:35–43. (In Russ.).
24. Sidelnikov I.I. Results of studies on determining saury reaction to light from various sources. *Izvestiya TINRO*. 1967, 56:191–197. (In Russ.).
25. Filatov V.N. Influence of storms on the formation and disintegration of feeding saury aggregations // *Biology of the Sea*. 1993, 1:67–74. (In Russ.).
26. Novikov Yu.V., Filatov V.N. Development of a probabilistic forecast for the disintegration of feeding saury aggregations after a storm. In: *Comprehensive Studies of Marine Hydrobionts and Their Habitat Conditions*. Vladivostok: TINRO, 1994. P. 57–65. (In Russ.).
27. Filatov V.N. Experience in assessing the commercial prospects of saury feeding areas. In: *Variability of ichthyofauna composition, year-class strength, and methods for predicting fish stocks in the North Pacific*. Vladivostok: TINRO, 1988, p. 130–135. (In Russ.).
28. Novikov Yu.V., Filatov V.N. Influence of storms on saury fishing efficiency in the Southern Kuril Region. In: *Abstracts of the VIII All-Union Conference, Leningrad, October 15–19, 1990*. Leningrad: 1990, p. 224–225. (In Russ.).
29. Manteifel B.P. *Ecology of animal behavior*. Moscow: Nauka, 1980, 220 p. (In Russ.).
30. Gerasimov V.V. *Eco-physiological patterns of schooling fish behavior*. Moscow: Nauka, 1983, 125 p. (In Russ.).
31. Gerasimov V.V. Schooling behavior of fish and its plasticity. In: *Ecological aspects of fish behavior*. Moscow: Nauka, 1984, p. 64–74. (In Russ.).
32. Letunova E.A., Filatov V.N. Conditions for the formation of aggregations of Pacific sardine (iwashi) schools near the Southern Kurils in the summer-autumn period. In: *Topical Issues of the Development of the Russian Fishing Industry: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Vladivostok, June 5–6, 2025*. Vladivostok: Far Eastern State Technical Fisheries University, 2025, p. 241–248. (In Russ.).
33. Filatov V.N. *Migrations and Formation of Mass Pelagic Hydrobionts (on the Example of the Pacific Saury)*. Rostov-on-Don: Publishing House of the South Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2015, 168 p. (In Russ.). EDN: VBZCLJ
34. Grigorkina R.G., Fuks V.R. *Impact of typhoons on the ocean*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986, 243 p. (In Russ.).
35. Staritsyn D.K., Fuks V.R. Synoptic variability of frontal zones and boundaries in the Oyashio water system. *Vestnik LSU. Series 7*. 1990, 4:91–95 (In Russ.).

Об авторах

✉ **Летунова Елизавета Андреевна**, старший специалист лаборатории морских и пресноводных рыб, Сахалинский филиал Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО), Южно-Сахалинск, Россия, letunovae@sakhniro.vniro.ru. ORCID 0009-0008-9136-7807

Скорик Андрей Васильевич, руководитель группы дистанционных и инструментальных исследований лаборатории лососевых рыб, Сахалинский филиал Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО), Южно-Сахалинск, Россия, skorikav@sakhniro.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0922-0697>

Виктор Николаевич Филатов, старший специалист лаборатории океанографии, Сахалинский филиал Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО), Южно-Сахалинск, Россия, filatov@tinro.vniro.ru. <https://orcid.org/0009-0002-9214-9808>

About the Authors

✉ **Letunova, Elizaveta A.**, Senior Specialist, Marine and Freshwater Fish Laboratory, Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, letunovae@sakhniro.vniro.ru. <https://orcid.org/0009-0008-9136-7807>

Skorik, Andrey V., Head of the Remote Sensing and Instrumental Research Group, Salmon Fish Laboratory, Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, skorikav@sakhniro.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0922-0697>

Filatov, Viktor N., Senior Specialist, Oceanography Laboratory, Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, filatov@tinro.vniro.ru. <https://orcid.org/0009-0002-9214-9808>

Поступила 05.06.2026

Принята к публикации 24.08.2026

Received 05 June 2026

Accepted 24 August 2026

© Авторы, 2026 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2026.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 574.64:574.2

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.3.380-398>
<https://www.elibrary.ru/xfstga>

Территориальные и видовые особенности накопления микроэлементов в промысловых рыбах Охотского моря

А. А. Шестёра¹, К. Р. Масалева¹, А. В. Литвиненко², М. М. Донец¹, М. А. Беланов¹,
А. Д. Боровкова¹, Н. Д. Василенко¹, А. Г. Болдескул¹, В. Ю. Цыганков¹

¹ Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

² Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. Северо-западная часть Тихого океана обладает уникальными геохимическими условиями, обеспечивающими повышенные уровни аккумуляции микроэлементов в морских организмах региона. Несмотря на расположение здесь основных промысловых зон Российской Федерации, систематического контроля и оценки микроэлементного состава представителей местной ихтиофауны не ведется. В рамках исследования определены Fe, Zn, Cu, Mn, Ni, As, Pb, Cd в органах (мышцы, печень, гонады самцов и самок) минтая тихоокеанского (*Gadus chalcogrammus*), сельди тихоокеанской (*Clupea pallasii*) и камбалы желтоперой (*Limanda aspera*) из разных районов Охотского моря, выловленных в 2023–2024 гг. Концентрации микроэлементов определяли методами индуктивно связанной плазменной оптической эмиссионной спектрометрии и атомно-абсорбционной спектрометрии. В органах преобладали цинк и железо. Печень содержала наибольшие концентрации железа, цинка, меди, марганца и кадмия. Мышьяк и свинец накапливались преимущественно в мышцах. Наиболее высокие концентрации железа, меди, никеля и мышьяка отмечены для камбалы желтоперой, что является следствием ее придонного образа жизни. В мышцах сельди тихоокеанской зафиксировано пониженное содержание цинка и марганца. Минтай отличался повышенными концентрациями кадмия. Показано, что микроэлементный профиль рыб Охотского моря является интегральным показателем, отражающим сложное взаимодействие спектра факторов: биохимических свойств конкретных элементов, геохимических особенностей среды обитания, образа жизни, состава рациона и др.

Ключевые слова: микроэлементы, атомная абсорбция, эмиссионная спектрометрия, минтай, тихоокеанская сельдь, желтоперая камбала, органы, Охотское море

Spatial and species-specific features of trace element accumulation in commercial fish of the Sea of Okhotsk

Andrey A. Shestera¹, Kristina R. Masaleva¹, Anna V. Litvinenko², Maksim M. Donets¹,
Maksim A. Belanov¹, Aleksandra D. Borovkova¹, Nikita D. Vasilenko¹,
Anna G. Boldeskul¹, Vasiliy Yu. Tsygankov¹

¹ Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

² Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. The northwestern Pacific Ocean is characterized by unique geochemical conditions that promote elevated trace element accumulation in marine organisms of the region. Despite the location of major fishing grounds of the Russian Federation, in this area systematic monitoring and assessment of the trace element composition in the local ichthyofauna have not been conducted. This study quantified Fe, Zn, Cu, Mn, Ni, As, Pb, and Cd concentrations in the organs (muscles, liver, and male and female gonads) of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*), pacific her-

ring (*Clupea pallasii*), and yellowfin sole (*Limanda aspera*) collected from various areas of the Sea of Okhotsk in 2023–2024. Trace element concentrations were determined using inductively coupled plasma optical emission spectrometry and atomic absorption spectrometry. Zinc and iron were predominant in the organs. The liver contained the highest concentrations of iron, zinc, copper, manganese, and cadmium. Arsenic and lead accumulated predominantly in muscles. Yellowfin sole exhibited the highest levels of iron, copper, nickel, and arsenic, which stems from its demersal lifestyle. Pacific herring muscles showed comparatively lower concentrations of zinc and manganese. Walleye pollock had elevated concentrations of cadmium. It was shown that the trace element profile of fish from the Sea of Okhotsk is an integral indicator reflecting the complex interaction of multiple factors, including the biochemical properties of specific elements, geochemical features of the habitat, lifestyle, dietary composition, and other factors.

Keywords: trace elements, atomic absorption, emission spectrometry, walleye pollock, pacific herring, yellowfin sole, organs, Sea of Okhotsk

Финансирование и благодарности

Работа проведена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-74-10032).

Авторы благодарят уважаемых рецензентов за внимание к данной работе и конструктивные замечания.

Funding and Acknowledgements

The study was carried out with financial support from the Russian Science Foundation (project No. 23-74-10032).

The authors thank the respected reviewers for their attention to this paper and constructive comments.

Для цитирования: Шестёра А.А., Масалева К.Р., Литвиненко А.В., Донец М.М., Беланов М.А., Боровкова А.Д., Василенко Н.Д., Болдескул А.Г., Цыганков В.Ю. Территориальные и видовые особенности накопления микроэлементов в промысловых рыбах Охотского моря. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 3, с. 380–398. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.3.380-398>; <https://www.elibrary.ru/xfstga>

For citation: Shestera A.A., Masaleva K.R., Litvinenko A.V., Donets M.M., Belanov M.A., Borovkova A.D., Vasilenko N.D., Boldeskul A.G., Tsygankov V.Yu. Spatial and species-specific features of trace element accumulation in commercial fish of the Sea of Okhotsk. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 3, p. 380–398. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.3.380-398>; <https://www.elibrary.ru/xfstga>

Введение

Северо-западная часть Тихого океана в целом, и Охотское море, в частности – уникальная геохимическая зона. За счет подводного и надводного вулканизма и мощных апвеллингов местные морские экосистемы характеризуются повышенным содержанием биогенных и других элементов [1]. Этот фактор является основой высокой биопродуктивности Охотского моря и определяет промысловую значимость этой зоны. На него приходится около 40 % от общей добычи водных биологических ресурсов России.

Наиболее массовой промысловой рыбой здесь является минтай тихоокеанский (*Gadus chalcogrammus* Pallas, 1814). Это придонно-пелагический вид, доля которого в общей ры-

бодобыче России составила 49 % по данным статистики вылова за 2025 год*. на 2-3-м месте по массе годового вылова в рамках Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна располагается сельдь тихоокеанская (*Clupea pallasii* Valenciennes, 1847), стайная рыба, обитающая исключительно в пелагиали [2]. К придонным видам относится камбала желтоперая (*Limanda aspera* Pallas, 1814), представитель многочисленного сообщества камбалообразных, населяющих шельфовую зону дальневосточных морей. Этот вид также имеет промысловое значение, однако уровень его добычи существенно ниже [3].

Микроэлементный состав морских организмов тесно связан с их биохимическими потребностями, которые в свою очередь зависят от видовой принадлежности и физиологиче-

* Сведения об улове рыбы и добыче других водных биоресурсов за январь–декабрь 2025 года. Федеральное агентство по рыболовству, 2026, 143 с. URL: https://fish.gov.ru/wp-content/uploads/2026/04/1p_01-12_2025.pdf (дата обращения 21.05.2026). [Data on the catch of fish and extraction of other aquatic bioresources for January–December 2025. Federal Agency for Fisheries, 2026, 143 p. URL: https://fish.gov.ru/wp-content/uploads/2026/04/1p_01-12_2025.pdf (accessed 21.05.2026). (In Russ.)]

ских характеристик. Также уровни содержания элементов зависят от состава пищи гидробионтов и особенностей среды обитания. Особое влияние на аккумуляцию микроэлементов в Охотском море оказывают региональные геохимические условия [4, 5]. Антропогенные источники способны изменять соотношение химических элементов в водной среде, что в свою очередь может привести к изменению состава морских организмов.

Рыбы обладают выраженной способностью накапливать эссенциальные и токсичные элементы, давая тем самым интегральное отражение всех условий, способных влиять на уровни их содержания в гидробионтах [6]. Общие закономерности биоаккумуляции микроэлементов у морских рыб, органоспецифичность распределения и влияние образа жизни на их аккумуляцию, описаны достаточно полно [4, 7]. Ранее накоплено много данных об элементном составе промысловой ихтиофауны дальневосточных морей [8–11]. Современные исследования микроэлементного состава промысловых гидробионтов Охотского моря

сфокусированы преимущественно на исследовании тихоокеанских лососей [1, 12–14]. Данные о накоплении эссенциальных и токсичных элементов в органах других промысловых рыб, а также о влияющих на это факторах остаются фрагментарными и требуют дальнейшего изучения. Таким образом, цель исследования – определить концентрации микроэлементов в органах минтая (*Gadus chalcogrammus*), тихоокеанской сельди (*Clupea pallasii*) и желтоперой камбалы (*Limanda aspera*) из Охотского моря и выявить закономерности их накопления.

Материалы и методы

Образцы рыб отбирали в различных районах Охотского моря (рис. 1). Особей минтая (*Gadus chalcogrammus*) вылавливали в северо-западной части Амурского лимана в октябре-ноябре 2023 г., сельди тихоокеанской (*Clupea pallasii*) – в заливе Терпения в ноябре того же года, камбалы желтоперой (*Limanda aspera*) – в юго-западной части залива Анива в мае 2024 г. После вылова рыб замораживали при -20°C

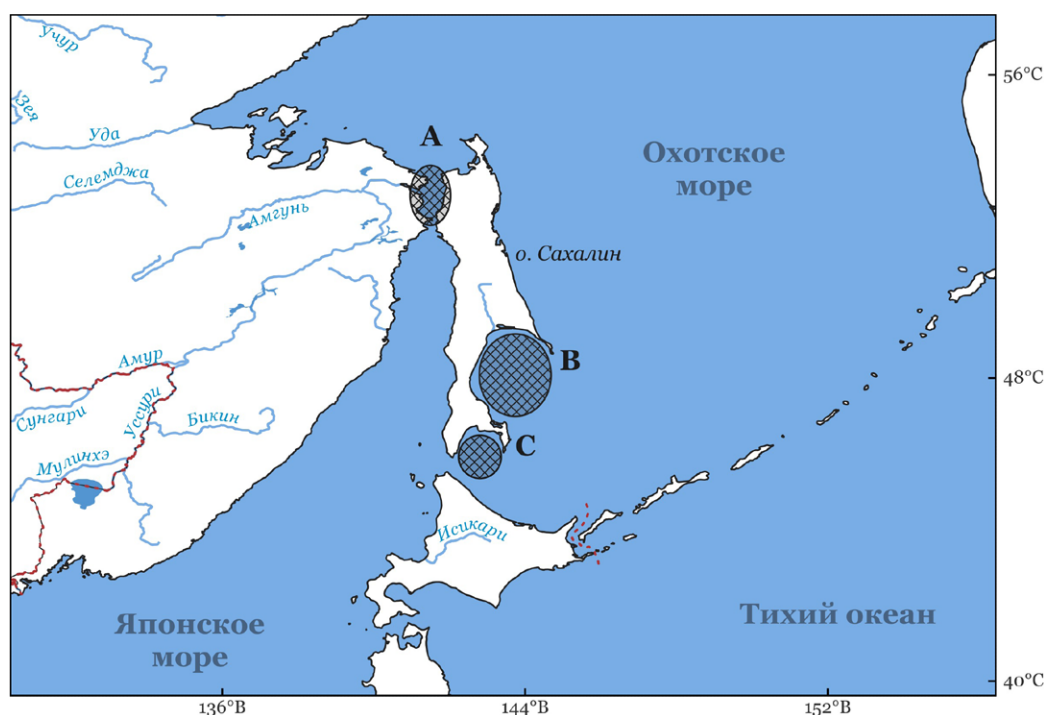


Рис. 1. Карта-схема отбора образцов: А – минтай тихоокеанский (*Gadus chalcogrammus*), В – сельдь тихоокеанская (*Clupea pallasii*), С – камбала желтоперая (*Limanda aspera*).

Fig. 1. Map of sampling: A, walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*); B, pacific herring (*Clupea pallasii*); C, yellowfin sole (*Limanda aspera*).

и транспортировали в лабораторию. Анализировались мышцы, печень, гонады самцов (семенники) и икра (гонады самок).

Перед проведением элементного анализа образцы высушивали под током воздуха при 30–32 °С в течение 168 часов до постоянной массы. Определение элементов проводили в кислотных минерализатах проб органов. Высушенный биологический материал измельчали, навески массой 0.5 г помещали в тефлоновые реакционные сосуды и добавляли по 10 мл особо чистой HNO_3 . Кислотное разложение проб осуществляли методом микроволновой минерализации с использованием системы MARS-5 [15, 16]. Полученные минерализаты выпаривали до состояния «влажных солей» [17], остаток перерастворяли в 2 % растворе HNO_3 , доводили до 10 мл и переносили в полипропиленовые пробирки для дальнейшего анализа.

Анализ образцов на содержание всех элементов проводился в ЦКП ЦЛЭДГИС ТИГ ДВО РАН. Концентрации мышьяка (As), меди (Cu), железа (Fe), марганца (Mn) и цинка (Zn) в минерализатах определяли методом индуктивно связанной плазменной оптической эмиссионной спектрометрии (ИСП-ОЭС) на приборе Plasma 3000. Содержание свинца (Pb) и кадмия (Cd) измеряли методом атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС) с электротермической атомизацией на спектрометре Shimadzu AA-7000. Концентрации никеля (Ni) определяли методом ААС с пламенной атомизацией на том же приборе.

Точность определения содержания элементов, а также возможное загрязнение образцов на стадиях подготовки и анализа контролировали путем регулярного измерения калибровочных растворов, включая холостые. Для проверки правильности результатов и оценки степени восстановления элементов проводили анализ сертифицированного референтного материала рыбных мышц ERM-BB422. Полученные значения находились в пределах, соответствующих паспортным значениям референтного материала.

Концентрации элементов выражали в мг/кг сухой массы. Полученные результаты были об-

работаны с использованием программной среды для статистических вычислений и визуализации R от CRAN (версия 2026.01.2+418). Для оценки нормальности распределения использован критерий Шапиро-Уилка. Достоверность различий определялась U-тестом Манна-Уитни или t-тестом Стьюдента (в зависимости от нормальности распределения обеих выборок), при принятом уровне статистической значимости $p \leq 0.05$. Часть исследованных выборок по органам отдельных видов (46 %) показали ненормальное распределение, имели объем $n \leq 2$ или большое число концентраций ниже предела обнаружения. Последние не учитывались в статистической обработке. В связи с этими фактами результаты представлены в виде диапазонов концентраций (min–max) и медианных значений (Me).

Результаты и обсуждение

Элементный состав органов минтая (*Gadus chalcogrammus*). Результаты определения массового содержания микроэлементов во всех исследуемых образцах приведены в таблице 1.

В мышцах наибольшее содержание среди исследованных элементов характерно для эссенциальных металлов – железа и цинка, что отражает их биологическую активность в организме [14]. Медь, марганец и никель, также являющиеся важными биоэлементами, обнаружены в концентрациях на 1–2 порядка меньше. С сопоставимыми или даже более высокими уровнями обнаружена тройка токсичных элементов – мышьяка, свинца и кадмия. Наибольшие концентрации характерны для As, что сопоставимо с ранее опубликованными результатами других исследований [9, 10].

В печени также преобладали железо и цинк, за ними следовали медь и марганец. Никель обнаруживался в концентрациях на порядок меньше. Мышьяк, свинец и кадмий были обнаружены в концентрациях 3.40–10.82, 0.17–0.82 и 0.84–7.71 мг/кг сух. мас. соответственно.

В икре зафиксировано преобладание цинка (198.64–546.74 мг/кг сух. мас.) над прочи-

ми элементами. Железа обнаружено в 2–3 раза меньше. Медь, марганец и никель зафиксированы в концентрациях 8.78–45.52, 1.30–1.99 и 0.45–0.99 мг/кг сух. мас. соответственно.

Среди тройки токсичных элементов содержание мышьяка было в несколько раз выше, чем у свинца и кадмия. Гонады самцов отличались наиболее низкими уровнями элементов

Таблица 1. Содержание микроэлементов (min–max (**медиана**)) в минтае, тихоокеанской сельди и желтоперой камбале из Охотского моря, мг/кг сухой массы

Table 1. Microelement concentrations (min–max (**median**)) in the walleye pollock, pacific herring, and yellowfin sole from the Sea of Okhotsk, mg/kg dry weight

Вид	Орган	Cu	Fe	Zn	Mn	Ni	As	Pb	Cd
Минтай (<i>Gadus chalcogrammus</i>)	Мышцы (n = 10)	2.03- 7.13 (3.60)	11.12- 46.83 (23.14)	31.69- 61.66 (40.03)	1.11- 3.25 (2.10)	0.20- 0.41 (0.28)	8.25- 19.19 (12.49)	2.09- 7.72 (4.61)	0.05- 0.42 (0.11)
	Печень (n = 9)	4.82- 47.87 (12.32)	28.21- 385.47 (127.50)	22.46- 140.44 (72.06)	0.54- 4.70 (2.81)	0.10- 1.25 (0.31)	3.40- 10.82 (6.36)	0.17- 0.82 (0.61)	0.84- 7.71 (2.66)
	Гонады самцов (n = 2)	1.17- 4.08 (2.62)	12.66- 32.31 (22.48)	38.09- 64.23 (51.16)	0.27- 0.51 (0.39)	0.21- 0.26 (0.23)	0.75- 2.54 (1.65)	0.04- 0.49 (0.27)	0.15- 0.22 (0.19)
	Икра (n = 8)	8.78- 45.52 (14.77)	74.75- 205.86 (110.92)	198.64- 546.74 (326.73)	1.30- 1.99 (1.48)	0.45- 0.99 (0.82)	5.25- 13.95 (9.28)	0.66- 3.57 (1.82)	0.54- 3.69 (1.16)
Тихоокеанская сельдь (<i>Clupea pallasii</i>)	Мышцы (n = 10)	1.21- 3.87 (2.22)	16.00- 59.80 (37.25)	9.88- 32.50 (15.01)	0.59- 1.59 (0.78)	< ПО- 0.29	2.05- 4.75 (3.65)	0.23- 1.45 (0.58)	0.02- 0.08 (0.05)
	Печень (n = 10)	2.05- 31.11 (4.99)	93.29- 2679.04 (349.13)	16.98- 498.45 (89.79)	0.67- 18.24 (3.11)	< ПО- 0.21	0.99- 10.08 (2.69)	0.02- 0.69 (0.17)	1.27- 13.16 (2.41)
	Гонады самцов (n = 4)	3.55- 5.23 (3.94)	53.73- 66.80 (59.94)	26.27- 48.15 (36.08)	0.46- 0.67 (0.57)	< ПО	1.10- 1.93 (1.37)	7.27- 9.18 (8.27)	0.08- 0.12 (0.09)
	Икра (n = 5)	2.60- 4.13 (3.25)	71.56- 132.05 (79.66)	58.74- 74.08 (64.28)	2.57- 4.15 (2.92)	0.23- 0.34 (0.28)	0.60- 1.26 (0.69)	1.54- 2.96 (2.18)	0.07- 0.23 (0.10)
Желтоперая камбала (<i>Limanda aspera</i>)	Мышцы (n = 10)	7.32- 90.66 (22.83)	132.06- 941.08 (314.08)	26.83- 46.07 (33.23)	1.48- 3.71 (2.14)	0.56- 2.01 (0.85)	8.54- 23.60 (15.64)	3.88- 4.27 (4.05)	0.03- 0.08 (0.06)
	Печень (n = 10)	8.20- 30.64 (14.59)	243.54- 1229.47 (447.73)	51.40- 114.98 (82.91)	2.60- 16.66 (4.28)	0.58- 1.69 (0.79)	5.43- 12.36 (9.26)	0.43- 6.07 (0.95)	0.73- 6.09 (1.81)
	Гонады самцов (n = 8)	4.36- 11.16 (9.06)	49.54- 348.73 (62.96)	74.13- 135.74 (89.16)	0.90- 10.87 (2.03)	< ПО- 3.19	1.85- 11.91 (8.33)	0.32- 2.14 (1.51)	0.08- 0.59 (0.20)
	Икра (n = 1)	18.58	147.99	97.21	3.10	3.35	< ПО	0.78	0.37

Примечание: < ПО – ниже пределов обнаружения оборудования.

Note: < ПО, below the detection limits of the equipment.

среди анализируемых органов. Распределение определяемых элементов в гонадах самцов происходило в порядке: Zn (51.16 мг/кг сух. мас.) > Fe (22.48 мг/кг сух. мас.) > Cu (2.62 мг/кг сух. мас.) > As (1.65 мг/кг сух. мас.) > Mn (0.39 мг/кг сух. мас.) > Pb (0.27 мг/кг сух. мас.) > Ni (0.23 мг/кг сух. мас.) > Cd (0.19 мг/кг сух. мас.).

При сравнении концентраций элементов между органами выявлено достоверно ($p \leq 0.0038$) большее содержание Zn в икре по сравнению с мышцами и печенью (рис. 2). Наибольшие уровни Cu и Fe отмечены в печени, при этом они сопоставимы с таковым в икре и достоверно ($p \leq 0.001$) превышают содержание в мышцах. О различиях с уровнем меди в гонадах самцов можно говорить только на уровне тенденции, так как их выборка включала два образца, чего недостаточно для определения достоверности отличий. Концентрации Mn достоверно не различались, однако распределялись в порядке: *печень* > *мышцы* > *икра* > *гонады самцов*, что совпадает с литературными данными [10]. Никель накапливался в органах минтая в наименьших количествах из всех исследуемых элементов, имея следующий порядок уменьшения концентраций: *икра* > *печень* > *мышцы* > *гонады самцов*. Достоверные отличия в

содержании Ni отмечены только между икрой и мышцами ($p = 0.0027$). Такие результаты сопоставимы с другими работами [10, 14].

Токсичные элементы As, Pb и Cd обнаружены во всех пробах, из них в наибольших концентрациях обнаружен мышьяк. Его концентрации максимальны в мышцах минтая, в меньшем количестве он содержится в икре, далее в порядке уменьшения концентраций следуют печень и гонады самцов. Накопление As преимущественно в мышечной ткани было отмечено и в других работах [9, 10]. Наибольшие концентрации свинца отмечены в мышцах. По сравнению с ними в икре Pb содержится в два раза меньше. Минимальные концентрации обнаружены в печени и гонадах самцов. Ранее в промысловых рыбах Японского и Охотского морей было зафиксировано наибольшее накопление свинца в печени по сравнению с другими органами [8, 10]. Кадмий имеет распределение, отличное от двух других токсичных элементов. Концентрация этого тяжелого металла в печени намного выше, чем в икре. В гонадах самцов и мышцах кадмия содержится на порядок ниже. Общая доля As, Pb и Cd среди определяемых элементов наибольшая в мышцах, наименьшая – в икре. Заслуживает внимания соотношение кадмия и свинца в органах минтая. В то время как он до-

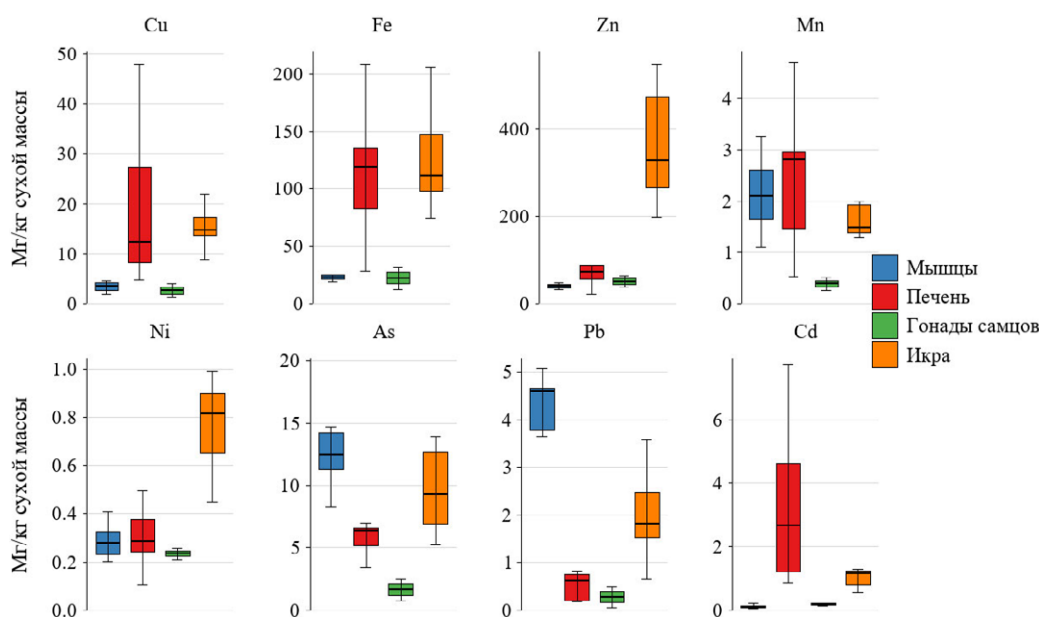


Рис. 2. Концентрации микроэлементов в органах минтая тихоокеанского (*Gadus chalcogrammus*).

Fig. 2. Trace element concentrations in the organs of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*).

минирует в печени и уступает свинцу в мышцах, в половых продуктах эта пара токсичных элементов находится на одном уровне.

Таким образом, во всех исследуемых органах минтая преобладали Zn и Fe. Среди токсичных элементов наибольшие уровни имел As. В порядке уменьшения концентраций этот токсикант следовал за Cu, а в печени и вовсе занял третье место (после Fe и Zn). Как и мышьяк, свинец в большей степени приурочен к мышцам. Кадмий в свою очередь имел наибольшие уровни в печени минтая. Для икры в целом характерно высокое содержание эссенциальных элементов, по сравнению с другими органами. Для гонад самцов отмечена наименьшая способность к аккумуляции исследуемых элементов.

Элементный состав органов тихоокеанской сельди (*Clupea pallasii*). В мышцах сельди тихоокеанской преобладало железо, уровни цинка были вдвое ниже. Другие эссенциальные элементы, медь и марганец, содержались в концентрациях 1.21–3.87 и 0.59–1.59 мг/кг сух. мас. соответственно. Никель был обнаружен только в половине мышечных образцов, наибольшая из зафиксированных концентраций составила 0.29 мг/кг сух. мас. Токсичные элементы имели следующие кон-

центрации: 2.05–4.75 мг/кг сух. мас. для мышьяка, 0.23–1.45 мг/кг сух. мас. для свинца, 0.02–0.08 мг/кг сух. мас. для кадмия.

В печени в высоких концентрациях было зафиксировано железо, содержание цинка было в несколько раз ниже. Меди и марганца, а также мышьяка и кадмия обнаружено на порядок меньше. Концентрации свинца варьировали от 0.02 до 0.69 мг/кг сух. мас. Никель удалось зафиксировать в одной пробе печени (0.21 мг/кг сух. мас.).

В наибольших количествах в образцах икры была обнаружена пара эссенциальных металлов: железо и цинк. Меньше в этом органе содержалось меди, марганца и никеля. В сопоставимых или в меньших количествах обнаружены токсиканты: свинец, мышьяк и кадмий. В гонадах самцов концентрации микроэлементов уменьшались в следующем порядке: железо (59.94 мг/кг сух. мас.) > цинк (36.08 мг/кг сух. мас.) > свинец (8.27 мг/кг сух. мас.) > медь (3.94 мг/кг сух. мас.) > мышьяк (1.37 мг/кг сух. мас.) > марганец (0.57 мг/кг сух. мас.) > кадмий (0.09 мг/кг сух. мас.). Концентрации никеля в этом органе оказались ниже предела обнаружения оборудования.

Сравнение органов сельди тихоокеанской по содержанию определяемых элементов (рис. 3) показало, что эссенциальные элементы

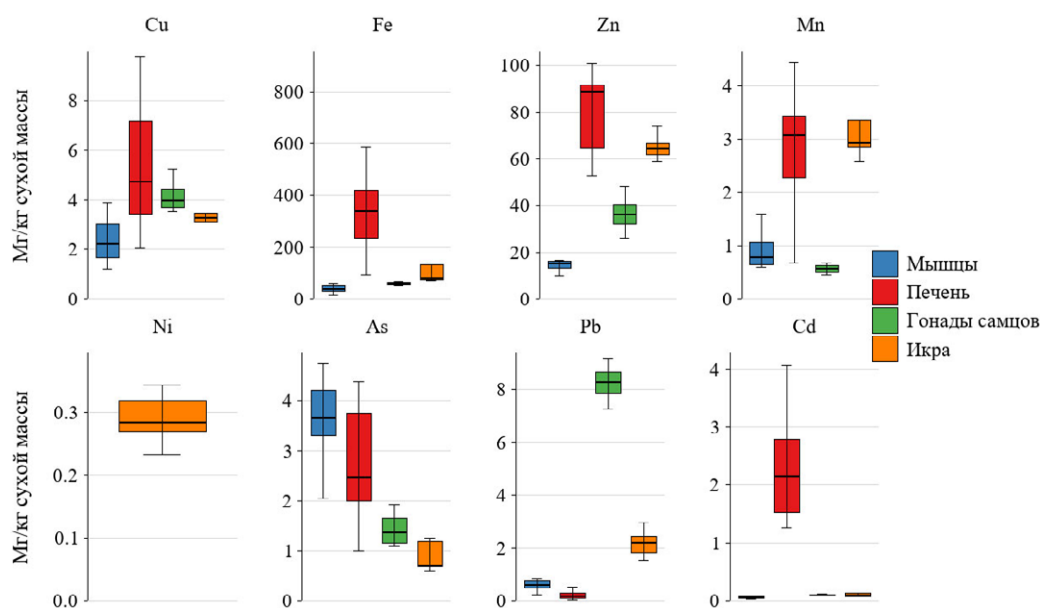


Рис. 3. Концентрации микроэлементов в органах тихоокеанской сельди (*Clupea pallasii*).

Fig. 3. Trace element concentrations in the organs of pacific herring (*Clupea pallasii*).

Cu, Fe, Zn и Mn максимально накапливаются в печени. Наименьшие концентрации этих элементов отмечены в мышцах за исключением марганца, который в наименьших количествах обнаружен в гонадах самцов, однако его концентрации в этих органах практически одинаковы. Распределение эссенциальных элементов так же, как и в органах минтая, соотносится с общими закономерностями для промысловой ихтиофауны дальневосточных морей [10]. Железа в органах *Clupea pallasii* обнаружено больше, чем цинка. В разы меньше концентрации Cu, еще меньше в органах тихоокеанской сельди содержится Mn. Никель в наибольших количествах содержался в икре.

Наибольшие концентрации мышьяка отмечены в мышцах, при этом достоверное различие зафиксировано с икрой ($p = 0.004$) и гонадами самцов ($p = 0.012$). Содержание As в печени уступает таковому в мышцах и достоверно превышает его в икре ($p = 0.048$). Уровни мышьяка в гонадах самцов были ниже, чем в печени и больше, чем в икре (на уровне тенденций). Достоверно большее ($p \leq 0.001$) содержание свинца, по сравнению с другими органами, характерно для гонад самцов (рис. 2). Минимальное содержание характерно для мышц (достоверно ниже, чем в половых продуктах при $p \leq 0.01$) и печени (достоверно ниже, чем в других органах при $p \leq 0.05$). Полученное для свинца распределение среди органов отличается от описанного ранее при исследовании промысловых видов Японского и Охотского морей, которое имело противоположный вид: *печень* > *мышцы* > *гонады* [10]. Кадмий, за исключением печени, обнаружен в более низких концентрациях по сравнению со свинцом, что подчеркивает ее выраженную способность аккумулировать Cd. В икре сельди никеля содержится больше, чем кадмия.

Полученные результаты позволяют говорить о существенном преобладании во всех исследуемых органах *Clupea pallasii* Fe и Zn. Концентрации этих биоэлементов в печени, как и Cu, Mn, а также токсичного Cd превышают уровни в прочих органах. Икра содержит наименьший уровень As, что не было харак-

терно для *Gadus chalcogrammus*. Среди отличий между двумя видами также отмечено повышенное содержание Pb в гонадах самцов и низкие концентрации в мышцах сельди.

Элементный состав органов желтопёрой камбалы (*Limanda aspera*). В образцах мышц, как и печени, обнаружены все элементы. Выражено превалирование железа (132.06–941.08 мг/кг сух. мас.). Прочие эссенциальные элементы были обнаружены в концентрациях 26.83–46.07, 7.32–90.66, 1.48–3.71, 0.56–2.01 мг/кг сух. мас. для цинка, меди, марганца и никеля соответственно. Уровни токсичных элементов имели следующие значения: 8.54–23.60 (мышьяк), 3.88–4.27 (свинец), 0.03–0.08 (кадмий) мг/кг сух. мас.

Анализ печени показал, что в наибольших концентрациях содержится железо, цинк – в несколько раз меньше. Более низкие уровни отмечены для прочих эссенциальных элементов: меди, марганца и никеля. Для мышьяка, свинца и кадмия зафиксированы концентрации 5.43–12.36, 0.43–6.07 и 0.73–6.09 мг/кг сух. мас. соответственно.

В гонадах самцов наибольшие уровни характерны для цинка и железа. Остальные элементы были обнаружены в концентрациях на 1–2 порядка ниже. В образце икры, как и в гонадах самцов, наибольшие уровни отмечены для железа (147.99 мг/кг сух. мас.) и цинка (97.21 мг/кг сух. мас.), наименьшие – для свинца (0.78 мг/кг сух. мас.) и кадмия (0.37 мг/кг сух. мас.). Мышьяк обнаружен не был.

При сравнении органов по содержанию определяемых элементов (рис. 4) отмечено, что больше всего железа накапливала печень (при этом достоверное превышение отмечено только по сравнению с гонадами самцов при $p \leq 0.01$) и мышцы (достоверное отличие от концентраций в семенниках при $p \leq 0.01$). Различия между печенью и мышцами статистически не значимы. В гонадах самцов биологически активный металл накапливается в несколько раз меньше. Второе место по величине концентраций занимает цинк, в мышцах его обнаружено меньше, чем в гонадах самцов ($p = 0.0003$) и печени ($p = 0.0001$). Медь

в основном накапливалась в мышцах (достоверное отличие только от гонад самцов при $p = 0.0373$), меньше – в печени. Минимальное количество Cu отмечено в гонадах самцов. Наибольшие концентрации Mn содержатся в печени (достоверное отличие от мышц и семенников при $p \leq 0.05$), наименьшие – в мышцах и гонадах самцов. Наименьшие концентрации никеля (ниже предела обнаружения) отмечены для семенников. Практически одинаковые результаты дал анализ мышц и печени.

Максимальные уровни As достоверно ($p \leq 0.05$) зафиксированы в мышцах, более низкие уровни – в печени и гонадах самцов. В образце икры этого токсичного элемента оказалось меньше предела обнаружения. Свинец в наиболее высоких концентрациях накапливался в мышцах, однако достоверное отличие только от семенников ($p = 0.0003$), где его более чем в два раза меньше. Наименьший уровень свинца отмечен для печени. Кадмий в органах камбалы уступает свинцу, за исключением печени. Содержание Cd убывает в следующем порядке: *печень* > *икра* > *гонады самцов* > *мышцы*. При этом в мышцах достоверно ($p \leq 0.001$) самые низкие концентрации Cd, в печени – достоверно ($p \leq 0.001$) самые высокие. Содержание в мышцах и гонадах статистически значимо не различается. Концен-

трации никеля в органах камбалы желтоперой достоверно не отличались.

Таким образом, для органов *Limanda aspera* характерно превалирование железа, особенно оно выражено в мышцах и печени. После Fe и Zn в порядке уменьшения концентраций (среди эссенциальных элементов) во всех исследуемых органах следует Cu, за ней Mn. Среди токсичных элементов наиболее высокие концентрации отмечены для As. Распределение Pb похоже на наблюдаемое у минтая, наибольшие концентрации металла характерны для мышц. Уровни Cd у всех трех видов рыб были максимальны в печени и превышали содержание Pb.

Закономерности распределения элементов в органах исследуемых рыб. Цинк – один из элементов, которые превалировали в организмах всех исследуемых промысловых видов. Это объясняется тем, что Zn является важным биогенным элементом, входит в состав более 40 ферментов, влияет на рост клеток, участвует в синтезе белков [18]. При этом наибольшие его концентрации в целом наблюдаются в икре (особенно это выражено у минтая) и печени, также высокое содержание этого элемента зафиксировано в гонадах самцов камбалы. Накопление Zn характерно для печени как для

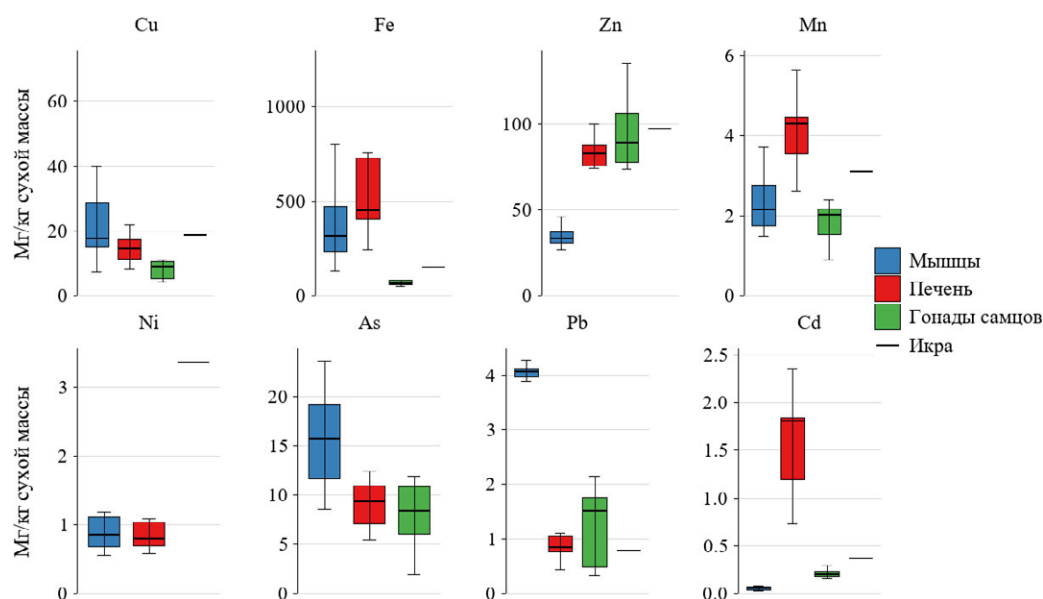


Рис. 4. Концентрации элементов в органах желтоперой камбалы (*Limanda aspera*).

Fig. 4. Trace element concentrations in the organs of yellowfin sole (*Limanda aspera*).

обменно-депонирующего органа [19]. Кроме этого, он играет важную роль в размножении живых организмов: усиливает активность гонадотропных ферментов, влияет на плодовитость и жизнеспособность эмбрионов рыб [7, 20].

Исследование микроэлементного состава тех же видов из Японского и Охотского морей показало большую приуроченность цинка к половым продуктам, чем к печени и мышцам [10]. Анализ органов и тканей других рыб показал более высокое содержание эссенциальных элементов Zn, Cu и Fe в икре по сравнению с гонадами самцов [14, 19], что совпадает с нашими результатами. Такую половую специфичность можно объяснить повышенной потребностью в накоплении эссенциальных элементов в отдельных органах (в том числе и в яичниках) и тканях самок рыб в период созревания половых желез [19].

Второй превалирующий металл – железо. Для него, как и для цинка, характерны более высокие концентрации в печени и икре, чем в мышцах и гонадах самцов. В печени всех исследуемых видов превалировал именно этот металл. Это объясняется важной ролью этого органа в обмене железа. Часть Fe в составе трансферрина от места всасывания (кишечник) переносится не к костному мозгу, а попадает в печень, где хранится в виде запасного фонда, в основном в составе ферритина. Также макрофаги этого депонирующего органа утилизируют старые или поврежденные эритроциты, осуществляют деградацию гемоглобина, тем самым высвобождая железо, которое затем вновь поступает в кровоток [21]. Присутствие железа в икре рыб в составе цитохромов и железофлавопротеинов необходимо на ранних стадиях онтогенеза [14].

Медь у минтая и сельди в большей степени накапливалась в печени. Для этого микроэлемента орган также является функциональным «депо» [8]. Большая часть меди, поглощенной организмом, в составе альбумина поступает в печень, где более 90 % от нее связывается церулоплазмином. Затем Cu при необходимости поступает в кровоток или же выводится из организма [22].

У камбалы желтоперой в свою очередь медь в большей степени аккумулировалась в мышцах. В них же были обнаружены высокие концентрации железа. Это может быть связано с повышенным содержанием этих элементов в среде обитания этого вида.

У всех трех видов печень отличалась наибольшим содержанием марганца. Этот орган является главным регуляторным центром гомеостаза марганца, где он накапливается, а затем оттуда либо направляется на потребности организма (например, этот микроэлемент важен для работы митохондрий, которых много в самой печени), либо выводится с желчью [23].

При анализе тех же промысловых рыб из Охотского и Японского морей отмечалось более высокое накопление железа, меди и марганца в печени по сравнению с мышцами, икрой и гонадами самцов [10]. Сравнительно высокое содержание Ni в икре всех исследуемых видов может быть обусловлено важностью этого микроэлемента в раннем развитии рыб [24].

Рассматривая токсичные элементы, важно отметить, что все исследуемые виды промысловых рыб Охотского моря отличаются относительно высокими концентрациями мышьяка, зачастую близкими к содержанию меди. В настоящей работе не дифференцировали химические формы As, поэтому его повышенное содержание следует рассматривать прежде всего как особенность элементного профиля и биоаккумуляции, а не как свидетельство токсикологического риска.

Мышьяк больше всего накапливался в мышцах, за ними следует печень в порядке уменьшения концентраций, затем половые продукты. Лишь у минтая в икре концентрации As выше, чем в печени. Эти закономерности вполне согласуются с результатами исследования промысловых рыб Дальневосточных морей. Как в элементном профиле рыб, так и в морской воде, As занимал одно из первых мест по уровням содержания. Авторы приводят распределение As в следующем виде: *мышцы* > *печень* > *гонады*, что совпадает с нашим [10].

Свинец в печени рыб обнаружен в невысоких концентрациях относительно других органов, несмотря на известную способность

накапливаться преимущественно в этой структуре организма. Уровни поллютанта в мышцах были выше, чем в печени у всех анализируемых видов. Можно предположить, что свинец накапливается преимущественно в мышечной ткани из-за способности имитировать ионы кальция в ее ферментах при его дефиците [25]. К тому же для вод Охотского моря характерно обогащение свинцом из-за вулканической активности [1].

Имеются сведения о регистрации у рыб наибольших уровней Pb в гонадах, мышечной ткани и мозге [26]. У минтая и камбалы среди исследуемых органов в мышцах обнаружены наибольшие концентрации Pb. Обращает внимание повышенный уровень свинца в гонадах самцов сельди, превосходящий содержание в других органах в несколько раз, что не сопоставимо с предыдущими исследованиями [10]. С другой стороны, подобная нашей ситуация была отмечена при исследовании уровней свинца в органах горбуши из зал. Анива [1]. Результаты анализа показали более высокие концентрации Pb в семенниках, чем в мышцах и печени. Такая специфика накопления распределения свинца в органах минтая, сельди тихоокеанской и камбалы желтоперой из Охотского моря требует дополнительного изучения.

Кадмий во всех трех видах подчиняется одной закономерности: его концентрации уменьшаются в порядке: *печень* > *икра* > *гонады самцов* > *мышцы*, что согласуется с результатами анализа содержания Cd в этих же видах из Охотского и Японского морей [10]. Превышение концентраций кадмия в печени над другими органами у всех видов подтверждает известную способность печени рыб, как и теплокровных животных, накапливать кадмий в этом органе [8]. В этом органе за счет высокого содержания металлонионов происходит связывание Cd в комплексы, чтобы предотвратить токсическое воздействие тяжелого металла [27].

Результаты исследования показали четкие и вполне объяснимые закономерности распределения элементов среди органов рыб. Среди эссенциальных металлов превалируют цинк и

железо, что преимущественно объясняется их высокой биологической значимостью. Печень демонстрировала свою депонирующую функцию, накапливая максимальные концентрации железа, цинка, меди, марганца и кадмия. Мышьяк и свинец, напротив, аккумулировались преимущественно в мышцах, что обусловлено локальной геохимической ситуацией или собственными свойствами элементов.

Сравнение элементного состава органов минтая, тихоокеанской сельди и желтоперой камбалы. В первую очередь, сравнивая результаты элементного анализа всех трех видов рыб, важно отметить, что в камбале в целом в большей мере накапливаются эссенциальные элементы Fe и Cu. Концентрации железа в мышцах (рис. 5) этой бентосной рыбы достоверно ($p \leq 0.01$) выше, чем у минтая и сельди. В половых продуктах камбалы железа содержится намного больше по сравнению с парой других видов. При этом в печени (рис. 6) *Limanda aspera* железо содержится в количествах, сопоставимых с таковыми у *Clupea pallasii*, но с более высокой верхней границей диапазона концентраций. В этом органе у *Gadus chalcogrammus* содержание Fe достоверно ($p \leq 0.05$) самое низкое.

Столь высокое содержание железа в органах камбалы желтоперой можно объяснить ее экологическим статусом. Рыба является бентосным организмом, питается обитателями морского дна, которые в свою очередь накапливают труднорастворимые соединения железа. Ими же обогащены донные отложения [7]. Однако в результате исследования промысловых рыб залива Петра Великого были зафиксированы достоверно более высокие концентрации железа в мышцах сельди тихоокеанской *Clupea pallasii* по сравнению с этим же органом камбал полосатой *Liopsetta pinnifasciata* и остроголовой *Cleisthenes herzensteini* [8]. Это может свидетельствовать о влиянии на концентрации железа (как и других веществ) не только от принадлежности к какой-либо экологической группе, но и других факторов. Например, различной геохимической обстановки в районах исследований. В этом же исследовании было

отмечено большее накопление железа в печени рыб-бентофагов по сравнению с питающейся планктоном сельдью, что в свою очередь сопоставимо с нашими результатами.

Содержание меди в мышцах камбалы желтоперой также достоверно ($p \leq 0.001$) превышает таковое у минтая и сельди тихоокеан-

ской. По концентрациям в печени значимое ($p = 0.0086$) превышение уровня Cu отмечено только для камбалы по сравнению с сельдью. Полученные нами видовые различия не совпадают с установленными ранее. При анализе уровня содержания Cu в промысловой ихтиофауне залива Петра Великого были зафиксированы

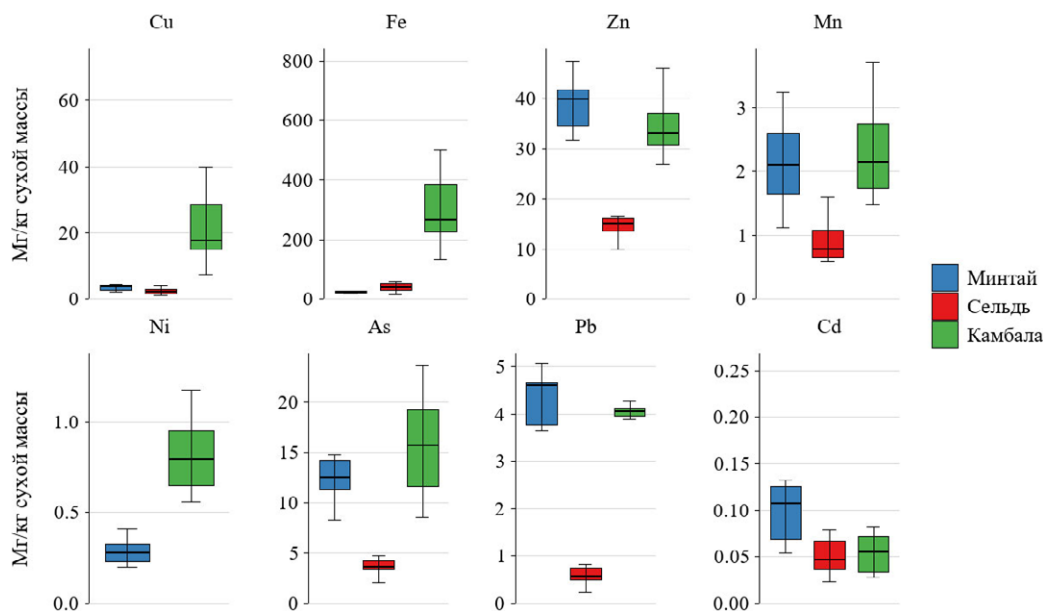


Рис. 5. Сравнение концентраций микроэлементов в мышцах минтая (*Gadus chalcogrammus*), сельди тихоокеанской (*Clupea pallasii*) и камбалы желтоперой (*Limanda aspera*).

Fig. 5. Comparison of trace element concentrations in the muscles of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*), Pacific herring (*Clupea pallasii*), and yellowfin sole (*Limanda aspera*).

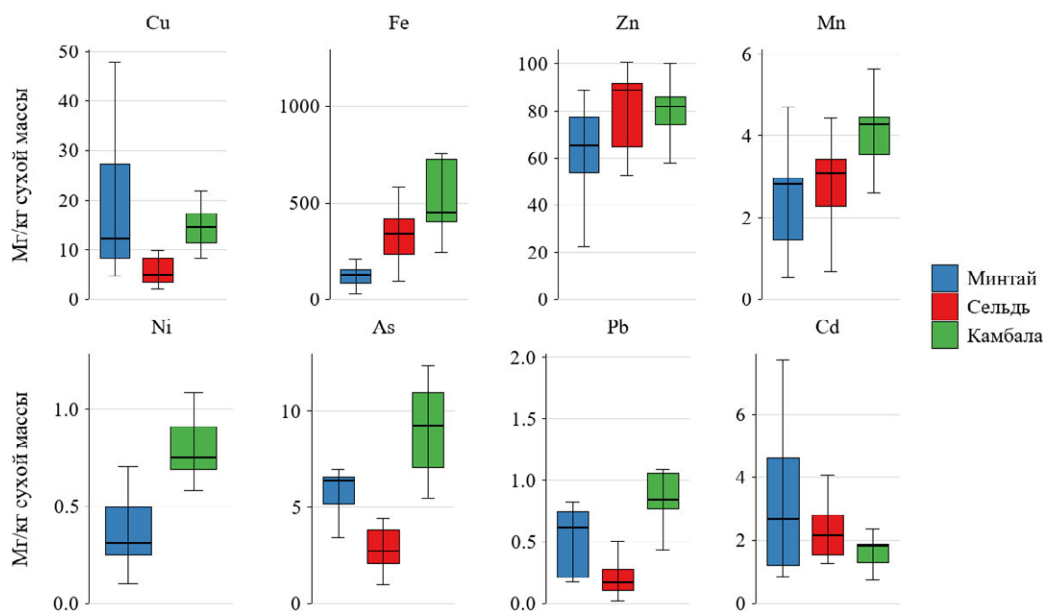


Рис. 6. Сравнение концентраций элементов в печени минтая (*Gadus chalcogrammus*), сельди тихоокеанской (*Clupea pallasii*) и камбалы желтоперой (*Limanda aspera*).

Fig. 6. Comparison of trace element concentrations in the liver of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*), Pacific herring (*Clupea pallasii*), and yellowfin sole (*Limanda aspera*).

достоверно более высокие концентрации Cu в мышцах сельди тихоокеанской по сравнению с камбалами [8]. Это объяснялось тем, что сельдь питается планктонными организмами, которые характеризуются высокими коэффициентами накопления тяжелых металлов из морской среды.

Предположительно особенность наших результатов обусловлена обилием соединений меди в донных отложениях залива Анива, где были отобраны особи *Limanda aspera*. Это в свою очередь может быть связано с влиянием вулканической активности или поступлением Cu с материковым и речным стоком, в результате которого соединения меди депонируются в донных грунтах. Медь при возможном вулканическом происхождении также является свидетелем антропогенного воздействия на морскую среду [1]. В залив Анива впадает ряд рек, и на его берегу расположен Корсаковский морской торговый порт.

Анализ концентраций цинка в мышцах показал достоверное ($p \leq 0.001$) превышение его содержания у минтая и камбалы над таковым у сельди. Мышцы минтая и камбалы содержали сходные концентрации цинка. При исследовании этих же видов из Японского моря [10] в мышцах сельди тихоокеанской были обнаружены концентрации более высокие (14–17 мкг/г сух. мас.), чем в том же органе у камбалы желтоперой (0.8–1.4 мкг/г сух. мас.). Для этого органа у минтая диапазон составил 4.3–15 мкг/г сух. мас. В этих результатах, в отличие от наших, не наблюдаются наименьшие концентрации для мышц сельди.

Следует предположить, что на соотношение уровней Zn в органах рыб большее влияние оказали не экологические особенности видов, а другие факторы. Например, это может указывать на более высокое содержание цинка в среде обитания *Gadus chalcogrammus* и *Limanda aspera* по сравнению с пелагиалью зал. Терпения. В печени камбалы, минтая и сельди Zn содержится примерно в одних и тех же концентрациях, достоверные отличия не обнаружены.

Марганец, как и цинк, в достоверно ($p \leq 0.001$) больших количествах содержится в

мышцах минтая и камбалы, чем сельди. В отношении печени достоверно ($p = 0.0398$) больше Mn содержится в камбале по сравнению с сельдью. Сельдь и минтай по содержанию марганца в печени близки. Такие результаты дают еще одно основание для предположения о том, что сравнительно низкие концентрации эссенциальных элементов в организме сельди тихоокеанской из зал. Терпения являются следствием их невысокого содержания в среде обитания и пище.

Концентрации Ni максимальны в органах желтоперой камбалы, в ее мышцах ($p = 0.0002$) и печени ($p = 0.0101$) содержится существенно больше этого элемента, чем у минтая. Минимальные количества в целом характерны для тихоокеанской сельди. Ранее ученые отмечали, что в организме бентофагов концентрации никеля выше по сравнению с другими рыбами [28].

Анализируя содержание As в мышцах, печени и гонадах, мы можем отметить, что виды рыб по накоплению этого токсичного элемента в целом убывают в порядке: *камбала* > *минтай* > *сельдь*. Мышцы и печень тихоокеанской сельди достоверно ($p \leq 0.05$) накапливали наименьшие количества мышьяка.

Существенное превышение уровней As в минтае над таковым у сельди может быть связано с химическим составом рациона, основную массу которого составляют планктонные ракообразные [29]. Анализ содержания мышьяка в промысловых ракообразных Японского моря показал его повышенные уровни, которые даже превышают таковые в рыбах [30]. Превышение ПДК (5 мг/кг сырой массы) было зафиксировано в 17–68 % особей, в зависимости от исследуемого вида [31]. Предположительно и для планктонных ракообразных характерны высокие концентрации As.

Важно отметить, что и сельдь тихоокеанская питается главным образом планктонными ракообразными [32]. Следовательно, на концентрации мышьяка в рыбах влияет не столько видовой состав их рациона, сколько содержание элементов в среде обитания в целом. Минтай совершает миграции в более глубокие водные горизонты, там он может питаться

организмами, которые содержат больше свинца, чем планктон из верхних слоев воды. Или же воды Амурского лимана, где был выловлен минтай, более обогащены Pb по сравнению с акваторией залива Терпения, где обитала сельдь тихоокеанская.

Камбала желтоперая в свою очередь питается главным образом червями (эхиуридами и полихетами), ракообразные занимают намного меньшую долю. Такой вывод был получен при анализе ее рациона в заливе Петра Великого [33]. Наши данные сопоставимы с результатами, полученными при исследовании элементного состава промысловых рыб дальневосточных морей, где также отмечались более высокие уровни мышьяка в мышцах камбал, по сравнению с минтаем и сельдью [11]. Возможно, это связано с более высоким содержанием в донных осадках, откуда они поступают в организм рыб в ходе питания.

В мышцах минтая и камбалы достоверно ($p \leq 0.001$) накапливается больше свинца, чем в этих же органах у сельди. В печени концентрации Pb также больше у камбалы ($p = 0.0002$) и минтая (тенденция, $p = 0.0516$) по сравнению с сельдью. Это можно объяснить тем, что рыбы-бентофаги подвержены аккумуляции токсичных элементов из детрита и мелких бентосных организмов, концентрирующих самое большое количество тяжелых металлов среди остальных компонентов морских экосистем [34]. Учитывая, что Северо-Западная Пацифика обогащена различными тяжелыми металлами (в том числе свинцом) [1], причина значительного накопления Pb мышцами и печенью придонных и мигрирующих ко дну рыб вполне может быть обоснована их экологической стратегией и элементным составом рациона.

Кадмий преимущественно аккумулялировали исследуемые особи минтая, в его мышцах элемента достоверно ($p \leq 0.05$) больше, чем у сельди и камбалы. Образцы печени существенно не отличаются по содержанию токсичного металла, однако по медианным значениям и по диапазонам концентраций можно выстроить следующий ряд уменьшения концентраций: *минтай* > *сельдь* > *камбала*. Такие закономерности не согласуются с нашими предыдущими

рассуждениями о том, что рыбы-бентофаги в большей мере подвержены накоплению различных элементов. Можно предположить в отношении кадмия большее влияние того, что минтай занимает более высокий трофический уровень и имеет более разнообразный рацион. Этот промысловый вид по характеру питания можно назвать универсалом. С одной стороны, он питается планктонными организмами, которые характеризуются высокими коэффициентами накопления различных элементов [8]. Также в рацион минтая могут входить зообентос, нектон и макрофиты, которые тоже могут аккумулировать тяжелые металлы. Стоит учитывать, что преобладание в питании минтая тех или иных организмов изменчиво, оно зависит от сезона, возраста и конкретного места обитания [35]. Помимо этого, можно полагать, что в среде обитания рыбы (Амурский лиман) содержатся более высокие концентрации кадмия, чем в акваториях вылова сельди и камбалы.

Следует отметить, что наименьшая совокупная концентрация токсичных элементов (As, Pb и Cd) в органах сельди тихоокеанской характерна для икры. Это объясняется тем, что у рыб развита защита женских половых продуктов от воздействия токсикантов. После оплодотворения, при дальнейшем росте, концентрации различных элементов в молодых особях начинают возрастать пропорционально их содержанию в воде [14]. У минтая такая закономерность не обнаружена. В его икре мышьяка и свинца содержится больше, чем в печени. Это может быть обусловлено какими-либо биологическими особенностями минтая или геохимической спецификой акватории отбора.

Сравнение трех видов показало, что наибольшие концентрации Fe, Cu, Ni и As характерны для камбалы желтоперой. Это объясняется ее питанием донными организмами и постоянным контактом с обогащенными металлами донными осадками. Сравнительно низкие концентрации Zn и Mn в мышцах сельди тихоокеанской могут указывать на относительно низкое содержание этих элементов в пелагиали Охотского моря. Превышение концентраций Cd в органах минтая над таковыми у сельди и камбалы может быть обусловлено

особым трофическим статусом минтая либо локальным обогащением кадмием вод Амурского лимана. Таким образом, экологическая принадлежность вида является значимым, но не единственным фактором, определяющим элементный состав органов. Значительный вклад вносят локальные геохимические условия и особенности питания. Также необходимо учитывать, что рыбы для исследования были отобраны в разные сезоны и годы. Это могло обусловить нахождение организмов на разных этапах жизненного цикла, что в свою очередь влияет на потребность в микроэлементах и их концентрации в органах. Этот факт следует принимать во внимание при интерпретации выявленных межвидовых различий.

Заключение

Таким образом, выявлены выраженные закономерности распределения микроэлементов между органами изученных промысловых рыб Охотского моря. Печень выступает основным «депо» для эссенциальных элементов Fe, Zn, Cu, Mn и токсичного Cd, что объясняется ее важной ролью в метаболизме и детоксикации. Мышечная ткань характеризуется повышенным накоплением мышьяка. Распределение свинца различается. У минтая тихоокеанского и камбалы желтоперой оно сходно, а у сельди тихоокеанской отличается превалированием Pb не в мышцах, а в гонадах самцов. Семенники содержат минимальные концентрации исследуемых веществ, а икра в большинстве случаев обогащена эссенциальными элементами, что, вероятно, связано с их значением для развития молоди из икринок.

Установлены межвидовые различия, обусловленные экологическим статусом и трофическими особенностями. Желтоперая камбала аккумулирует больше железа, меди, никеля и мышьяка, что, предположительно, отражает контакт с донными отложениями и питание бентосом. Тихоокеанская сельдь отличается пониженными или наименьшими уровнями большинства элементов, вероятно, вследствие пелагического образа жизни и локального дефицита некоторых элементов в пелагиали за-

лива Терпения. Более высокие концентрации кадмия у минтая тихоокеанского могут быть связаны со спецификой его питания или локальной геохимической обстановкой района вылова. Таким образом, элементный профиль исследованных промысловых рыб Охотского моря формируется под комплексным влиянием биохимических свойств микроэлементов, специфики органов, экологического статуса организма (бентосный, пелагический или мигрирующий), химического состава рациона и региональных геохимических условий. При этом пространственно-временная разобщенность выборок не позволяет полностью разграничить влияние видовых особенностей и локальной геохимической обстановки.

Список литературы

1. Литвиненко А.В., Христофорова Н.К., Цыганков В.Ю. Влияние мест нагула на содержание тяжелых металлов в горбуше (*Oncorhynchus gorbuscha*, Salmonidae). *Вестник Камчатского государственного технического университета*. 2022,62:98–116. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2022-62-98-116>
2. Антонов Н.П., Датский А.В., Мазникова О.А., Митенкова Л.В. Современное состояние промысла тихоокеанской сельди в дальневосточных морях. *Рыбное хозяйство*. 2016,1:54–58. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25911565>
3. Антонов Н.П., Кузнецова Е.Н. Динамика вылова основных промысловых видов рыб в морях Дальнего Востока. *Рыбное хозяйство*. 2021,1:34–41. <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2021-1-34-41>
4. Монин А.С., Лисицын А.П. (ред.). *Биогеохимия океана*. Москва: Наука; 1983, 368 с.
5. Litvinenko A.V., Alekseev M.Y., Danilin D.D., Tsygankov V.Yu. Food safety of salmon from the Euro-Arctic and Sakhalin-Kuril Regions of Russia: Heavy metals in pink salmon. In: Karev V. (ed.). *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes: Proceedings of the 10th International scientific school for young scientists, Moscow, October 18-20, 2024*. Cham: Springer, 2025, p. 271–278. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88459-7_30
6. Моисеенко Т.И. Влияние геохимических факторов водной среды на биоаккумуляцию металлов в организме рыб. *Геохимия*. 2015,3:222–233. <https://doi.org/10.7868/S0016752515030097>
7. Морозов Н.П., Петухов С.А. *Микроэлементы в промысловой ихтиофауне Мирового океана*. Москва: Агропромиздат, 1986. 159 с.

8. Симоконь М.В. Тяжёлые металлы в промысловых рыбах залива Петра Великого в связи с условиями обитания: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Владивосток: Дальневост. гос. ун-т; 2003, 24 с.
9. Жадько Е.А., Стеблевская Н.И., Полякова Н.В., Чусовитина С.В. Микроэлементы в тканях некоторых видов гидробионтов залива Петра Великого. *Научные труды Дальрыбвтуза*. 2013,30:19–27. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21166395>
10. Ковековдова Л.Т., Симоконь М.В., Кику Д.П. Микроэлементный состав промысловых рыб дальневосточных морей. *Проблемы региональной экологии*. 2013,2:72–75. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19100158>
11. Ковековдова Л.Т., Кику Д.П., Касьяненко И.С. Мониторинг водной среды и безопасности промысловых объектов в Дальневосточном рыбохозяйственном бассейне (токсичные элементы). В кн.: *Морские биологические исследования: достижения и перспективы: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Севастополь, 19–24 сентября. 2016*. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016, т. 3, с. 111–114. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27547401>
12. Gamov M.K., Ivanova A.E., Mironova E.K., Tsygankov V.Yu. Heavy metals and arsenic in commercial fish of the Sea of Japan, Sea of Okhotsk, and Bering Sea: Current status (literature review). *Marine Biological Journal*. 2022,7(4):14–30. <https://doi.org/10.21072/mbj.2022.07.4.02>
13. Христофорова Н.К., Цыганков В.Ю., Боярова М.Д., Лукьянова О.Н. Отражение биогеохимических условий морской среды на содержании микроэлементов в тихоокеанских лососях. *Успехи наук о жизни*. 2014,8:91–100. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23086730>
14. Литвиненко А.В., Салимзянова К.Р., Христофорова Н.К., Данилин Д.Д., Цыганков В.Ю. Половые различия в содержании микроэлементов в органах и тканях нерки из восточных заливов полуострова Камчатка. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. 2023,65:111–122. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2023-65-111-122>
15. Khristoforova N.K., Tsygankov V.Yu., Boyarova M.D., Lukyanova O.N. Heavy metal contents in the pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum, 1792 from Kuril oceanic waters during anadromous migration. *Russian Journal of Marine Biology*. 2015,41(6):479–484. <https://doi.org/10.1134/S1063074015060085>
16. Эйрих С.С., Колотушкина Л.В., Серых Т.Г. Содержание тяжелых металлов в мышечной ткани мирных и хищных рыб реки Иртыш. *Известия АО РГО*. 2024,2(73):77–94. <https://doi.org/10.24412/2410-1192-2024-17306>
17. Яблоков Н.О., Анищенко О.В., Зуев И.В. Распределение металлов в красной и белой осевой мускулатуре трех видов рыб Красноярского водохранилища. *Журнал Сибирского фед. ун-та. Серия: Биология*. 2019,12(4):430–444. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0310>
18. Христофорова Н.К., Шулькин В.М., Кавун В.Я., Чернова Е.Н. Тяжелые металлы в промысловых и культивируемых моллюсках залива Петра Великого. Владивосток: Дальнаука, 1993, 296 с.
19. Степаненко Е.А., Волкова И.В., Чаплыгин В.А., Исаева Е.К. Содержание цинка в органах и тканях каспийского рыбца *Vimba vimba persa* (Pallas, 1814). *Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство*. 2025,1:95–101. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2025-1-95-101>
20. Converse A, Thomas P. The zinc transporter ZIP9 (Slc39a9) regulates zinc dynamics essential to egg activation in zebrafish. *Scientific Reports*. 2020,10:15673. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72515-4>
21. Лукина Е.А., Деженкова А.В. Метаболизм железа в норме и при патологии. *Клиническая онкогематология. Фундаментальные исследования и клиническая практика*. 2015,8(4):355–361. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25223915>
22. Коджакова С.З. Биологическая роль меди в живых организмах. *Новая наука: От идеи к результату*. 2016,5–3(84):8–12. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26104564>
23. Adam S., Grama A., Mititelu A., Bența G., Pop T.L. Dysregulation of trace elements in pediatric cholestasis: From pathophysiology to nutritional approaches. *International Journal of Molecular Sciences*. 2026,27(6):2710. <https://doi.org/10.3390/ijms27062710>
24. Lapointe D., Couture P. Accumulation and effects of nickel and thallium in early-life stages of fathead minnows (*Pimephales promelas*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2010;73(4):572–578. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.01.004>
25. Goyer R.A. Nutrition and metal toxicity. *American Journal of Clinical Nutrition*. 1995,61(3 Suppl):646S–650S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/61.3.646S>
26. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Карапетян Т.А., Доршакова Н.В. Влияние свинца на живые организмы. *Журнал общей биологии*. 2020,81(2):147–160. <https://doi.org/10.31857/S0044459620020086>
27. Фазлыева А.С., Усманова Э.Н., Даукаев Р.А., Каримов Д.О., Валова Я.В., Смолянкин Д.А., Байгильдин С.С. Распределение кадмия и экспрессия металлотионеина в органах крыс при острой интоксикации. *Гигиена и санитария*. 2020,99(9):1011–1015. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-9-1011-1015>
28. Морозов Н.П., Патин С.А., Никоненко Е.М. Микроэлементы в воде, взвешях и гидробионтах Черного моря. *Геохимия*. 1976,9:1391–1399.

29. Кузнецова Н.А., Шебанова М.А. Питание минтая и его кормовая база в Чукотском море в летне-осенний период. *Известия ТИНРО*. 2023,203:179–199. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2023-203-179-199>
30. Ковековдова Л.Т., Симоконов М.В., Наревич И.С. Особенности формирования элементного состава морскими ракообразными (*Paralithodes camchaticus*) и (*Chionoecetes opilio*). *Проблемы региональной экологии*. 2022,5:32–38. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2022-5-32-38>
31. Донец М.М., Цыганков В.Ю. Современные уровни загрязняющих веществ в промысловых объектах дальневосточных морей России. *Вестник ДВО РАН*. 2019;4(206):90–103. <https://doi.org/10.25808/08697698.2019.206.4.010>
32. Горбатенко К.М., Мельников И.В. Трофические исследования охотоморской сельди в 2000-е гг. (состав пищи, суточные рационы, оценка выедания кормовых объектов в годовом цикле). *Известия ТИНРО*. 2016,185:185–193. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2016-185-185-193>
33. Пушина О.И., Соломатов С.Ф., Будникова Л.Л., Надточий В.А. Питание и пищевые отношения камбал зал. Петра Великого (Японское море) в летний период. *Известия ТИНРО*. 2012,171:240–266. EDN: WCAMLR
34. Korablina I.V., Barabashin T.O., Katalevsky N.I. Heavy metals in the bottom sediments of the Black Sea northwestern shelf in recent years. *Physical Oceanography*. 2021,28(5):549–566. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2021-5-549-566>
35. Ефимкин А.Я. Питание минтая в Охотском море в весенний и осенний периоды. *Известия ТИНРО*. 2012,171:213–225.
5. Litvinenko A.V., Alekseev M.Y., Danilin D.D., Tsygankov V.Yu. Food safety of salmon from the Euro-Arctic and Sakhalin-Kuril Regions of Russia: Heavy metals in pink salmon. In: Karev V. (ed.) *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes: Proceedings of the 10th International scientific school for young scientists, Moscow, October 18-20, 2024*. Cham: Springer, 2025, p. 271–278. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88459-7_30
6. Moiseenko T.I. Impact of geochemical factors of aquatic environment on the metal bioaccumulation in fish. *Geochemistry International*. 2015,53(3):213–223. <https://doi.org/10.1134/S001670291503009X>
7. Morozov N.P., Petukhov S.A. [Trace elements in commercial ichthyofauna of the World Ocean]. Moscow: Agropromizdat, 1986, 159 p. (In Russ.).
8. Simokon' M.V. [Heavy metals in commercial fishes of Peter the Great Bay in relation to habitat conditions]: abstr. of diss. ... Cand. of Sci. in Biology. Vladivostok: Far Eastern State University; 2003, 24 p. (In Russ.).
9. Zhad'ko E.A., Steblevskaya N.I., Polyakova N.V., Chusovitina S.V. Trace element in tissues of some species of aquatic organisms of Peter the Great Bay. *Nauchnye trudy Dal'rybvtuza = Scientific Proceedings of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2013,30:19–27. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21166395>
10. Kovekovdova L.T., Simokon' M.V., Kiku D.P. Microelemental composition of Far Eastern commercial fishes. *Regional Environmental Issues*. 2013,2:72–75. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19100158>
11. Kovekovdova L.T., Kiku D.P., Kasyanenko I.S. Monitoring of water environment and food safety of commercial objects in the Far East fishery basin (toxic elements). In: *Marine biological research: achievements and perspectives: proceedings of the All-Russian scientific-practical conference with international participation, Sevastopol, Sept. 19–24, 2016*. Sevastopol: EKO-SI-Gidrofizika: 2016, vol. 3, p. 111–114. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27547401>
12. Gamov M.K., Ivanova A.E., Mironova E.K., Tsygankov V.Yu. Heavy metals and arsenic in commercial fish of the Sea of Japan, Sea of Okhotsk, and Bering Sea: Current status (literature review). *Marine Biological Journal*. 2022,7(4):14–30. <https://doi.org/10.21072/mbj.2022.07.4.02>
13. Khristoforova N.K., Tsygankov V.Yu., Boyarova M.D., Luk'yanova O.N. The role of the biogeochemical conditions of the marine environment on the trace element content in pacific salmon. *Achievements in the life sciences*. 2014,8(1):55–60. <https://doi.org/10.1016/j.als.2014.06.009>
14. Litvinenko A.V., Salimzyanova K.R., Khristoforova N.K., Danilin D.D., Tsygankov V.Yu. Gender differ-

References

1. Litvinenko A.V., Khristoforova N.K., Tsygankov V.Yu. Feeding location influence on the heavy metal content in pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*, Salmonidae). *Bulletin of Kamchatka State Technical University*. 2022,62:98–116. (In Russ.). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2022-62-98-116>
2. Antonov N.P., Datsky A.V., Maznikova O.A., Mitenkova L.V. Current state of pacific herring fishery in the Far Eastern seas of Russia. *Fisheries*. 2016,1:54–58. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25911565>
3. Antonov N.P., Kuznetsova E.N. The catch dynamics of main commercial fish species in the Far East seas. *Fisheries*. 2021,1:34–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2021-1-34-41>
4. Monin A.S., Lisitsyn A.P. (eds.). [Biogeochemistry of the ocean]. Moscow: Nauka, 1983, 368 p. (In Russ.).

- ences in the content of trace elements in the organs and tissue of sockeye salmon from the eastern gulfs of Kamchatka peninsula. *Bulletin of Kamchatka State Technical University*. 2023,65:111–122. (In Russ.). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2023-65-111-122>
15. Khristoforova N.K., Tsygankov V.Yu., Boyarova M.D., Lukyanova O.N. Heavy metal contents in the pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum, 1792 from Kuril oceanic waters during anadromous migration. *Russian Journal of Marine Biology*. 2015,41(6):479–484. <https://doi.org/10.1134/S1063074015060085>
 16. Eyrikh S.S., Kolotushkina L.V., Serykh T.G. Content of heavy metals in the muscle tissue of predatory and non-predatory fishes of the Irtysh river. *Bulletin of the Russian Geographical Society*. 2024,2(73):77–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2410-1192-2024-17306>
 17. Yablokov N.O., Anishchenko O.V., Zuev I.V. Distribution of metals in red and white axial muscles of three fish species from the Krasnoyarsk reservoir. *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2019,12(4):430–444. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0310>
 18. Khristoforova N.K., Shul'kin V.M., Kavun V.Ya., Chernova E.N. [Heavy metals in commercial and cultivated molluscs of Peter the Great Bay]. Vladivostok: Dal'nauka, 1993, 296 p. (In Russ.).
 19. Stepanenko E.A., Volkova I.V., Chaplygin V.A., Isaeva E.K. Zinc content in organs and tissues of the Caspian vimba *Vimba vimba persa* (Pallas, 1814). *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*. 2025,1:95–101. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2025-1-95-101>
 20. Converse A., Thomas P. The zinc transporter ZIP9 (Slc39a9) regulates zinc dynamics essential to egg activation in zebrafish. *Scientific Reports*. 2020,10:15673. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72515-4>
 21. Lukina E.A., Dezhenkova A.V. Iron metabolism in normal and pathological conditions. *Clinical Oncohematology. Basic Research and Clinical Practice*. 2015,8(4):355–361. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25223915>
 22. Kodzhakova S.Z. [Biological role of copper in living organisms]. *Novaya nauka: Ot idei k rezul'tatu = New Science: From Idea to Result*. 2016,5–3(84):8–12. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26104564> (In Russ.).
 23. Adam S., Grama A., Mititelu A., Bența G., Pop T.L. Dysregulation of trace elements in pediatric cholestasis: From pathophysiology to nutritional approaches. *International Journal of Molecular Sciences*. 2026,27(6):2710. <https://doi.org/10.3390/ijms27062710>
 24. Lapointe D., Couture P. Accumulation and effects of nickel and thallium in early-life stages of fathead minnows (*Pimephales promelas*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2010,73(4):572–578. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.01.004>
 25. Goyer R.A. Nutrition and metal toxicity. *American Journal of Clinical Nutrition*. 1995,61(3 Suppl):646S–650S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/61.3.646S>
 26. Titov A.F., Kaznina N.M., Karapetyan T.A., Dorshakova N.V. Lead as a contaminant for living things. *Journal of General Biology*. 2020,81(2):147–160. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0044459620020086>
 27. Fazlieva A.S., Usmanova E.N., Daukaev R.A., Karimov D.O., Valova Ya.V., Smolyankin D.A., Baigil'din S.S. Cadmium distribution and metallothionein expression in rat organs following acute intoxication. *Hygiene and Sanitation*. 2020,99(9):1011–1015. (In Russ.). <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-9-1011-1015>
 28. Morozov N.P., Patin S.A., Nikonenko E.M. [Trace elements in water, suspended matter, and aquatic organisms of the Black Sea]. *Geochemistry International*. 1976,9:1391–1399. (In Russ.).
 29. Kuznetsova N.A., Shebanova M.A. Feeding of walleye pollock and its feeding base in the Chukchi Sea in summer-autumn period. *Izvestiya TINRO*. 2023,203(1):179–199. (In Russ.). <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2023-203-179-199>
 30. Kovekovdova L.T., Simokon' M.V., Narevich I.S. The features of the elemental composition formation by marine crustaceans *Paralithodes camchaticus* and *Chionoecetes opilio*. *Regional Environmental Issues*. 2022,5:32–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2022-5-32-38>
 31. Donets M.M., Tsygankov V.Yu. Current levels of pollutants in commercial hydrobionts of the Russian Far Eastern seas. *Vestnik DVO RAN = Vestnik FEB RAS*. 2019,4(206):90–103. (In Russ.). <https://doi.org/10.25808/08697698.2019.206.4.010>
 32. Gorbatenko K.M., Mel'nikov I.V. Trophic studies on the Okhotsk Sea herring in the 2000s (food composition, daily rations, assessment of consumption in the annual cycle). *Izvestiya TINRO*. 2016,185:185–193. (In Russ.). <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2016-185-185-193>
 33. Pushchina O.I., Solomatov S.F., Budnikova L.L., Nadochy V.A. Feeding and food relations of flatfishes in Peter the Great Bay (Japan Sea) in summer season. *Izvestiya TINRO*. 2012,171:240–266. EDN: WCAMLR (In Russ.).
 34. Korablina I.V., Barabashin T.O., Katalevsky N.I. Heavy metals in the bottom sediments of the Black Sea north-western shelf in recent years. *Physical Oceanography*. 2021,28(5):549–566. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2021-5-549-566>
 35. Efimkin A.Ya. Feeding of walleye pollock in the Okhotsk Sea in spring and autumn seasons. *Izvestiya TINRO*. 2012,171:213–225. (In Russ.).

Об авторах

✉ **Шестёра Андрей Александрович**, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории геохимии, ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, shestera.2017@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0001-1217-7423>

Масалева Кристина Руслановна, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории геохимии, ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, masaleva.kr@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0002-6393-8533>

Литвиненко Анна Владимировна, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры экологии, биологии и природных ресурсов, ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет», Южно-Сахалинск, Россия, litvinenko.av@bk.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3423-3860>

Донец Максим Михайлович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии, ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, maksim.donecz@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2108-4448>

Беланов Максим Андреевич, младший научный сотрудник лаборатории геохимии, ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, belanov.ma@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-0974-9176>

Боровкова Александра Дмитриевна, младший научный сотрудник лаборатории геохимии, ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, borovkovasdm@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0007-3285-822X>

Василенко Никита Дмитриевич, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории геохимии, ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, skameika00@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0004-2364-4658>

Болдескул Анна Геннадьевна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии, ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, boldeskul@tigdvo.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9014-2405>

Цыганков Василий Юрьевич, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии, ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, tsig_90@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-5095-7260>

About the Authors

✉ **Shestera, Andrey A.**, Postgraduate Student, Junior Researcher of the Laboratory of Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, shestera.2017@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0001-1217-7423>

Masaleva, Kristina R., Postgraduate Student, Junior Researcher of the Laboratory of Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, masaleva.kr@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0002-6393-8533>

Litvinenko, Anna V., Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology, Biology and Natural Resources, Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, litvinenko.av@bk.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3423-3860>

Donets, Maksim M., Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher of the Laboratory Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, maksim.donecz@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2108-4448>

Belanov, Maksim A., Junior Researcher of the Laboratory Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, belanov.ma@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-0974-9176>

Borovkova, Aleksandra D., Junior Researcher of the Laboratory Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, borovkovasdm@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0007-3285-822X>

Vasilenko, Nikita D., Postgraduate Student, Junior Researcher of the Laboratory Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, skameika00@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0004-2364-4658>

Boldeskul, Anna G., Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher of the Laboratory of Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, boldeskul@tigdvo.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9014-2405>

Tsygankov, Vasiliy Yu., Doctor of Biology, Associate Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, tsig_90@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-5095-7260>

Поступила 03.06.2026

Принята к публикации 22.08.2026

Received 03 June 2026

Accepted 22 August 2026

© Автор, 2026 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author, 2026.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЕ УЧЕНЫЕ

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.3.399-404>
<https://www.elibrary.ru/lgiwiyc>



Инноцентий Константинович Туезов
Фото ИГиГ ДВО РАН.

Инноцентий Константинович Туезов

(25.11.1926 – 06.07.1991)

Наш институт в 2026 году торжественно отмечает 80-летие создания на Сахалине научно-исследовательской базы Академии наук. И с этим событием сочетается знаменательный юбилей – 100-летие со дня рождения Инноцентия Константиновича Туезова, профессора, директора СахКНИИ в период с 1963 по 1969 гг.

Инноцентий Константинович Туезов, директор СахКНИИ, проложивший сахалинским ученым широкий путь в Мировой океан.

Он за короткий срок создал в институте мощный коллектив исследователей, овладевших геофизическими методами изучения глубинного строения земной коры зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану. Под его руководством молодые сахалинские ученые вышли в Мировой океан для решения фундаментальных научных программ по изучению глубинной структуры литосферы дальневосточных окраинных морей и Тихого океана. Его имя неразрывно связано со становлением академической геофизической науки на российском Дальнем Востоке.

Инноцентий Туезов родился 25 ноября 1926 года в Читинской области. Окончив школу, поступил в Ленинградский горный институт. После получения диплома инженера-геофизика был направлен в Туркмению, где участвовал в геофизических исследованиях нефтегазоносных структур.

Затем работал в Западной Сибири в организациях Министерства нефтяной промышленности и Министерства геологии СССР в

должностях начальника партии и экспедиций. С 1957 по 1963 г. работал в Сибирском научно-исследовательском институте гелогии, геофизики и минерального сырья (СНИИГГиМС) Министерства геологии и охраны недр СССР заведующим лабораторией. Подготовил диссертацию на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук и в 1962 г. защитил ее. В этот период он внес большой вклад в разработку методики сейсмической разведки нарушенных сбросами сводов структур юго-западной Туркмении и в решение проблемы изучения потенциально нефтегазоносного второго структурного этажа Западно-Сибирской низменности. С его участием в Западной Сибири впервые были проведены исследования земной коры методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ).

В 1963 г. Постановлением Президиума АН СССР за № 241 от 22 марта из тематики Института изымаются научно-исследовательские работы прикладного назначения с необходимостью проведения фундаментальных исследований. Затем решением Бюро СО АН СССР за № 403 от 27 июня 1963 г. директором СахКНИИ назначается к.г.-м.н.,

опытный геофизик И.К. Туезов. Этим же постановлением лаборатория прикладной геофизики переименована в лабораторию физики Земли, также рекомендовано создать цунами-станцию на о. Шикотан. В 1964 г. были созданы лаборатория цунами и конструкторское бюро по созданию геофизической аппаратуры для морских исследований.

В 1963-1964 гг. в Дальневосточной зоне перехода от Азиатского континента к Тихому океану проводился новый цикл работ по ГСЗ силами Института физики Земли АН СССР (ИФЗ) СахКНИИ СО РАН при поддержке специалистами Сахалинского и Приморского геологических управлений. Целью работ являлось углубленное изучение строения земной коры и расширение площади рекогносцировочных исследований в охотоморском регионе. Подготовка работ по ГСЗ в 1964 г. проведена при участии И.К. Туезова и М.Х. Лившица (СахКНИИ).

Сотрудники СахКНИИ осуществляли наземную регистрацию морских взрывов, оказывали помощь при работе в море и самостоятельно провели часть морских работ в 1964 г. Научным руководителем наземной экспедиции был М.Х. Лившиц, начальни-

ком экспедиции – П.М. Сычев (СахКНИИ). В камеральных работах принимали участие не менее 12 сотрудников Института. В итоге проведено ГСЗ на профилях протяженностью свыше 6000 км, усовершенствована методика интерпретации характера сейсмических волн на море. В результате интерпретации сейсмических данных получены сейсмические разрезы по профилям, охарактеризованы площадные схемы рельефа основных сейсмологических границ, дана их геологическая интерпретация. На продолжении ряда морских профилей в дальнейшем СахКНИИ провел наземные сейсмические работы в Приморье и на Сахалине.

По инициативе И.К. Туезова стали проводиться морские экспедиции на арендованных судах. В 1963-1964 гг. на судах ВМФ проводились сейсмометрические исследования в Охотоморском регионе совместно с ИФЗ. В 1965-66 гг. на судах «Нельма», «Агата», «Уруп» проведены гидромагнитные съемки на акваториях зал. Простор (о. Итуруп), северной части Японского моря. В 1967 г. в Японском море на э/с «Витязь» осуществлены геолого-геофизические работы (отбор донных осадков, эхолотирование, сейсмопрофилирование, гра-



Ученый совет СахКНИИ. Выступает М.Х. Лившиц с докладом о сейсмических исследованиях в зоне перехода от континента к океану. Четвертый слева в президиуме – И.К. Туезов. 1964 г.
Фото из архива ИМГиГ ДВО РАН

виметрия). В 1968 г. на м/б «Старательный» сотрудниками СахКНИИ проведена комплексная геофизическая экспедиция в южной части Курильской гряды, а затем гидромагнитная экспедиция в западной части Алеутских островов, на возвышенности Обручева. На этом же судне в 1969 г. Институт провел первую заграничную экспедицию в Филиппинском и Восточно-Китайском морях вблизи островной дуги Рюкю (магнитно-гравиметрические исследования, геотермия, эхолотирование).

Дальнейшие морские экспедиции были продолжением выполнения программ исследования глубинного строения литосферы окраинных морей и Тихого океана, запланированных И.К. Туезовым.

С приходом Иннокентия Константиновича к руководству Институтом основным направлением исследований стало изучение состава и условий формирования земной коры в области перехода от Азиатского континента к Тихому океану, но постоянно поддерживались работы по установлению условий возникновения землетрясений, распространению волн цунами, оперативному прогнозу их возникновения. Продолжалось выяснение особенностей островных почв, изучение флоры и фауны о. Сахалин и Курильских островов. Разрабатывались схемы развития и размещения производительных сил области. Институт по объему научных программ был подобен Малой Академии наук.

По инициативе Института, поддержанной областными партийным и хозяйственным руководством, Отделение наук о Земле Президиума АН СССР принимает решение о проведении в 1965 г. выездной сессии Отделения на о. Сахалин с целью ознакомления научной общественности страны с научными разработками геологического, геофизического, биологического и географического направлений в Дальневосточном регионе. На Сессии, работавшей по 12-ти секциям, было заслушано и обсуждено более 100 докладов по проблемам наук о Земле и определены основные направления глобальных научных исследований:

- проблема строения земной коры и верхней мантии в зоне перехода Евро-Азиатского континента к Тихому океану;

- проблема структуры и истории геологического развития Дальнего Востока СССР и вопросы их освоения;

- биологические аспекты использования природных ресурсов и преобразование природы Востока СССР.

Эти направления на многие годы определили планирование научно-исследовательских работ в Институте.

Учитывая необходимость укрепления гидрофизического и палеонтологического направлений в работе Института, согласно Постановлению Президиума АН СССР от 20 мая 1967 г., были созданы лаборатории гидроакустики и биостратиграфии, которые возглавили кандидаты наук В.А. Апанасенко и Л.С. Жидкова. В этом же году был выпущен Атлас Сахалинской области, ставший основным источником справочного материала по вопросам всей деятельности Сахалинской области. В 1969 г. Институт приступил к формированию электронно-вычислительного центра.

С 1969 г. И.К. Туезов, оставив пост директора Института, возглавил сейсмометрические исследования, стал организатором и руководителем морских сейсмометрических работ. В 1973 г. была организована Охотоморская экспедиция на НИС «Пегас» (рейс 4) в зал. Терпения, Южно-Охотской впадине и на шельфе о. Хоккайдо. Были проведены региональные сейсморазведочные работы методом обменных волн (МОВ) с целью изучения геологического строения коры зал. Терпения (по договору с СахТГУ), осуществлено комплексное изучение глубинного строения, состава и развития верхней части литосферы Южно-Охотской впадины и северного шельфа о. Хоккайдо, испытана аппаратура для сейсмических исследований, проведено совершенствование методики геофизических исследований. Выполнено 7010 км эхолотного промера, более 4800 км сейсмического промера, 10270 км гравиметрических наблюдений, более 10270 км магнитометрических измерений. На заседании научно-технического Совета СахТГУ (06.11.1973 г.) постановили одобрить результаты проведенных исследований в зал. Терпения в связи с важными результатами по оценке перспектив



Научная команда в Охотоморской экспедиции на НИС «Пегас», рейс 4, 1973 год.
Справа стоит И.К. Туезов. Фото из личного архива О.В. Веселова.

нефтегазоносности этого участка моря, считать нужным продолжить с СахКНИИ исследования проведенным комплексом методов. По решению заседания геофизической секции Ученого совета СахКНИИ (17.10.1973 г.) экспедиционные работы Охотоморской экспедиции под руководством И.К. Туезова признаны успешными.

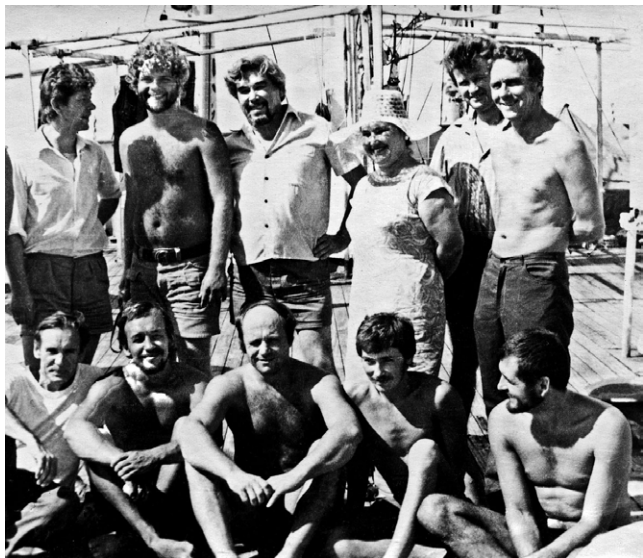
Освободившись от многих административных нагрузок, Иннокентий Константинович сосредоточился на анализе накопившегося объема геофизических данных по дальневосточной зоне перехода, в первую очередь сейсмических, полученных при его участии и содействии. В итоге он подготовил и в 1973 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук «Строение земной коры северо-западного сектора зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану (в свете геофизических данных)».

Слабая геолого-геофизическая изученность западной части Тихого океана привлекала внимание ведущих научных организаций Тихоокеанского бассейна. США проводили глубоководное бурение, формировали международные проекты по совместному изучению геологического строения океана различными

методами. Одним из таких проектов была программа «Long-Shot», к выполнению которой были приглашены советские геофизики.

По рекомендации Океанографической комиссии Президиума АН СССР И.К. Туезов подготовил программу исследования района подводного поднятия Неккер и ряда других объектов западной части Тихого океана и принятия участия в программе «Long-Shot». Исследования были проведены на НИС «Пегас» в 7-м научном рейсе с ноября 1975 по март 1976 года. Начальником экспедиции и научным руководителем был И.К. Туезов, капитаном – Ю.И. Кривенчев. В составе экспедиции были отряды: сейсмические (2), гравиметрический, геологический, гидрографический, магнитно-геотермический. В числе участников были сотрудники ИФЗ АН СССР, Геологического института АН СССР, Всесоюзного НИГРНИ Министерства геологии АН СССР, а также два геофизика США – Б. Гибсон, М. Хьюстон.

В итоге проведены исследования: гравиметрические (17697 км), магнитометрические (13020 км), эхолотный промер (18588 км), сейсмопрофилирование (4459 км), драгирование (19), отбор грунта геологическими трубками (6), исследованы две крупные широтные



Тихоокеанская экспедиция на НИС «Пегас», рейс 7, 21.11.1975–19.03.76 гг. Третий слева стоит И.К. Туезов.
Фото из личного архива О.В. Веселова.

зоны длиной около 1000 миль каждая, участки дна вблизи Соломоновых островов и вала Капінгамаранги, детализировано строение дна Меланезийской котловины.

По итогам анализа сейсмических данных и материалов драгирования сделан вывод о вулканическом происхождении подводных гор Маркус-Уэйк. Цели Тихоокеанской экспедиции признаны выполненными с рекомендацией более широко применять сейсмопрофилирование.

Иннокентий Константинович был одним из ведущих научных авторитетов в сфере создания контактов с зарубежными коллегами, формирования сотрудничества с японскими учеными с целью изучения глубинного строения литосферы дальневосточной зоны перехода от континента к океану. При его инициативе и непосредственном участии были проведены советско-японские симпозиумы по проблемам геодинамики и вулканизма: первый – в Находке (1970 г.), второй – в Японии (1975), третий – в Южно-Сахалинске (1976).

Иннокентий Константинович был очень доброжелательным человеком с высокой нравственной культурой. Он обладал широким диапазоном геолого-геофизических знаний, активно поддерживал творческую инициативу молодых ученых не только в проведении

научных исследований, но и в общественной жизни Института. Он поддержал инициативу Совета молодых ученых создать молодежный клуб «Эврика», проведение творческих вечеров с сотрудниками ряда организаций г. Южно-Сахалинска. Приезжающая на Сахалин творческая интеллигенция нередко посещала СахКНИИ. В гостях у нас были Лев Ошанин, Владимир Шаинский.

В Институте выпускалась стенгазета «За науку», в которой представлялись результаты многочисленных экспедиций, итоги конференций, заметки о жизни лабораторий. Газета была прекрасно иллюстрирована, полна юмора и сатиры, печатались стихи сотрудников, в большинстве очень впечатляющие.

И.К. Туезов сам участвовал во многих общественных мероприятиях, в том числе и субботниках.

Работа, научная и педагогическая деятельность И.К. Туезова в Институте – один из самых ярких периодов в истории СахКНИИ.

В 1978 г. по приглашению академика Ю.А. Косыгина, директора Института тектоники и геофизики (ИТиГ) ДВНЦ АН СССР, И.К. Туезов переехал в г. Хабаровск. В ИТиГ он возглавил лабораторию глубинной геофизики, а затем отдел. Под его руководством проведены геофизические исследования глубинного строения континентальной части востока России, в частности зоны БАМ, рудных районов Хабаровского края. Он умело сочетал



На субботнике. Слева на переднем плане И.К. Туезов.
Фото из личного архива О.В. Веселова.

фундаментальные исследования с запросами производственных организаций. В 1980 г. ему присвоено звание профессора, а в 1986 – звание Заслуженного деятеля науки РСФСР.

Велика заслуга И.К. Туезова в подготовке научных и инженерных кадров. Многие его ученики и последователи до сих пор трудятся в научных и производственных организациях России, с благодарностью вспоминая его участие в их жизни.

Заслуги Иннокентия Константиновича в развитии геофизики на Дальнем Востоке отмечены правительственными наградами – орденом «Знак Почета» медалями «За доблестный труд (За воинскую доблесть)». В ознаменование 100-летия со дня рождения Владимира Ильича Ленина», «За строительство Байкало-Амурской магистрали», а также рядом ведомственных наград.

И.К. Туезовым опубликовано более двухсот научных работ, в том числе 5 монографий, лично и в соавторстве. Основные монографические труды И.К. Туезова:

Аномальные гравитационные поля дальневосточных окраинных морей и прилегающей части Тихого океана / А.Г. Гайнанов, Ю.А. Павлов, П.А. Строев, П.М. Сычев, И.К. Туезов / Отв. ред. П.М. Сычев. Новосибирск: Наука (Сибирское отделение), 1974. 108 с.

Туезов И.К. Литосфера Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода. Новосибирск: Наука (Сибирское отделение), 1975. 232 с.

Туезов И.К., Веселов О.В., Липина Е.Н. Тепловой поток Запада Тихого океана, Востока Азии и Австралии / Отв. ред. Ю.А. Косыгин. - Владивосток: ИМГиГ ДВНЦ АН СССР, 1984. 150 с.

Туезов И.К. Геотермическая структура литосферы и астеносферы Азиатско-Тихоокеанской зоны сочленения и прилегающих частей Азии и Тихого океана. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. 107 с.

Туезов И.К., Епанешников В.Д., Хакаява М. Геотермия. Региональные проблемы. Моделирование. Практическое приложение. Москва: Недра, 1995. 301 с.

Веселов Олег Васильевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности. Автор глубоко признателен И.П. Кремневой за помощь в оформлении статьи.

© Авторы, 2026 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

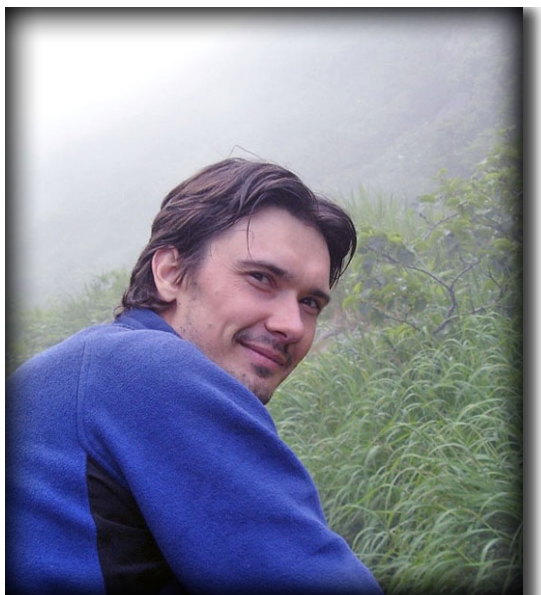


© The Authors, 2026.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЕ УЧЕНЫЕ ПОТЕРИ НАУКИ

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.3.405-408>

<https://www.elibrary.ru/xytowj>



Восхождение на вулкан Синарка
(о. Шиадокотан, Северные Курилы), 2008 г.

Рафаэль Владимирович Жарков

(09.09.1980 – 09.08.2026)

Исследователь вулканов и гидротерм Курильских островов и Сахалина

Неожиданная болезнь оборвала жизнь нашего товарища. 9 августа 2026 г. ушел из лаборатории вулканологии и вулканопасности ИМГиГ ДВО РАН и из жизни Рафаэль Владимирович Жарков – вулканолог, кандидат географических наук, ведущий специалист по термальным и минеральным водам, современному вулканизму. Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН и Дальневосточная наука понесли тяжелую, невосполнимую потерю. Вот каким запомнили его коллеги.

Рафаэль (в общении с ним обходились без отчества) был не просто рядовым исследователем, а человеком, который жил своей работой, всецело погружаясь в неё, отдавая ей все свои силы, творчески увлекая ею своих коллег и окружающих молодых ученых. Свою научную деятельность и в значительной мере жизнь он посвятил изучению вулканизма Курильской островной дуги, термальных и минеральных источников, грязевого вулканизма Сахалина.

В институт Рафаэль был принят в 2001 г. на должность лаборанта-исследователя, будучи студентом 4-го курса географического факультета СахГУ. Впоследствии он быстро прошел путь до ведущего научного сотрудника, кандидата географических наук. Еще будучи студентом он увлекся научной деятельностью, активно участвовал в многочисленных экспеди-

циях ИМГиГ ДВО РАН по всей Сахалинской области. Полевые работы, являющиеся неотъемлемой частью геологических и вулканологических исследований, всегда были для Рафаэля увлекательным, творческим процессом, который воспринимался им с большим энтузиазмом и любовью.



На вулкане Иван Грозный (о. Итуруп, Южные Курилы), 2003 г.

В 2003 г. он получил студенческий грант ДВО РАН, на который была организована экспедиция на Южные Курильские острова: изучение термальных вод вулканов Чирип и Баранского (о. Итуруп), Руруй, Менделеева и Головнина (Кунашир). В этом же году окончательно определившись с вектором научной работы, он поступил в аспирантуру ИМГиГ ДВО РАН по специальности 25.00.04 «Петрология, вулканология», выбрав в качестве основного объекта термальные источники Курильских островов и Сахалина. Результаты исследований были представлены в кандидатской диссертации «Типы термальных вод Южных Курил и севера Сахалина и их влияние на окружающие ландшафты», которая была успешно защищена в 2008 г. в Институте водных и экологических проблем ДВО РАН в г. Хабаровске.

В 2006–2008 гг. принимал активное участие в экспедициях «Курильского биокомплексного проекта», где исследовал проявления современной сольфатарно-гидротермальной деятельности вулканов Заварицкого, Горящая сопка, Синарка, Ушишир на Средних и Северных Курилах, в том числе на труднодоступных и малоизученных островах. Эти работы, проводившиеся в рамках реализации международного комплексного проекта и объединившие усилия археологов, вулканологов, палеогеографов и других специалистов, стали знаковым этапом в изучении Курильских островов, так как проводились на островах, не обследованных учеными десятки лет, и заложили фундамент для последующих исследований.

Он был постоянным участником полевых работ по изучению последствий извержений вулканов Пик Сарычева (2009 г.), Экарма (2010 г.), Иван Грозный (2012–2013 гг.). За 25 лет работы в ИМГиГ ДВО РАН (2001–2026 гг.) Рафаэль ежегодно участвовал в полевых работах, часто сам организовывал экспедиции на Курильские острова и в труднодоступные районы Сахалина.

В последние годы Рафаэль, с помощью установленной видеоаппаратуры, организовал видеомониторинг грязевулканической активности на Пугачевском и Южно-Сахалинском вулканах. Это позволило ему в 2025–2026 гг.

впервые зафиксировать и отследить извержение Пугачевского грязевого вулкана. Этому объекту он уделял особое внимание, считая его наиболее значимым, возлагал на него большие планы, считая природным научным полигоном, идеально подходящим для отработки различных видов геолого-геофизических методов исследований. В июне 2026 г. Р. Жарковым была организована комплексная геолого-геофизическая экспедиция, ставившая целью объединение специалистов различного профиля по изучению этого уникального, динамичного объекта.

За время работы в институте Рафаэлем были опубликованы десятки научных статей и несколько глав в коллективных монографиях. В 2014 г. им была издана монография «Термальные источники Южных Курильских островов» (Владивосток: Дальнаука, 2014), которая до сегодняшнего дня является наиболее фундаментальным описанием термальных источников Курильской островной дуги. В ней, кроме физико-химических особенностей термальных вод региона, на основе которых автором выделено тринадцать гидрохимических типов по кислотности, газовому и химическому составам, рассматриваются вопросы современного рационального использования термальных вод в социально-экономической



Монография «Термальные источники Южных Курильских островов», изданная в 2014 г.

деятельности региона. Особый акцент делается на перспективах развития рекреации и туризма на базе термальных проявлений Южных Курильских островов. Он также является соавтором коллективной монографии «Газогидротермы активных вулканов Камчатки и Курильских островов: состав, строение, генезис» (Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013), в которой отражены результаты комплексных геолого-геохимико-геофизических методов исследования гидротерм различного состава.

Он неоднократно выступал с докладами на всероссийских и международных конференциях (всего более 30), возглавлял различные научные проекты. С 2003 по 2016 г. он руководил грантами ДВО РАН, РФФИ (2013–2015 гг.) и Правительства Сахалинской области для молодых ученых. В 2013–2017 гг. был во главе научных коллективов по госконтрактам, в том числе по созданию реестра рекреационных ресурсов для Министерства здравоохранения Сахалинской области.

Рафаэль также запомнился своей активной жизненной позицией, заинтересованностью в решении социальных вопросов в Институте и за его пределами. Как председатель Совета молодых ученых ИМГиГ ДВО РАН он «ускорил» введение в Институте системы персональных стимулирующих надбавок к

зарплате для молодых ученых. Р. Жарков был председателем Совета молодых ученых и специалистов Сахалинской области (2010–2012), членом научно-экспертного совета при Правительстве Сахалинской области (2010–2020). По его инициативе были внесены поправки в соответствующие Положения о получении жилищных сертификатов в Сахалинской области, касающиеся категории «молодые ученые». А еще была инициирована грантовая система Правительства Сахалинской области для молодых ученых, которая до недавнего времени позволяла островным специалистам реализовывать свои собственные научные проекты, при этом результаты исследований имели важное значение для Сахалинской области (в последние годы этот грантовый конкурс не проводится). Связывая это с сегодняшним днем, стоит отметить: тогда был создан задел, и сейчас основной поток публикаций ИМГиГ ДВО РАН дают научные сотрудники, которым адресовались эти меры поддержки.

Рафаэль активно участвовал в работе профессиональных обществ: был заместителем председателя Сахалинского областного отделения Русского географического общества (2010–2020). В 2011 году организовал и провел молодежный научный симпозиум «Современные научные исследования на Дальнем Востоке»



Обсуждения и вопросы после научно-популярной лекции, посвященной термальным источникам Сахалина и Курильских островов.

(г. Южно-Сахалинск). Всегда активно популяризировал научные знания, выступая с докладами по вулканологической тематике в школах, библиотеках и музеях.

В 2009 г. по его инициативе была организована полевая вулканологическая экскурсия на о. Кунашир, проходившая в формате научной школы и собравшая молодых ученых из институтов ДВО РАН и университетов. В 2009–2014 и в 2019 г. по совместительству преподавал в СахГУ дисциплины «Физическая география Сахалинской области», «Краеведение», «Ландшафтоведение», «Природные катастрофы Сахалинской области». Повышал квалификацию: стажировался по гидрогеохимии в Томске, уча-

ствовал в международных вулканологических школах на Камчатке и Хоккайдо, прошел обучение по управлению инновациями в ДВФУ.

Рафаэль всегда щедро делился опытом с молодыми коллегами, оказывал всестороннюю поддержку. Он был ярким, успешным ученым, талантливым и пытливым исследователем Сахалина и Курильских островов.

Скоропостижный уход Рафаэля – тяжелая, невосполнимая утрата для семьи, друзей, коллег и всего научного сообщества. Мы всегда будем помнить его целеустремленным, смелым, харизматичным и отзывчивым человеком, чьи энтузиазм и преданность делу вдохновляли всех окружающих.

Коллеги, друзья, близкие.

(Подготовили к печати А.В. Дегтерев, И.П. Кремнева, П.Ю. Ковтунович, Л.М. Богомолов, Д.Н. Козлов).



Процесс отбора термальных вод на о. Кунашир, 2025 г.



Установка камеры для видеомониторинга на Пугачевском грязевом вулкане, 2025 г.



Исследования гидротерм вулкана Менделеева на о. Кунашир, 2025 г.