

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 (ядро 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 (*Geology and Mineralogy*)
- 1.6.3. Petrology and volcanology (*Geology and Mineralogy*)
- 1.6.9. Geophysics (*Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics*)
- 1.6.14. Geomorphology and Paleogeography (*Geography*)
- 1.6.17. Oceanology (*Geography; Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics*)
- 1.6.20. Geoinformatics and cartography (*Physics and Mathematics*)
- 1.6.21. Geoecology (*Geography; Geology and Mineralogy*)
- 1.5.15. Ecology (*Biology*)
- 1.1.8. Mechanics of deformable solids (*Physics and Mathematics; 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, 2025

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

- **Адушкин Виталий Васильевич**, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, Институт динамики геосфер РАН; Московский физико-технический институт, Москва
- **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 космических 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
- **Ребetsкий 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

- **Vitaly V. Adushkin**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Geosphere Dynamics of the RAS; Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow
- **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
- **Ярмолук 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

Редактор к.ф.н. **Низяева Галина Филипповна**
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. 18.6.
 Тираж 150 экз. Заказ 8076. Свободная цена.
 Дата выхода в свет 25.12.2025.

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

Translator Anastasiya D. Chera

Editor **Galina Ph. Nizyaeva**, Cand. Sci. (Phylogeny)
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 18.6.
 Number of copies 150. Order no. 8076. Free price.
 Date of publishing 25.12.2025.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

Геотектоника и геодинамика. Геофизика

Л.А. Сим, Н.А. Гордеев, Н.А. Сычева. Неотектонические и современные напряжения Степного Крыма 345

Океанология. Гидрогеохимия

М.И. Горбов, П.А. Салюк, А.Н. Павлов, Г.П. Гаревских. Анализ зависимости показателя ослабления подводной фотосинтетически активной радиации от концентрации хлорофилла-а и окрашенных растворенных органических веществ в отдельных районах залива Петра Великого 361

Океанология. Геоморфология и палеогеография

В.М. Кайстренко, П. Виллис, Н.Г. Разжигаева, Л.А. Ганзей, Г.В. Шевченко, Ю.П. Королёв. Землетрясение и цунами 4(5) октября 1994 года на побережье Южных Курильских островов (взгляд 30 лет спустя) 370

Геоморфология и палеогеография

Н.Н. Назаров. Гидролого-морфологический подход при установлении верхней (речной) границы устьевой области реки 387

Геоэкология. Геохимия

И.В. Брагин, Г.А. Челноков, В.Ю. Лаврушин, А.А. Павлов, Б.И. Челнокова, Н.А. Харитонова. Современное состояние источников и генетическое разнообразие углекислых минеральных вод Приморского края 398

Геоинформатика и картография

Ю.И. Сенкевич, М.А. Мищенко. Определение оптимальной длительности временного окна для выделения аномалий акустической эмиссии перед сильными землетрясениями на Камчатке 410

С.А. Имашев, Р.Р. Нигматуллин. Разделение взрывов и землетрясений по информативным характеристикам сейсмического сигнала на основе методов машинного обучения 420

Механика деформируемого твердого тела

Л.Ю. Левин, М.А. Семин, А.Н. Вишиков, И.А. Пантелеев, С.А. Бублик, М.В. Угольников, Д.В. Ложкин, О.А. Плехов. Экспериментальное исследование закономерностей тепло-массопереноса во влажном засоленном песке при осевом замораживании 439

Петрология, вулканология. Геохимия

А.И. Мальшев, Л.К. Мальшева. Водно-осажденная сера вулканов Головинина и Менделеева (остров Кунашир, Южные Курильские острова, Россия) 452

ЭКСПЕДИЦИИ И ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

А.В. Дегтерев, Ф.А. Романюк. Полевые исследования ультракислых термальных источников «Голубые озера» на вулкане Баранского (о. Итуруп, Южные Курильские острова) в 2025 г. 478

ЭКСПЕДИЦИИ И ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

Н.К. Самаркина, А.Б. Ермолинский, М.Л. Зверева, В. Бутрис, А.А. Нуждаев, С.Б. Григорьева, Р.А. Кузнецов, Ю.А. Титов. Полевые работы в бухте Крашенинникова и на хребте Карпинского (остров Парамушир, Северные Курильские острова) в 2025 году 485

От редакции

Тематический и авторский указатели статей, опубликованных в журнале «Геосистемы переходных зон» в 2025 г. (том 9) ... 495

Geotectonics and geodynamics. Geophysics

L.A. Sim, N.A. Gordeev, N.A. Sycheva. Neotectonic and modern stresses of Steppe Crimea 345

Oceanology. Hydrogeochemistry

M.I. Gorbov, P.A. Salyuk, A.N. Pavlov, G.P. Garevskikh. Dependence of the diffuse attenuation coefficient for underwater photosynthetically active radiation on chlorophyll-a and colored dissolved organic matter in Peter the Great Bay 361

Oceanology. Geomorphology and Paleogeography

V.M. Kaistrenko, P. Willis, N.G. Razjigaeva, L.A. Ganzey, G.V. Shevchenko, Yu.P. Korolev. Earthquake and tsunami of October 4(5), 1994, on the coast of the Southern Kuril Islands (a look 30 years later) 370

Geomorphology and Paleogeography

N.N. Nazarov. Hydrological and morphological approach to establishing the upper (river) boundary of the river mouth area 387

Geoecology Geochemistry

I.V. Bragin, G.A. Chelnokov, V.Yu. Lavrushin, A.A. Pavlov, B.I. Chelnokova, N.A. Kharitonova. Current state of springs and genetic diversity of high PCO₂ mineral waters of Primorsky Krai 398

Geoinformatics and cartography

Yu.I. Senkevich, M.A. Mishchenko. Searching the optimal time window duration for detecting acoustic emission anomalies preceding major earthquakes on Kamchatka 410

S.A. Imashev, R.R. Nigmatullin. Discrimination between explosions and earthquakes based on informative seismic signal features using machine learning methods 420

Mechanics of deformable solids

L.Y. Levin, M.A. Semin, A.N. Vshivkov, I.A. Panteleev, S.A. Bublik, M.V. Ugolnikov, D.V. Lozhkin, O.A. Plekhov. Experimental study of heat and mass transfer in moist saline sand under axial freezing 439

Petrology and volcanology. Geochemistry

A.I. Malyshev, L.K. Malysheva. Water-deposited sulfur of Golovnin and Mendeleev volcanoes (Kunashir Island, Southern Kuril Islands, Russia) 452

EXPEDITIONS AND FIELD STUDIES
SHORT REPORT

A.V. Degterev, F.A. Romanyuk. Field study of the ultra-acidic thermal springs «Blue Lakes» on Baransky volcano (Iturup Island, Southern Kuril Islands) in 2025 478

EXPEDITIONS AND FIELD STUDIES
SHORT REPORT

N.K. Samarkina, A.B. Ermolinskiy, M.L. Zvereva, V. Butris, A.A. Nuzhdaev, S.B. Grigorieva, R.A. Kuznetsov, Yu.A. Titov. Fieldwork in Krashenninnikov Bay and the Karpinsky Ridge (Paramushir Island, Northern Kuril Islands) in 2025 485

From the Editorial Office

Topical index of articles published in the journal «Geosystems of Transition Zones» in 2025 (volume 9) 495

© Авторы, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.24

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.345-360>
<https://www.elibrary.ru/gwpjldq>

Неотектонические и современные напряжения Степного Крыма

Л. А. Сим, Н. А. Гордеев[@], Н. А. Сычева[@]

^{@E-mail:} gord@ifz.ru; ivtran@mail.ru

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Резюме. В статье приведены данные о новейшей тектонике и сейсмичности Крымского полуострова. С использованием двух версий структурно-геоморфологического метода: мануального варианта и версии с программным обеспечением SimSGM – охарактеризовано новейшее напряженное состояние Степного Крыма и прилегающих территорий в связи с современной сейсмичностью полуострова. Выделены участки развития трещиноватости отрывного и сколового типов. Поле напряжений характеризуется сдвиговым типом с ориентировкой оси сжатия преимущественно северо-восточного направления и наименее проявленным сжатием северо-западного простирания. Рельеф и его основные особенности выражаются в виде неоднородностей с ортогональным простиранием для Степного Крыма и диагональным – для Горного Крыма. Полученные данные о распространении сколового и отрывного типов мегатрещин и сейсмичности необходимы для понимания развития опасных геологических процессов, а также полезны при проектировании гражданских сооружений и поиске рудных и нефтяных месторождений, поскольку блоки с отрывными трещинами более флюидопроницаемы и подвержены более интенсивному разрушению. Слабая сейсмическая активность, по-видимому, связана: во-первых, с малым количеством сейсмостанций, во-вторых, с разгрузкой накапливаемых в коре напряжений в акватории Черноморского бассейна.

Ключевые слова: Степной Крым, Крымский полуостров, неотектонические и современные напряжения, разломная тектоника, структурно-геоморфологический метод, программа SimSGM

Neotectonic and modern stresses of Steppe Crimea

Lidiya A. Sim, Nikita A. Gordeev[@], Nayla A. Sycheva[@],

^{@E-mail:} gord@ifz.ru; ivtran@mail.ru

Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Russia

Abstract. This article presents data on the neotectonics and seismicity of the Crimean Peninsula. Using two versions of the structural-geomorphological method – a manual version and a version with the SimSGM software – the neotectonic stress state of Steppe Crimea and adjacent territories was characterized in relation to the peninsula's current seismicity. Areas of fracture concentration of the tension and shear types were identified. The results show that the stress field is characterized by a strike-slip pattern, with a predominantly northeast-oriented compression axis and the least pronounced northwest-trending compression. The relief and its main features are expressed as heterogeneities with an orthogonal strike for Steppe Crimea and a diagonal strike for Mountainous Crimea. The obtained data on the distribution of shear and tension megafractures and seismicity are essential for understanding the formation of hazardous geological processes and are also useful in the design of civil structures and the exploration of ore and oil deposits, as blocks with tension fractures are more fluid-permeable and subject to more intense failure. The low seismic activity is likely due to, firstly, the small number of seismic stations and, secondly, the release of accumulated crustal stresses in the Black Sea basin.

Keywords: Steppe Crimea, Crimean Peninsula, neotectonic and modern stresses, fault tectonics, structural-geomorphological method, SimSGM program

Для цитирования: Сим Л.А., Гордеев Н.А., Сычева Н.А. Неотектонические и современные напряжения Степного Крыма. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 4, с. 345–360. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.345-360>; <https://www.elibrary.ru/gwpjddq>

For citation: Sim L.A., Gordeev N.A., Sycheva N.A. Neotectonic and modern stresses of Steppe Crimea. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 4, pp. 345–360. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.345-360>; <https://www.elibrary.ru/gwpjddq>

Финансирование

Работа выполнена в рамках госзадания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН на 2025–2027 гг. (FMWU-2025-0036, «Создание тектонофизической и геомеханической моделей коры и литосферы Крыма и Северного Причерноморья»).

Funding

The study was carried out within the framework of the state task of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences for 2025–2027 (FMWU-2025-0036, “Creation of tectonophysical and geomechanical models of the crust and lithosphere of Crimea and the Northern Black Sea region”).

Введение

Основанием Степного (равнинного) Крыма является молодая платформа, установленная М.В. Муратовым и названная им Скифской [1]. Новейший тектонический этап в равнинном Крыму начался в позднем олигоцене – раннем миоцене с накоплением глинистых толщ майкопской серии. Уже в это время существовали основные поднятия и прогибы, так как мощности пород этой серии различны в северной и восточной частях района и существенно отличаются от малых мощностей в центральной и южной частях. При этом основной импульс движений приходится на плиоцен-четвертичное время.

Разломной тектонике Крымского полуострова посвящены многочисленные работы [2–4 и др.]. Неотектоника района описана нами преимущественно по работам [5, 6], согласно которым в новейшей структуре равнинного Крыма выделяются четыре субширотные (точнее, ВСВ простирания) ступени – блоки. С севера на юг это Тарханкутско-Джанкойский, Новоселовский, Каламитско-Арабатский и Горно-Крымский блоки. Блоки разделены крупными линеаментами – разломами, которые хорошо дешифрируются как по топографической основе, так и на космических снимках. Исследователями названы разломы Каркинитско-Сивашский, Донузлавский, Евпаторийско-Нижнегорский и Луккульско-Каменский.

Каркинитско-Сивашский разлом ограничивает Крымский п-ов с запад-северо-за-

пада и отделяет крымские структуры от Восточно-Европейской платформы, он идеально совпадает с разломом, выделенным в работе [2]. Южнее Тарханкутско-Джанкойский блок ограничен крупным разломом субширотного простирания, который разделен на два сегмента. Западный сегмент – Донузлавский, восточный – Джанкойский. Вдоль Донузлавского разлома В.В. Гордиенко с соавторами отметили повышенный тепловой поток [7]. Все разломы подтверждаются геологическими и геофизическими данными [6], при этом в работе [2] выделена только Донузлавская часть разлома. Необходимо отметить, что между Каркинитско-Сивашским и Донузлавским разломами сейсмическими станциями в 1972–2023 гг. зафиксированы слабые землетрясения [8]. В Тарханкутско-Джанкойском блоке в центральной части выделяется сложно построенное Тарханкутское поднятие, а в восточной части блока выделен Сивашский прогиб. Значительную часть Новоселовского блока занимает Новоселовское поднятие. От Новоселовского блока Каламитско-Арабатский блок отделяет Евпаторийско-Нижнегорский разлом. Каламитско-Арабатский блок с юго-востока отделен от Горного Крыма Луккульско-Каменским разломом. Это наиболее южный блок Степного Крыма. В его пределах центральную часть блока занимает крупное Симферопольское поднятие, на западе выделен Альминский прогиб, а на востоке – Индоло-Кубанский прогиб. Вдоль юго-западной границы Крымского п-ова в море отчетливо

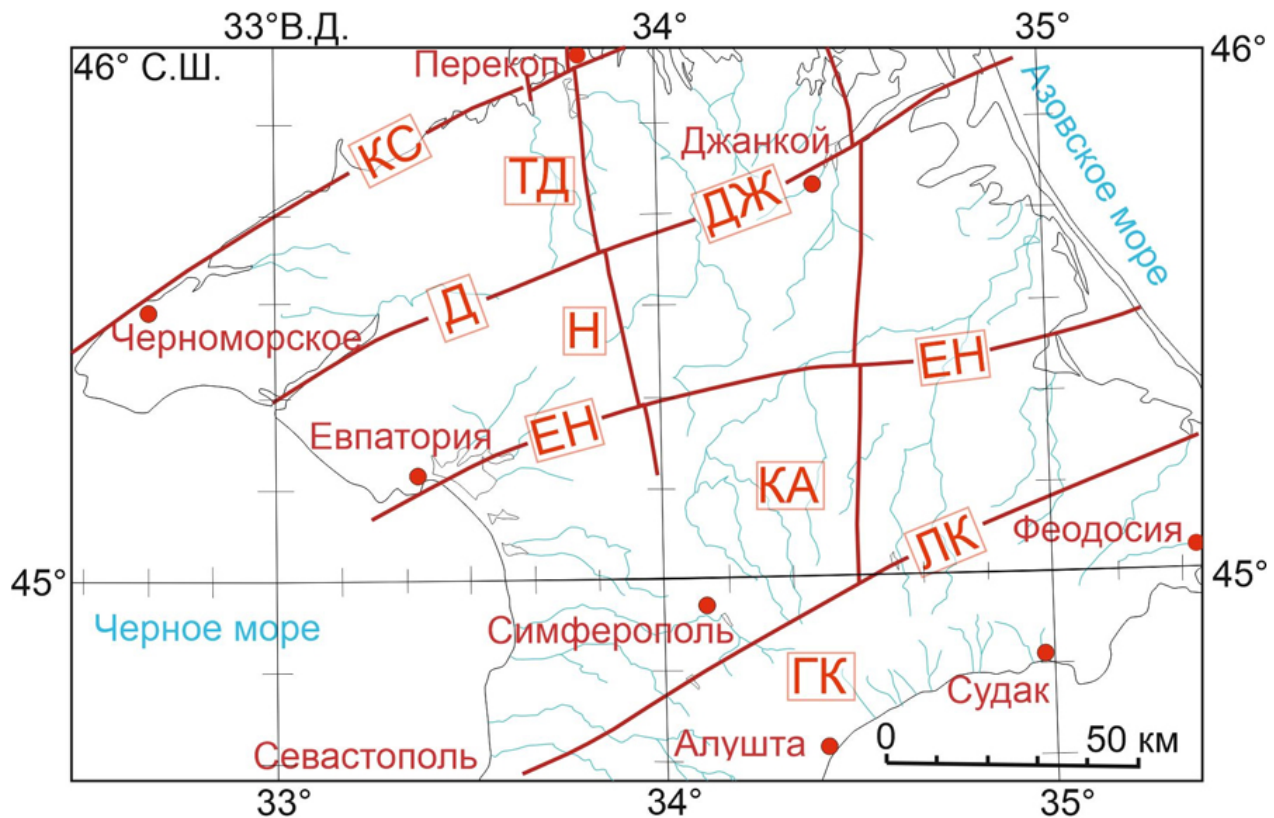


Рис. 1. Схема районирования разломов и отделяемых ими тектонических блоков [6, рис. 2 с упрощениями]. Красные линии – региональные разломы: КС – Каркинитско-Сивашский, Д – Донузлавский, ДЖ – Джанкойский, ЕН – Евпаторийско-Нижнегорский, ЛК – Луккульско-Каменский. Тектонические блоки: ТД – Тарханкутско-Джанкойский, Н – Новоселовский, КА – Каламитско-Арабатский, ГК – Горно-Крымский.

Fig. 1. The scheme of fault zoning and the tectonic blocks separated by these faults [6, Fig. 2 with simplifications]. Red lines indicate regional faults: KC, Karkinit-Sivash; D, Donuzlav; DJ, Dzhankoy; EN, Yevpatoria-Nizhnegorsk; LK, Lukkul-Kamensky. Tectonic blocks: TD, Tarkhankut-Dzhankoy; N, Novoselovsky; KA, Kalamit-Arabat; GK, Mountain Crimean.

фиксируются две отрицательные структуры: Донузлавско-Войковский прогиб и южнее – Каламитский залив, которые значительно выдвинуты на восток-северо-восток вдоль разломов, анализируемых нами. Это дало основание исследователям неотектоники Степного Крыма определить разломы как левые сдвиги [6]. Для Керченского п-ова использованы разломы, выделенные в работе [9].

В данной статье поставлена задача охарактеризовать новейшее напряженное состояние Степного Крыма и прилегающих территорий в связи с современной сейсмичностью. Выделить участки развития трещиноватости отрывного и сколового типов. Данные о положении отрывов очень важны при строительстве гражданских и стратегических сооружений, поскольку сеть отрывной трещиноватости более флюидопроницаема, чем сколы.

Характеристика района исследования

Сейсмичность. Общий уровень сейсмичности Крымско-Черноморского региона несколько ниже, чем в пределах остальной части периферии Черного моря – на Кавказе, в Турции или Румынии, а периоды повторяемости сильных и катастрофических землетрясений здесь более длительные, чем в указанных регионах [10]. Тем не менее, для этой территории известны катастрофические исторические землетрясения [11]. Одно из современных – землетрясение 11 сентября 1927 г. $M = 6.9$. На рис. 2 представлено эпицентрального положение землетрясений исследуемого региона из каталога, собранного по данным следующих источников: ежегодники «Землетрясения Северной Евразии. Крымско-Черноморский

регион», 2014–2023 гг. (<http://www.gsras.ru/zse/contents.html>); Ученые записки Крымского Федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология. 2011–2013 гг. (<https://sn-geography.cfuv.ru/arhiv>); Сейсмологический бюллетень Украины за 1991–2010 гг. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 1995–2010 (Библиотека ИФЗ РАН). Землетрясения с 1927 по 1986 г. хорошо представлены в работе [12]. В целом источники включают более 3500 событий, произошедших с 1927 по 2023 г.

Для удобной оценки сейсмичности по Крымско-Черноморскому региону он условно разделен на 9 районов: 1 – Севастопольский; 2 – Ялтинский; 3 – Алуштинский; 4 – Судакско-Феодосийский; 5 – Керченско-Анапский; 6 – Степной Крым; 7 – Азово-Ку-

банский; 8 – Северо-Западный; 9 – Черноморская впадина. При анализе сейсмичности проведен статистический подсчет землетрясений по каждому из указанных районов. Степной Крым и примыкающие к нему берега в отношении землетрясений – спокойная зона. Но она испытывает медленное прогибание тылового характера. С ним связано формирование нефтяных и газовых месторождений.

С 1972 по 2023 г. на территории Степного Крыма зарегистрировано 41 землетрясение с $K_{\Pi} = 4.7–9.0$ (K_{Π} – класс землетрясения по Пустовитенко и Кульчицкому, $M = 0.7–3.1$, $m_b = -0.3–2.7$ [16]). В тектоническом отношении часть эпицентров землетрясений приурочена к зоне сочленения Скифской плиты и Украинского щита и к раннекиммерийскому

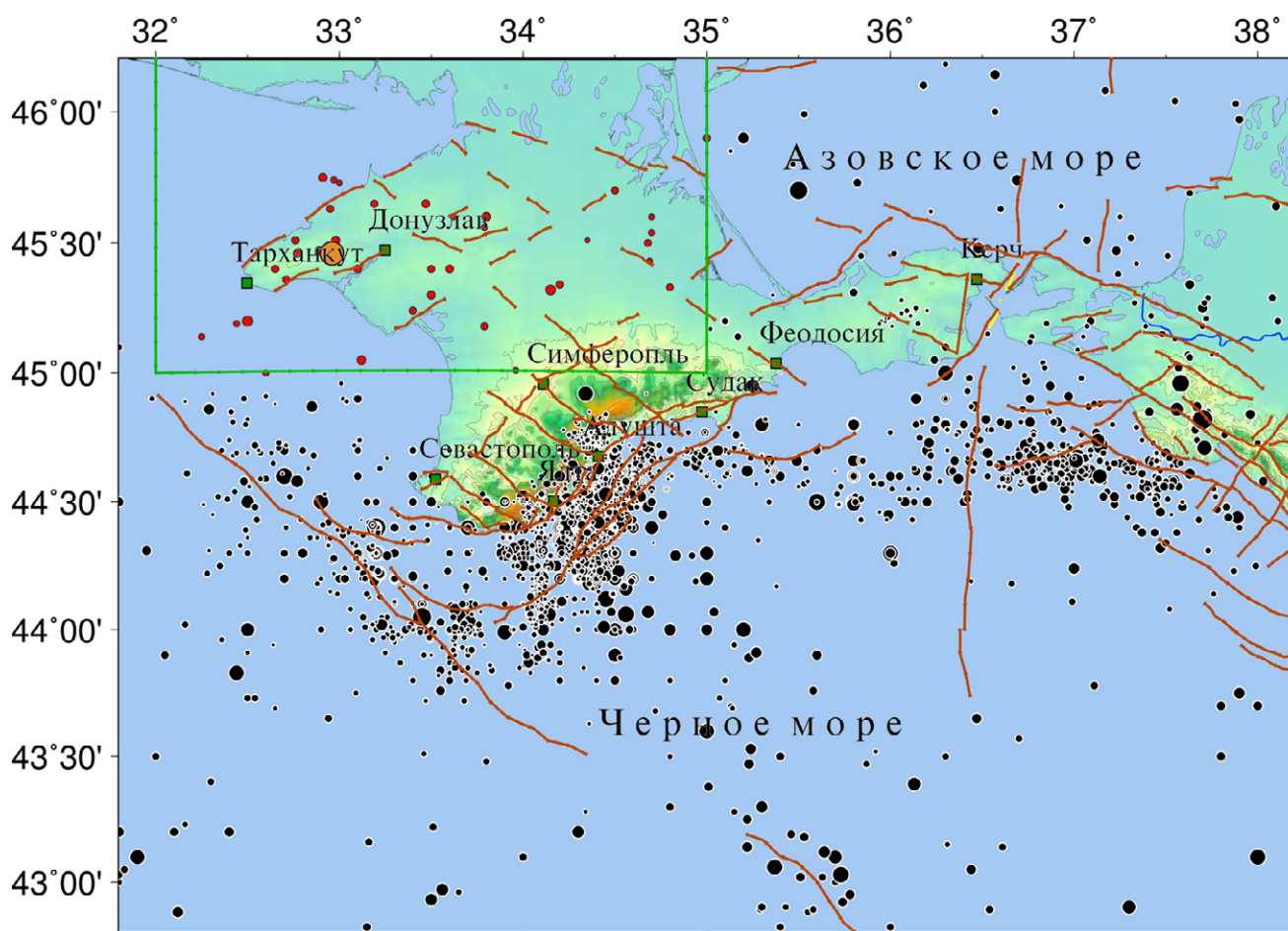


Рис. 2. Положение эпицентров из каталога землетрясений Крымско-Черноморского региона (более 3500 событий, 1927–2023 гг.). Прямоугольником отмечена территория Степного региона. Землетрясения на территории Степного Крыма показаны красными кружками. Кружок оранжевого цвета – положение населенного пункта Внуково (см. текст ниже). Коричневые линии – разломы по [2].

Fig. 2. Epicenter locations from the Crimean-Black Sea region earthquake catalog (over 3500 events, 1927–2023). The rectangle marks Steppe Crimea. The red dots denote earthquakes in Steppe Crimea. The orange dot marks the location of Vnukovo, near which the underground gas storage facility is located. Brown lines indicate faults according to [2].

Северотарханкутскому разлому. Другие цепочки и сгущения эпицентров попадают в зону влияния раннекиммерийских разломов: Донузлавского и Сулинско-Крымского. Землетрясения в районе Глебовского ПХГ (подземное хранилище газа, природный резервуар большой емкости до 2 млрд м³, залегающий на глубине 940 м; ближайший населенный пункт Внуково, см. рис. 1) могут быть связаны как с естественными сейсмотектоническими процессами в зонах ближайших разрывных нарушений, проявившихся в позднеальпийский этап, так и с наведенной сейсмичностью [8]. Очаги всех показанных на рисунке землетрясений Степного Крыма расположены в земной коре на глубинах от 5 до 25 км [8]. Самое значимое из них ($K_{\Pi} = 9.0$, $M = 3.1$) произошло 28 октября 1979 г.

Статистический анализ сейсмичности Крымско-Черноморского региона показывает, что район Степного Крыма относится к менее сейсмически активным (0.8 землетрясения в год в период с 1972 по 2023 г.), где представительные для всего региона землетрясения с $K_{\Pi} = 9$ не отмечены с 1979 г., т. е. за последние 40 лет. В то же время часть более слабых сейсмических толчков с $K_{\Pi} = 8$, представительных для отдельных районов изучаемой территории [17], и с $K_{\Pi} \leq 7$ удалось зафиксировать сравнительно удаленными стационарными станциями на пределе их регистрационных возможностей [8]. На территории Степного Крыма установлено две сейсмические станции: в районе Тарханкут (год открытия – 2012, временно закрыта в мае 2022 г.) и Донузлав (год открытия – 2018). Основная часть сейсмических станций для мониторинга сейсмического процесса Крымско-Черноморского региона установлена вдоль береговой линии южного побережья Крыма.

Тектоника. Черное море расположено в Анатолийском секторе Альпийско-Гималайской орогенной системы. В этом регионе движущиеся на север Африканская и Аравийская плиты сталкиваются с Евразийской плитой. В результате этого столкновения Анатолийский блок смещается на запад, а полюс вращения находится примерно к северу от Синайского полуострова. Тектонические стили

и скорости в окружении Черного моря и вдоль Крыма изучены недостаточно. Одна крымская станция ГНСС – CRAO (Крымская астрофизическая обсерватория), входящая в сеть IGS (International GNSS Service), не может обеспечить базу для детального геодинамического исследования полуострова. Однако можно отметить, что в многочисленных работах по исследованию активной тектоники Черного моря с помощью ГНСС-технологий [15–18] вектор скорости движений пункта CRAO имеет устойчивое северо-восточное направление. Поверхность Земли на участке спутникового геодинамического пункта CRAO (за период наблюдений в 6 лет 3 мес. и 17 дней, т. е. с 01.01.2012 по 17.04.2018 г.) движется в горизонтальной плоскости относительно станции ZECK (Зеленчукская), но при этом испытывает весьма незначительное погружение со скоростью 0.23 мм/год [19].

Методы исследований

Неотектонические напряжения Степного Крыма реконструированы структурно-геоморфологическим методом, как в классическом – мануальном исполнении, так и в его автоматизированной и улучшенной версии, реализованной в программном обеспечении SimSGM [20, 21].

Структурно-геоморфологический (СГ) метод реконструкции сдвиговых тектонических напряжений [23–26] основан на данных о закономерной ориентировке разрывов оперения в зоне динамического влияния сдвига, обобщенных в работе М.В. Гзовского, который выделил четыре типа (варианта) оперяющих трещин в зоне сдвига [24]. Оперяющие трещины формируют триаду закономерно ориентированных относительно разлома (сдвига) и относительно друг друга сопряженных сколов и отрывов (система из R- и R'-сколов в парагенезе с отрывами). Так как СГ-метод использует результаты дешифрирования топокарт, аэрофото- и космических снимков, то возраст восстановленных СГ-методом тектонических напряжений считается неотектоническим. Необходимо отметить, что в отдельных случаях

допускается, что оси сжатия и промежуточная ось могут меняться местами, когда доминирует обстановка растяжения. СГ-метод использован для реконструкции неотектонических напряжений III ранга по топографической основе [25] и космическому снимку (maps-for-free.com).

Алгоритмы программы SimSGM. Программное обеспечение SimSGM [20, 21] написано на языке программирования Python для операционных систем Windows 10 и Window 11. В основе работы программы лежит технология компьютерного зрения, с помощью которой происходит пошаговый анализ пикселей исходного изображения. В качестве основы для анализа могут послужить как карты высот, так и спутниковые снимки или их более мелкомасштабные аналоги (ортофотопланы крупного масштаба), сфотографированные беспилотными воздушными судами [26], т.е. беспилотными летательными аппаратами. Как и в базовом методе ручного дешифрирования [23], в программе SimSGM предусмотрен поиск и анализ мегатрещин с дальнейшим анализом их характерного взаимного расположения в области разломов, что в итоге дает нам информацию о локальных напряженных состояниях, кинематике по разломам и сложных геодинамических обстановках (транстенсии и транспрессии). Программа использована для реконструкции неотектонических напряжений I и II рангов.

Работа программы организована в три основных этапа. Первый – это загрузка и предварительная обработка карты высот или космоснимка, второй – дешифрирование линейных элементов, третий – анализ напряженного состояния по М.В. Гзовскому [24].

Для анализа рельефа на предмет разделения мегатрещин на отрывы и сколы разного масштаба был проведен визуальный подбор параметров предобработки карты высот с намеренным отдельным определением крупномасштабных и мелкомасштабных линейных элементов на этапе формирования «скелета» рельефа. Этап предварительной подготовки снимков к автоматическому дешифрированию позволяет в относительных координатах (относительно пикселей снимка) «подсвечивать» блоки нужного размера и тем самым определять структуры разного ранга. Однако это требу-

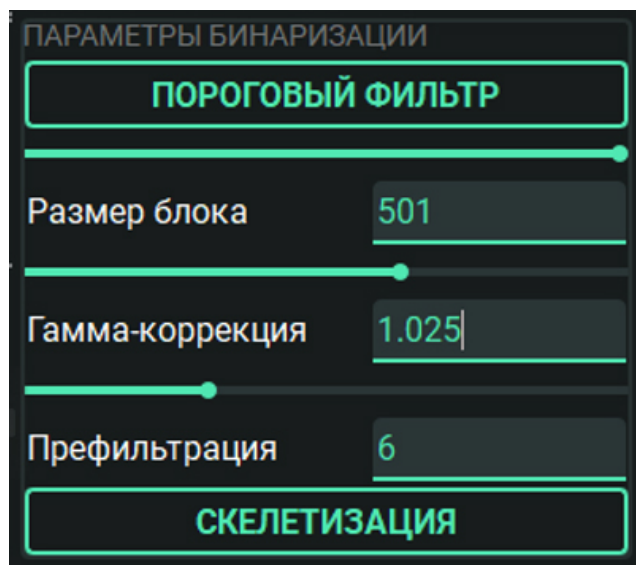


Рис. 3. Блок из ПО SimSGM по предварительной подготовке изображения к дешифрированию (параметры бинаризации исходного изображения).

Fig. 3. Block from the SimSGM software for preliminary preparation of an image for decoding (binarization parameters of the original image).

ет внимательности оператора во время подбора параметров бинаризации изображения. На рис. 3 изображены параметры бинаризации и скелетизации изображения в ПО SimSGM, где пороговый фильтр выделяет контрастные структуры с предварительным выравниванием яркости изображения.

Эта процедура задается тремя параметрами: размер блока – характерный размер неоднородностей в пикселях, яркость которых нужно выровнять; гамма-коррекция – изменение исходного контраста; префильтрация – размытие на краях контрастных областей по медиане.

Результаты и обсуждение

Реконструкции неотектонических напряжений по топографической основе

Полученные реконструкции неотектонических напряжений привязаны к схеме тектонического строения Крымского п-ова [27] (рис. 4). В работе [27] выделяется три структуры первого ранга: Украинская плита, Скифская плита, Горнокрымский террейн. С точки зрения геоморфологии большая часть Скифской плиты в исследуемом регионе представлена впа-

динами, Украинская плита – равниной, а Горнокрымский террейн – крупным поднятием.

СГ-методом для Степного Крыма восстановлены неотектонические напряжения по топографической основе (Карта Генерального штаба СССР. 1986. Лист L-36, Симферополь, м-б: 1:1 000 000) и космическому снимку. Результаты дешифрирования и реконструкции напряжений отражены на цифровой модели рельефа (рис. 5).

На рис. 5 показаны оси сжатия в горизонтальной плоскости, восстановленные СГ-мето-

дом по топографической основе. Поскольку по топографической основе в качестве мегатрещин вблизи выделенных разломов отдешифрировано незначительное число элементов рельефа, то определено лишь малое число ориентировок осей сжатия. Все они имеют северо-восточную ориентировку, при этом два определения вблизи Донузлавского прогиба свидетельствуют об обстановке дополнительного растяжения, что хорошо коррелирует с образованием прогиба в этом месте.

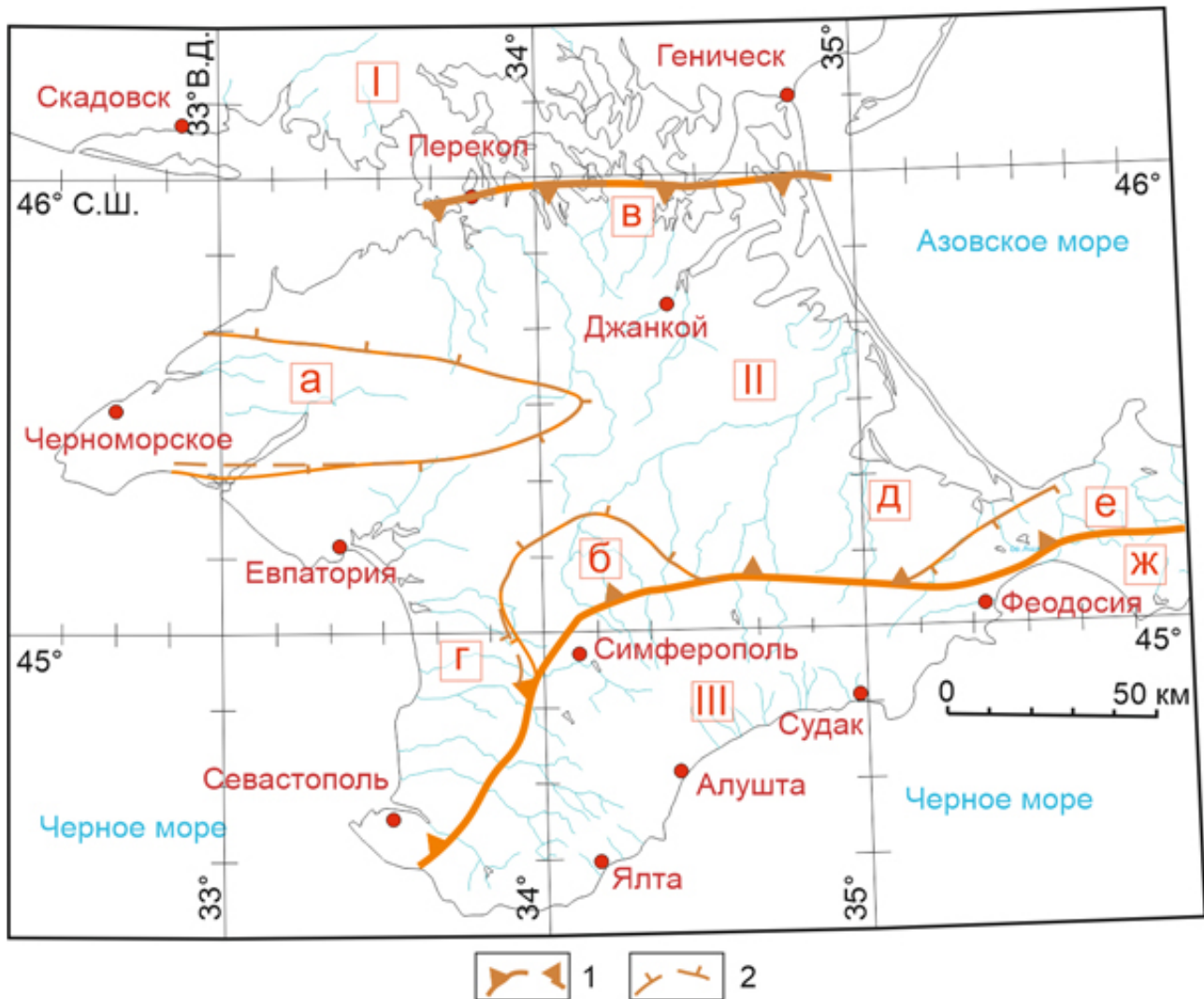


Рис. 4. Схема тектонического строения Крымского полуострова. 1 – границы тектонических структур I порядка [27]: I – Украинская плита ($PZ_{2,3}$); II – Скифская плита (PZ_3); III – Горнокрымский террейн, или Горнокрымская складчато-надвиговая область (T_3 -J-K₁+N-Q). 2 – границы тектонических структур II ранга [27]: а – Тарханкутско-Новоселовское поднятие (N_2 -Q); б – Симферопольское поднятие (K-N); в – Каркинитский прогиб (N-Q); г – Альминская впадина (P-N); д – Индоло-Кубанский прогиб (P-N); е – Северокерченская ретронадвиговая зона (N-Q); ж – Южнокерченская надвиговая зона (N-Q).

Fig. 4. Scheme of the tectonic structure of the Crimean Peninsula. 1, boundaries of tectonic structures of the first rank [27]: I, Ukrainian plate ($PZ_{2,3}$); II, Scythian plate (PZ_3); III, Mountain Crimean terrane i.e. the Mountain Crimean fold-and-thrust region (T_3 -J-K₁+N-Q). 2, boundaries of tectonic structures of the 2nd rank [27]: (а) Tarkhankut-Novoselovsky uplift (N_2 -Q); (б) Simferopol uplift (K-N); (в) Karkinitkiy trough (N-Q); (г) Alma depression (P-N); (д) Indolo-Kuban trough (P-N); (е) North Kerch retrothrust zone (N-Q); (ж) South Kerch thrust zone (N-Q).

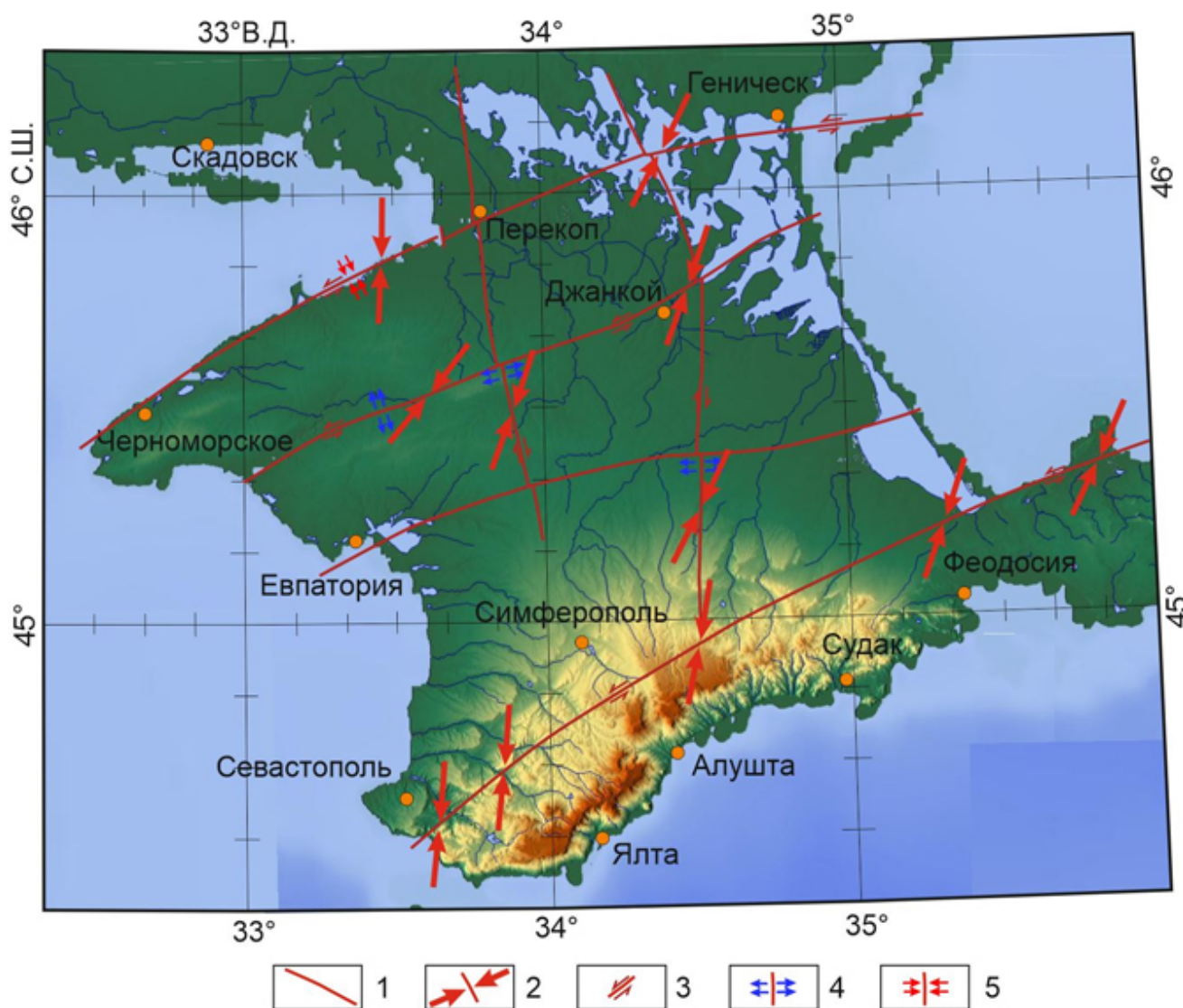


Рис. 5. Неотектонические напряжения Степного Крыма по цифровой карте рельефа (основа взята с сайта maps-for-free.com). 1 – разломы; 2 – ориентировки оси сжатия; 3 – направление сдвиговой подвижки по разлому; 4 – обстановка дополнительного растяжения; 5 – обстановка дополнительного сжатия.

Fig. 5. Neotectonic stresses of Steppe Crimean according to the digital relief map (base for the map is taken from website maps-for-free.com). 1, faults; 2, orientations of the compression axis; 3, direction of strike-slip movement along the fault; 4, additional extension (transtension); 5, additional compression (transpression).

Анализ крупномасштабных тектонических нарушений с помощью ПО SimSGM

Детальное дешифрирование мегатрещин проведено с помощью блока программы SimSGM, связанного с подготовкой изображений к процессу дешифрирования. Для обработки была взята карта рельефа высот SRTM из свободных источников (https://opendem.info/srtm_download_contours/). Данная цифровая модель рельефа (ЦМР) позволяет определять линеаменты по всем направлениям измерения

длин от 30 м и более. Чтобы получить полную картину неотектоники Степного Крыма, в ПО SimSGM был проанализирован весь Крымский полуостров, в том числе распределение линеаментов, имеющих протяженность от 500 до 10 000 м.

Для выделения линеаментов первого порядка проделана «бинаризация» рельефа (рис. 6) с параметрами предобработки изображения (см. рис. 3). «Подсветились» самые крупные линейные формы полуострова, которые выстраиваются в классический рисунок диагональных и ортогональных долин

рек, ущелий и каньонов. По рис. 5 видно, что Степной Крым в западной части разбит крупными долинами рек субширотного простирания, в центральной части – ортогональной системой рек и нарушений, в восточной – долинами рек северо-восточного простирания. Для южного берега Крыма (ЮБК) характерен рельеф, образующий диагональную систему неоднородностей, с крупными линеаментами северо-восточного простирания и серией пересекающих их линеаментов северо-западного простирания. Однако ближе к восточной части ЮБК происходит переориентация неоднородностей на ортогональную систему, после чего на самом

восточном участке (Керченский п-ов) снова начинает доминировать диагональная система неоднородностей.

Результаты определения линеаментов первого и второго порядка приведены на рис. 7. Для визуального, качественного анализа рельефа в ПО SimSGM добавлены 3 розы-диаграммы. Их можно настроить на отображение по количеству или по длине объектов. Верхняя роза-диаграмма отображает простирания сколовых нарушений, средняя (трещины) – одновременно все типы (и сколы и отрывы), нижняя – только отрывы. Под каждой розой-диаграммой приведена шкала с заполнением, где вся шкала – это 100 % нарушений, а заполнение показывает, какова доля сколов и отрывов на дешифрируемой территории.

При анализе линеаментов первого порядка (рис. 7 А) установлено, что строго прямолинейные линеаменты, интерпретируемые в СГ-методе как сколовые мегатрещины, доминируют в двух максимумах – субмеридионального и субширотного простираний, что видно на розе-диаграмме светло-зеленого цве-

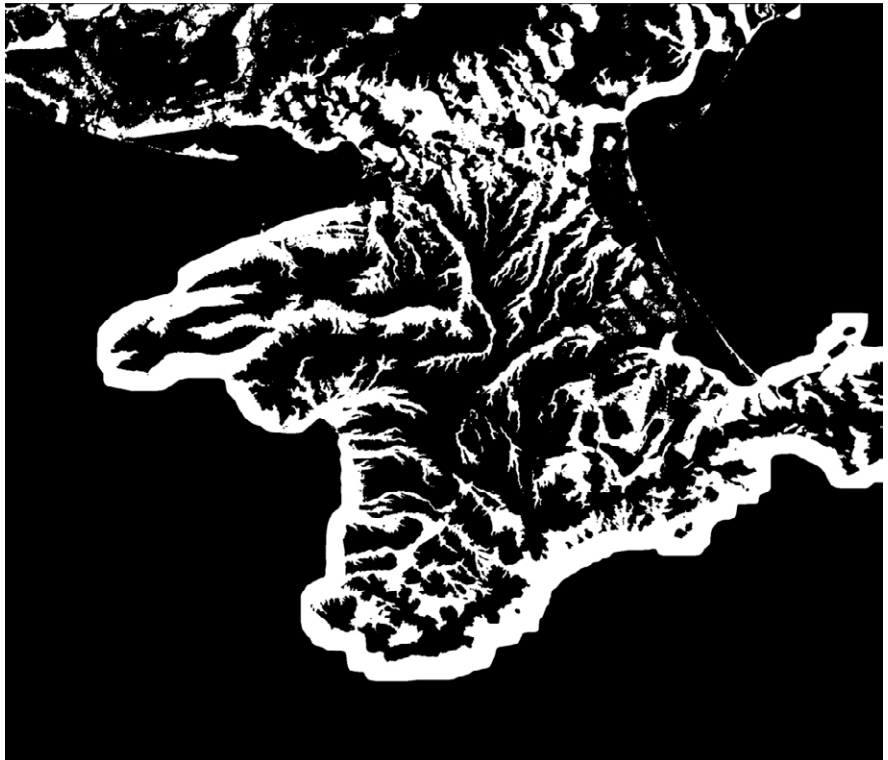


Рис. 6. Бинаризованное изображение Крымского п-ова для определения линеаментов первого порядка.

Fig. 6. Binarized image of the Crimean Peninsula for determining first rank lineaments.

та. Отрывные нарушения, соответствующие в рельефе широким и извилистым элементам, например каньоны и меандрирующие участки рек, также имеют два максимума. Первый ориентирован в северо-восточном простирании, а второй в северо-западном. Такое распределение сколов и отрывов (рис. 7 А, синяя роза-диаграмма) означает, что для полуострова существует два диагональных направления регионального сжатия, при этом северо-восточное сжатие преобладает.

При детальном изучении рис. 7 А можно заметить, что линеаменты имеют разные оттенки – зеленый и синий. Первый связан со сколовыми нарушениями, а второй с отрывными. По характеру распределения этих линеаментов установлено, что в регионе центрального Крыма и всего Степного Крыма доминирует северо-восточное сжатие, в то время как в распределении отрывных нарушений на южном берегу Крыма незначительно преобладает северо-западное сжатие. По-видимому, это связано с направлением новейшей складчатости в зоне Горного Крыма, его куэсты имеют как раз северо-западное падение. Эти следы

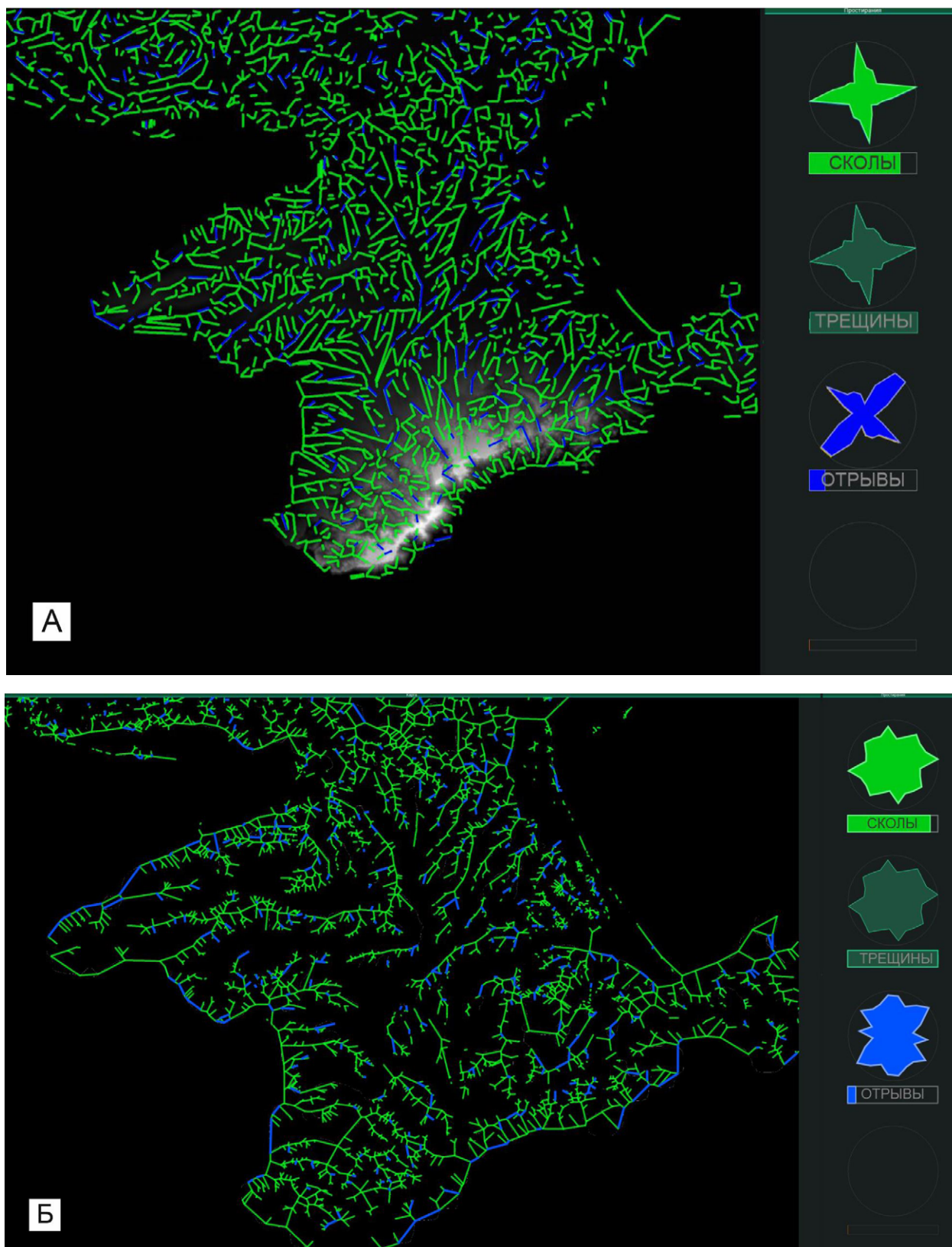


Рис. 7. Результаты дешифрирования линеаментов первого ранга (протяженностью от 1 до 10 км) (А) и линеаментов второго ранга (протяженностью от 0.5 до 10 км) (Б). Розы-диаграммы: светло-зеленая – мегатрещины сколового типа, зеленая – трещины (сводная информация по сколам и отрывам), синяя – мегатрещины отрывного типа.

Fig. 7. Results of deciphering first-rank lineaments (from 1 to 10 km in length) (A) and second-rank lineaments (from 0.5 to 10 km in length) (B). Rose diagrams: light green denotes shear megafractures; dark green denotes all shear and tension fractures; blue denotes tension fractures.

тектонической активизации удалось зарегистрировать с помощью алгоритмов SimSGM.

При повышении детальности дешифрирования и уменьшении нижнего порога линейных размеров искомых линейментов до 500 м получена сходная картина распределения мегатрещин сколового и отрывного типов (рис. 7 Б). Для линейментов второго ранга сколового типа добавилось два максимума по диагональной системе неоднородностей с сохранением пиковых значений по ортогональной системе неоднородностей (рис. 7 Б, светло-зеленая роза-диаграмма). Для линейментов

второго ранга отрывного типа (синяя роза-диаграмма) проявился принципиально новый максимум субмеридионального простирания. По-видимому, большинство мегатрещин отрывного типа второго ранга, образовавшиеся в процессе позднего развития разломной системы, оказались подчинены дальнедействующим силам в локальных областях крупных тектонических нарушений.

По данным о тектоническом строении Крымского п-ова [27] была построена карта новейших тектонических напряжений в привязке к его тектоническому строению (рис. 8).

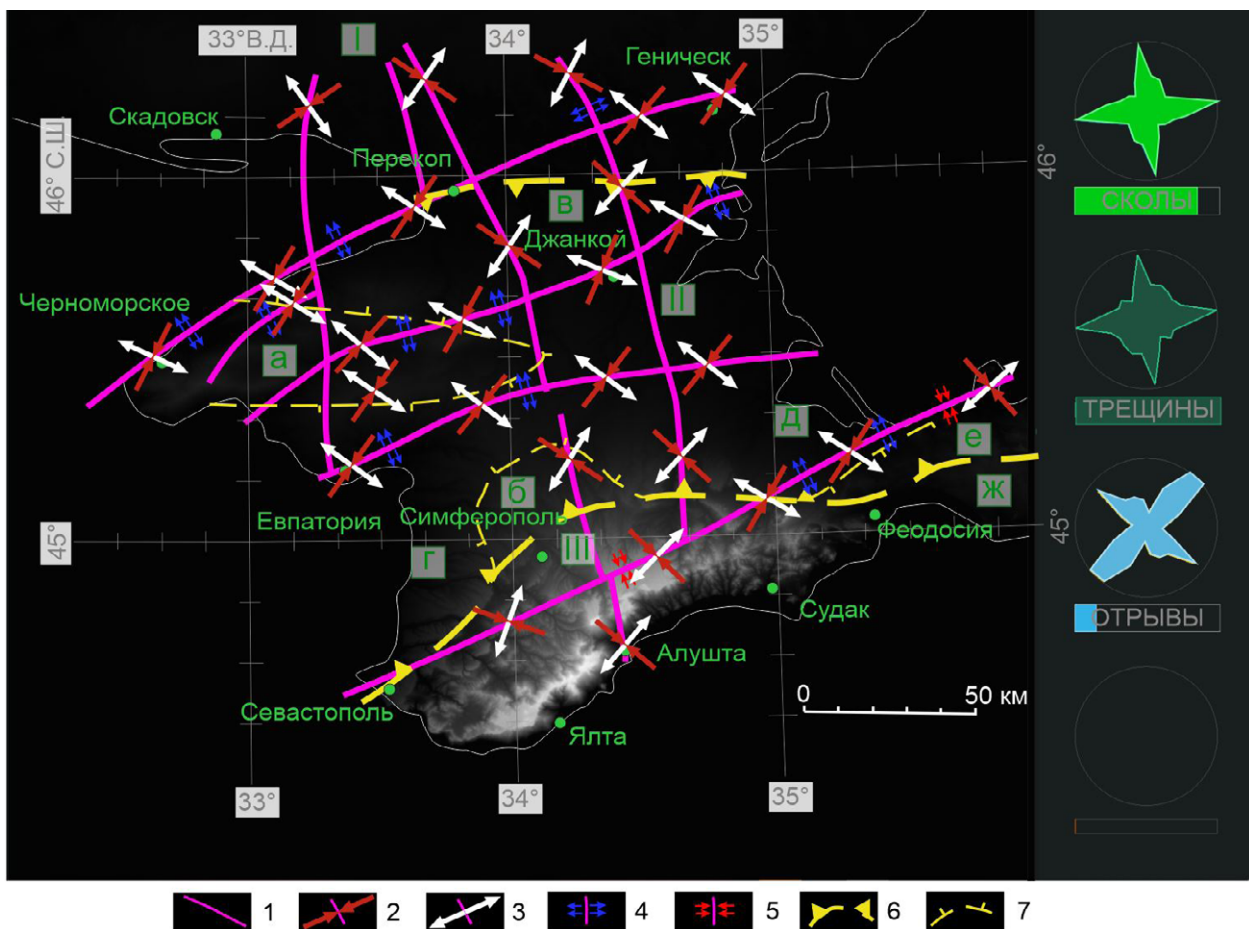


Рис. 8. Новейшие тектонические напряжения, рассчитанные в ПО SimSGM. 1 – разломы [6]; 2 – оси сжатия; 3 – оси растяжения; 4 – дополнительное растяжение (транстенсия); 5 – дополнительное сжатие (транспрессия); 6 – границы тектонических структур I порядка [27]: I – Украинская плита ($PZ_{2,3}$); II – Скифская плита (PZ_3); III – Горнокрымский террейн, или Горнокрымская складчато-надвиговая область ($J-K_1+N-Q$); 7 – границы тектонических структур II ранга [27]: а – Тарханкутско-Новоселовское поднятие (N_2-Q); б – Симферопольское поднятие ($K-N$); в – Каркинитский прогиб ($N-Q$); г – Альминская впадина ($P-N$); д – Индоло-Кубанский прогиб ($P-N$); е – Северокерченская ретронадвиговая зона ($N-Q$); ж – Южнокерченская надвиговая зона ($N-Q$).

Fig. 8. The latest tectonic stresses calculated in the SimSGM software. 1, faults [6]; 2, compression axes; 3, extension axes; 4, additional extension (transtension); 5, additional compression (transpression); 6, boundaries of tectonic structures of the first rank [27]: I, Ukrainian plate ($PZ_{2,3}$); II, Scythian plate (PZ_3); III, Mountain Crimean terrane, i.e. the Mountain Crimean fold-and-thrust region ($J-K_1+N-Q$); 7, boundaries of tectonic structures of the second rank [27]: (a) Tarkhankut-Novoselovsky uplift (N_2-Q); (б) Simferopol uplift ($K-N$); (в) Karkinitzky trough ($N-Q$); (г) Alma depression ($P-N$); (д) Indolo-Kuban trough ($P-N$); (е) North Kerch retrothrust zone ($N-Q$); (ж) South Kerch thrust zone ($N-Q$).

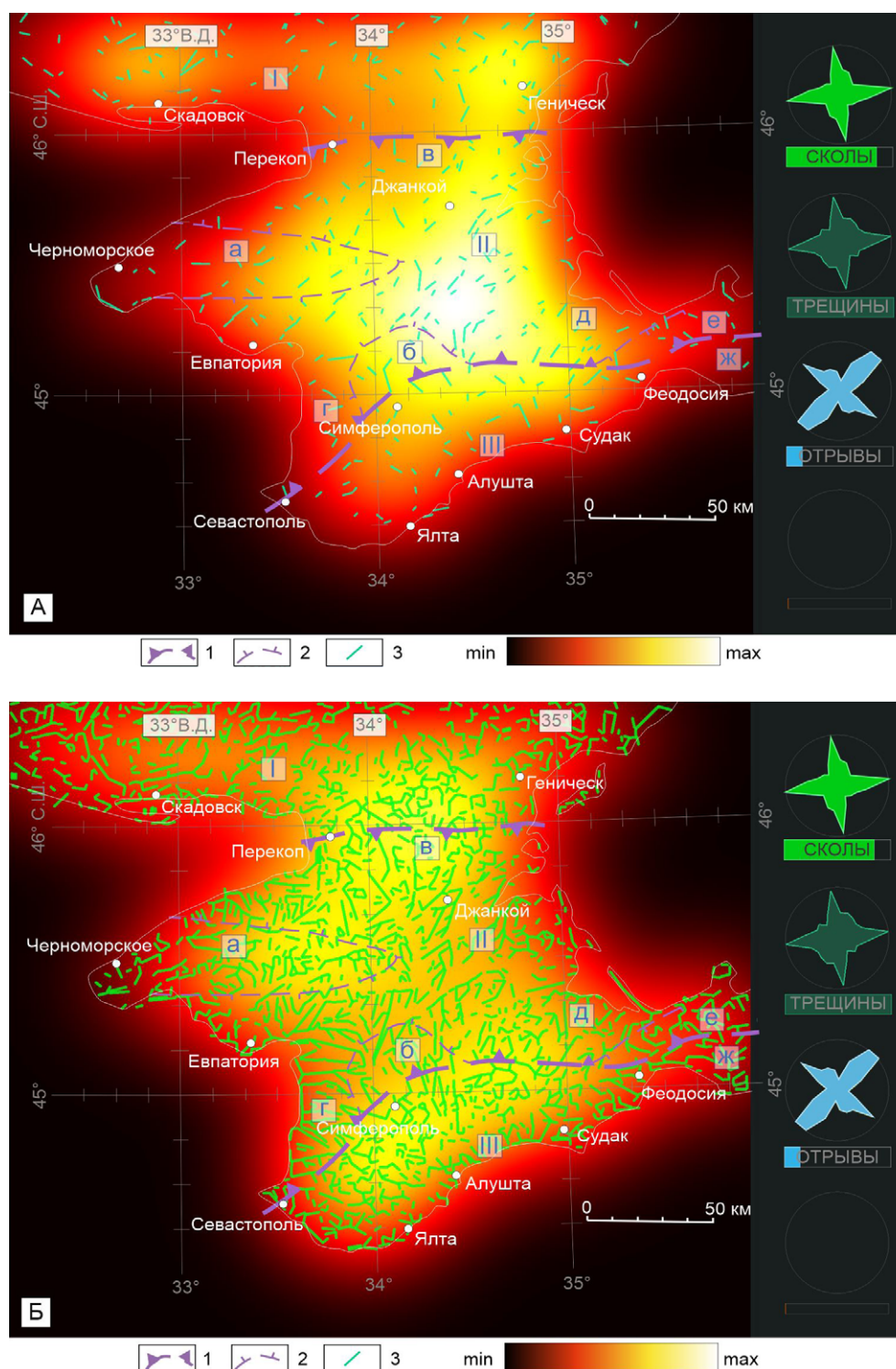


Рис. 9. Плотность отрывных (А) и сколовых (Б) нарушений, вычисленная в ПО SimSGM. 1 – границы тектонических структур I порядка [27]: I – Украинская плита ($PZ_{2,3}$); II – Скифская плита (PZ_3); III – Горнокрымский террейн, или Горнокрымская складчато-надвиговая область ($J-K_1+N-Q$). 2 – границы тектонических структур II ранга [27]: а – Тарханкутско-Новоселовское поднятие (N_2-Q); б – Симферопольское поднятие ($K-N$); в – Каркинитский прогиб ($N-Q$); г – Альминская впадина ($P-N$); д – Индоло-Кубанский прогиб ($P-N$); е – Северокерченская ретронадвиговая зона ($N-Q$); ж – Южнокерченская надвиговая зона ($N-Q$). 3 – мегатрещины: отрывы (А) и сколы (Б).

Fig. 9. Density of tension (A) and shear faults (B) calculated in the SimSGM software. 1, boundaries of tectonic structures of the first order [27]: I, Ukrainian plate ($PZ_{2,3}$); II, Scythian plate (PZ_3); III, Mountain Crimean terrane, i.e. the Mountain Crimean fold-and-thrust region ($J-K_1+N-Q$). 2, boundaries of tectonic structures of the second rank [27]: (a) Tarkhankut-Novoselovsky uplift (N_2-Q); (б) Simferopol uplift ($K-N$); (в) Karkinitzky trough ($N-Q$); (г) Alma depression ($P-N$); (д) Indolo-Kuban trough ($P-N$); (е) North Kerch retrothrust zone ($N-Q$); (ж) South Kerch thrust zone ($N-Q$). 3, megacracks: breaks/tension fractures (A) and shear fractures (B).

В результате автоматического дешифрирования установлено, что для всего Крымского п-ова простираение осей сжатия в основном северо-восточное. Это совпадает с результатом ручного дешифрирования (см. рис. 5). Однако для территории западного Горнокрымского террейна (рис. 8) есть расхождения в определениях в связи со сложностью рельефа: оси сжатия при ручном дешифрировании восстановлены с простираением на СВ, а в компьютерной версии СГ-метода получен результат с СЗ простираением осей сжатия. Такой же вывод сделан и в работе [27].

Выше в статье отмечена такая особенность этой части Крымского п-ова, как преобладание неоднородностей рельефа диагональных простираций. По-видимому, такая переиндексация напряжений на едином региональном разломе связана с комбинацией сдвига со взбросом. То есть при глобальной подвижке блоков в юго-запад-северо-восточном простираении центральная и северо-восточная части Горнокрымского террейна создают тень давления для небольшого западного массива пород этого террейна. Также установлено, что всей территории Скифской плиты в регионах впадин и прогибов свойственна повсеместная трансенсия (рис. 8, условные обозначения под пунктом 4). Кроме того, видно, что региональные разломы делятся на два глобальных ранга. Субширотные разломы – первого ранга, они подвержены воздействию северо-восточного регионального сжатия, а субмеридиональные разломы – второго ранга, подвержены воздействию северо-западного сжатия.

Для более глубокого анализа тектонических структур построены карты плотностей мегатрещин разного типа (рис. 9). Мегатрещины отрывного типа сосредоточены в основном на территориях Скифской плиты в областях развивающихся впадин и прогибов (рис. 9 А). В то время как сколовые нарушения проявлены в основном на территориях крупных поднятий и Горного Крыма (рис. 9 Б, III). Интересно, что большая концентрация прямолинейных элементов рельефа (с малой кривизной) наблюдается в том числе на территории Каркинитского прогиба, где большинство крупных водоемов имеют линейно вытянутые диагонально рас-

сеченные берега. Вся территория подвержена растягивающим напряжениям и разбита узловыми точками разломов.

Заключение

Вдоль крупнейших разломов восток-северо-восточного простираения структурно-геоморфологическим методом реконструированы ориентировки осей сжатия первого ранга северо-восточного простираения, за исключением Евпаторийско-Нижнегорского разлома, разделяющего Степной и Горный Крым. Предположительно, такие ориентировки осей сжатия обусловлены надвиганием Горного Крыма на Степной Крым. Большинство региональных разломов имеет слабую сейсмическую активность, что, по-видимому, связано, во-первых, с малым количеством сейсмостанций, во-вторых, с разгрузкой накапливаемых в коре напряжений в акватории Черноморского бассейна.

С помощью ПО SimSGM установлено несколько важных результатов:

1. На территории Крыма в большинстве своем развиты напряжения с ориентировками осей сжатия в северо-восточном простираении.
2. Региональные разломы разделяются на два ранга: субширотные – первого ранга, субмеридиональные – второго ранга.
3. Мегатрещины первого порядка образуют парагенез сколов и отрывов, создающий условия для развития регионального сжатия северо-восточного простираения.
4. Мегатрещины второго порядка формируют более сложную картину, в которой равнозначно выступают парагенезы северо-восточного и северо-западного простираения региональных сжимающих напряжений.
5. Мегатрещины первого порядка распределяются относительно тектонических структур так, что отрывы в основном тяготеют к зонам прогибов и впадин, а сколы – к складчатым структурам и поднятиям.
6. Геоморфологический «рисунки» Крымского региона позволяет разделить его на неотектонически разные области, где хорошо выделяются зоны неоднородностей с ортогональным простираением для Степного Крыма и диагональным – для Горного Крыма.

Список литературы

1. *Геология СССР. 1969. Т. 8. Крым. Ч. I. Геологическое описание.* М.: Недра, 576 с.
2. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. **2017.** База данных активных разломов Евразии. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(4): 711–736. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314>
3. Овсяченко А.Н., Вакарчук Р.Н., Корженков А.М., Ларьков А.С., Сысолин А.И., Рогожин Е.А., Махраханов А.В. **2019.** Активные разломы Керченского полуострова: новые результаты. *Доклады Академии наук*, 488(4): 408–412. doi:10.31857/S0869-56524884408-412
4. Вольфман Ю.М. **2021.** Особенности процессов альпийского тектонического разрывообразования и сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона: дис. ... д-ра геол.-минер. наук, 371 с. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва.
5. Кац Я.Г., Макарова Н.В., Козлов В.В., Трофимов Д.М. **1981.** Структурно-морфологический анализ Крыма по дешифрированию космоснимков. *Изв. вузов. Геология и разведка*, 3: 8–20.
6. Макарова Н.В., Макеев В.М., Галицкая И.В., Суханова Т.В. **2018.** Новейшая тектоника равнинного Крыма в связи с проблемами его водоснабжения. *Бюл. Московского общества испытателей природы. Отд. геол.*, 93(3): 3–11.
7. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В. **2015.** Современная активизация и тепловое поле Южно-Украинской моноклинали и Скифской плиты. *Доповіді НАН України*, 7: 85–90.
8. Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В.Е., Сухорученко С.К., Клянчин А.И. **2020.** Организация и первые результаты сейсмических наблюдений в северо-западной части территории Крыма. *Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология*, 6(72), 4: 144–169.
9. Захаров В.С., Симонов Д.А., Брянцева Г.В., Косевич Н.И. **2019.** Характеристики самоподобия системы водотоков Керченского полуострова и их сопоставление с результатами структурно-геоморфологического анализа. *Геофизические процессы и биосфера*, 18(1): 50–60. doi:10.21455/GPB2019.1-5
10. Вольфман Ю.М., Пустовитенко Б.Г., Колесникова Е.Я. **2022.** Новые результаты тектонофизического анализа фокальных механизмов землетрясений Крымско-Черноморского региона. *Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология*, 8(74), 4: 163–206. EDN: TGQYVR
11. *Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. 1977.* (Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин). М.: Наука, 536 с.
12. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Горячун А.В. **1989.** *Землетрясения Крымско-Черноморского региона (инструментальный период наблюдений 1927–1986 гг.).* Киев: Наукова думка, 192 с.
13. Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G., Kendall A.D. **2007.** Origins and methodology of the Russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales. *Seismological Research Letters*, 78(6): 579–590. doi:10.1785/gssrl.78.6.579
14. Калинин И.В., Свидлова В.А., Бондарь М.Н. **2019.** Сейсмичность Крыма в 2018 году. *Ученые записки Крымского Федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология*, 5(71), S4: 7–75.
15. Tari E., Sahin M., Barka A., Reilinger R., King R., McClusky S., Prilepin M. **2000.** Active tectonics of the Black Sea with GPS. *Earth Planets Space*, 52: 747–751. <https://doi.org/10.1186/bf03352276>
16. Милуков В.К., Миронов А.П., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М. **2015.** Оценки скоростей современных движений Северного Кавказа по GPS наблюдениям. *Геотектоника*, 3: 56–65. doi:10.7868/S0016853X15030042
17. Миронов А.П., Милуков В.К., Стеблов Г.М. **2016.** Современные подвижки северного Кавказа и Крыма по GPS наблюдениям. В кн.: *Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы докл. Всерос. конф.*, т. 1, с. 168–170.
18. Юбко В.М., Глазырин Е.А., Шестопапов В.Л. **2016.** Опыт измерения современных движений земной коры в районе Азово-Черноморского побережья РФ. *Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы докл. Всерос. конф.*, т. 1, с. 298–303.
19. Глазырин Е.А., Шестопапов В.Л. **2018.** Современные движения поверхности Земли Российского сегмента побережья Черного моря по данным GPS-наблюдений. В кн.: *Система Черного моря* (ред. А.П. Лисицын). М.: Научный мир, гл. 1, разд. 1.3, с. 76–84.
20. Гордеев Н.А., Молчанов А.Б. **2019.** Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим. *Геоинформатика*, 2: 25–33.
21. Молчанов А.Б., Гордеев Н.А. **2021.** Автоматизация метода реконструкции неотектонических напряжений Л.А. Сим с применением алгоритмов компьютерного зрения. *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*, 18: 301–304. <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.056>
22. Сим Л.А. **2000.** Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ

- Европы. В кн.: М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. М.: Наука, с. 326–350.
23. Сим Л.А. **1991**. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам: Методы, результаты, рекомендации. *Изв. вузов. Геология и разведка*, 1(10): 3–22.
 24. Гзовский М.В. **1975**. *Основы тектонофизики*. М.: Наука, 536 с.
 25. Бондарь И.В., Гордеев Н.А. **2023**. Кинематика Имандра-Колвицкого разлома в районе озера Среднее Лу-веньгское (Кольский полуостров). *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*, 20: 497–503. doi:10.31241/FNS.2023.20.064
 26. Юдин В.В. **2001**. *Геологическое строение Крыма на основе актуалистической геодинамики*: Приложение к науч.-практ. дискуссионно-аналит. сб. «Вопросы развития Крыма». Симферополь, 46 с.
 27. Пейве А.В., Беляевский Н.А., Суворов А.И., Унксов В.А. **1977**. *Разломы и горизонтальные движения сооружений СССР*. М.: Наука, 128 с.
- ## References
1. *Geology of USSR*. (ed. M.V. Muratov). **1969**. Vol. 33. [Crimea. Geological description]. Moscow: Nedra, 576 p. (In Russ.).
 2. Bachmanov D.M., Kozhurin A.I., Trifonov V.G. **2017**. The active faults of Eurasia database. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(4): 711–736. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314>
 3. Ovsyuchenko A.N., Vakarchuk R.N., Korzhnikov A.M., Larkov A.S., Sysolin A.I., Rogozhin E.A., Marahanov A.V. **2019**. Active faults of the Kerch's Peninsula: new results. *Doklady Earth Sciences*, 488(2): 1152–1156. doi:10.1134/S1028334X19100076
 4. Wolfman Yu.M. **2021**. [Features of the processes of Alpine tectonic rupture and seismogenesis in the Crimean-Black Sea region]: Dissertation of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, 371 p. Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow. (In Russ.).
 5. Kats Ya.G., Makarova N.V., Kozlov V.V., Trofimov D.M. **1981**. [Structural and morphological analysis of Crimea based on space imagery interpretation]. *Izv. vuzov. Geologiya i razvedka = Geology and Exploration*, 3: 8–20. (In Russ.).
 6. Makarova N.V., Makeev V.M., Galitskaya I.V., Sukhanova T.V. **2018**. Neotectonics of Plain Crimea in connection with problems of water supply. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series*, 93(3): 3–11. (In Russ.).
 7. Gordienko V.V., Gordienko I.V., Zavgorodnjaja O.V. **2015**. Recent activation and heat field of the South-Ukrainian monocline and the Scythian plate. *Доносиди НАН України*, 7: 85–90.
 8. Pustovitenko B.G., Kulchitsky V.E., Sukhoruchenko S.K., Klyanchin A.I. **2020**. [Organization and first results of seismic observations in the northwestern part of the Crimea territory]. *Uchenyye zapiski Krymskogo federalnogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*, 6(72), 4: 144–169. (In Russ.).
 9. Zakharov V.S., Simonov D.A., Bryantseva G.V., Kosevich N.I. **2019**. Self-similarity properties of the Kerch Peninsula stream network and their comparison with the results of structural and geomorphological analysis. *Izv. Atmospheric and Oceanic Physics*, 55: 721–730. <https://doi.org/10.1134/s0001433819070120>
 10. Volfman Yu.M., Pustovitenko B.G., Kolesnikova E.Ya. **2022**. [New results of the tectonophysical analysis of the focal mechanisms of earthquakes in the Crimean-Black Sea region]. *Uchenyye zapiski Krymskogo federalnogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*, 8(74), 4: 163–206. (In Russ.).
 11. *New catalogue of strong earthquakes on the territory of the USSR from ancient times to 1975*. **1977**. (eds N.V. Kondorskaya, N.V. Shebalin). Moscow: Nauka, 536 p. (In Russ.).
 12. Pustovitenko B.G., Kulchitsky V.E., Goryachun A.V. **1989**. [Earthquakes of the Crimean-Black Sea region (instrumental observation period 1927–1986)]. Kyiv: Naukova Dumka, 192 p.
 13. Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G., Kendall A.D. **2007**. Origins and methodology of the Russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales. *Seismological Research Letters*, 78(6): 579–590. doi:10.1785/gssrl.78.6.579
 14. Kalinyuk I.V., Svidlova V.A., Bondar M.N. **2019**. Seismicity of the Crimea in 2018. *Uchenyye zapiski Krymskogo federalnogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*, 5(71), S4: 7–75. (In Russ.).
 15. Tari E., Sahin M., Barka A., Reilinger R., King R., McClusky S., Prilepin M. **2000**. Active tectonics of the Black Sea with GPS. *Earth Planets Space*, 52: 747–751. <https://doi.org/10.1186/bf03352276>
 16. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblov G.M. **2015**. Velocities of contemporary movements of the Northern Caucasus estimated from GPS observations. *Geotectonics*, 49(3): 210–218. <https://doi.org/10.1134/s0016852115030036>
 17. Mironov A.P., Milyukov V.K., Steblov G.M. **2016**. [Modern movements of the Northern Caucasus and Crimea based on GPS observations]. In: *Chetvertaya tektonofizicheskaya konferentsiya v IFZ RAN. Tectonophysics and current issues of Earth sciences: Materialy dokladov*, 1: 168–170. (In Russ.).
 18. Yubko V.M., Glazyrin E.A., Shestopalov V.L. **2016**. [Experience in measuring modern crustal movements in the Azov-Black Sea coast of the Russian Federation]. In: *Chetvertaya tektonofizicheskaya konferentsiya*

- v IFZ RAN. Tectonophysics and current issues of Earth sciences: Materialy dokladov*, 1: 298–303. (In Russ.).
19. Glazyrin E.A., Shestopalov V.L. **2018**. Modern movements of the Earth's surface of the Russian segment of the Black Sea coast according to GPS observations. In: (Lisitsyn A.P., ed.) *The Black Sea system*. Moscow: Scientific World, Cpt. 1, pt. 1.3, p. 76–84. (In Russ.).
 20. Gordeev N.A., Molchanov A.B. **2019**. Automation of L.A. Sim structural-geomorphological method for reconstruction of shear tectonic stresses. *Geoinformatika*, 2: 25–33. (In Russ.).
 21. Molchanov A.B., Gordeev N.A. **2021**. Application of computer vision algorithms in tectonophysics. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTs RAN*, 18: 301–304. (In Russ.). <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.056>
 22. Sim L.A. **2000**. [The influence of global tectogenesis on the recent stress state of European platforms]. In: *M.V. Gzovskii and the progress in tectonophysics*. Moscow: Nauka, p. 326–350. (In Russ.).
 23. Sim L.A. **1991**. Study of tectonic stresses using geological indicators: Methods, results, recommendations. *Izv. vuzov. Geologiya i razvedka = Geology and Exploration*, 1(10): 3–22. (In Russ.).
 24. Gzovsky M.V. **1975**. *Fundamentals of tectonophysics*. Moscow: Nauka, 536 p. (In Russ.).
 25. Bondar I.V., Gordeev N.A. **2023**. Kinematics of the Imandra-Kolvitsky fault in the area of Lake Srednee Luvengskoye (Kola Peninsula). *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTs RAN*, 20: 497–503. (In Russ.). <https://doi.org/10.31241/FNS.2023.20.064>
 26. Yudin V.V. **2001**. *Geological structure of Crimea based on actualistic geodynamics*: Appendix to the scientific-practical, discussion-analytical collection “Issues of the development of Crimea”. Simferopol’, 46 p. (In Russ.).
 27. Peive A.V., Belyaevsky N.A., Suvorov A.I., Unks-ov V.A. **1977**. [Faults and horizontal movements of structures in the USSR]. Moscow: Nauka, 128 p. (In Russ.).

Об авторах

Сим Лидия Андреевна (SPIN-код: 4686-7834), доктор геолого-минералогических наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия, sim@ifz.ru

Гордеев Никита Александрович (<https://orcid.org/0000-0001-9440-5890>), кандидат геолого-минералогических наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия, gord@ifz.ru

Сычева Найля Абдулловна (<https://orcid.org/0000-0003-0386-3752>), кандидат физико-математических наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия, nelya@ifz.ru

About the Authors

Sim, Lidiya A. (SPIN: 4686-7834), Doctor of Geology and Mineralogy, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, sim@ifz.ru

Gordeev, Nikita A. (<https://orcid.org/0000-0001-9440-5890>), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, gord@ifz.ru

Sycheva, Nailya A. (<https://orcid.org/0000-0003-0386-3752>), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, nelya@ifz.ru

Поступила 06.10.2025

Принята к публикации 15.11.2025

Received 6 October 2025

Accepted 15 November 2025

© Авторы, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 504.064:504.423

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.361-369>
<https://www.elibrary.ru/yeqyta>

Анализ зависимости показателя ослабления подводной фотосинтетически активной радиации от концентрации хлорофилла-а и окрашенных растворенных органических веществ в отдельных районах залива Петра Великого

М. И. Горбов^{@1}, П. А. Салюк¹, А. Н. Павлов², Г. П. Гаревских¹

@E-mail: maxgorbov@mail.ru

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

² Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

Резюме. Работа посвящена решению проблемы определения региональных связей между характеристиками подводного светового поля и биооптическими характеристиками водной толщи. Цель исследования – определить влияние концентраций хлорофилла-а (хл-а) (C) и окрашенных растворенных органических веществ (ОРОВ) (D) на изменчивость подводной фотосинтетически активной радиации (ФАР) для отдельных районов зал. Петра Великого Японского моря (заливы Амурский, Уссурийский, Посыета). Для этого проанализирована зависимость показателя ослабления ($KPAR$) подводной ФАР от каждой из указанных биооптических характеристик в данных районах. Экспериментальные данные получены с помощью измерений концентраций хл-а и ОРОВ мультитипаметрическим зондом SeaBird SBE 19-plus со сферическим датчиком ФАР Licor Li-193 и калиброванными флуоресцентными датчиками WETStar. В работе использовались три вида моделей: $KPAR$ рассчитывается только через C (mC), только через D (mD) и одновременно через C и D (mCD). Получено, что в Амурском и Уссурийском заливах изменчивость $KPAR$ в первую очередь определяется вариацией содержания ОРОВ, а в зал. Посыета – вариацией концентрации хл-а. Одновременный учет концентраций хл-а и ОРОВ (модель mCD) во всех проанализированных случаях позволяет увеличить точность оценки $KPAR$ из измерений содержания оптически активных компонентов на 30–40 %, а для общей модели в ~2 раза по сравнению с учетом только концентрации хл-а. При использовании общей модели mCD для разных районов зал. Петра Великого показатель $KPAR$ определен со следующими относительными среднеквадратичными ошибками: $RMSE \%_{Amur}^{mCD} = 23.6$, $RMSE \%_{Ussur}^{mCD} = 19.3$, $RMSE \%_{Posyet}^{mCD} = 15.5$. Целесообразно использовать общую модель вида mCD, поскольку она демонстрирует более высокую адаптивность к региональным условиям зал. Петра Великого.

Ключевые слова: подводная фотосинтетически активная радиация, окрашенные растворенные органические вещества, хлорофилл-а, биооптические характеристики, оптически активные компоненты, Японское море

Dependence of the diffuse attenuation coefficient for underwater photosynthetically active radiation on chlorophyll-a and colored dissolved organic matter in Peter the Great Bay

Maxim I. Gorbov^{@1}, Pavel A. Salyuk¹, Andrey N. Pavlov², Georgiy P. Garevskikh¹

@E-mail: maxgorbov@mail.ru

¹ V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

² Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract. The study is devoted to solving the problem of determining regional relationships between the characteristics of the underwater light field and the bio-optical characteristics of the seawater column. The aim of the study is to determine the influence of chlorophyll-a (Chl-a) (C) and colored dissolved organic matter (CDOM) (D) concentrations on the variability of underwater photosynthetically active radiation (PAR) for certain areas of Peter the Great Bay in the Sea of Japan (Amur Bay, Ussuri Bay, and Posyet Bay). To this end, the dependence of the diffuse attenuation coefficient ($KPAR$) of the underwater PAR on each of the specified bio-optical characteristics in these areas was analyzed. The experimental data were obtained by measuring chlorophyll-a and CDOM concentrations using the SeaBird SBE 19-plus multiparameter probe with the Licor Li-193 spherical PAR sensor and calibrated WETStar fluorescent sensors. Three types of models were used in the study: $KPAR$ was calculated only through C (mC), only through D (mD), and simultaneously through C and D (mCD). It was found that in Amur Bay and Ussuri Bay, $KPAR$ variability is primarily influenced by variations in CDOM content, while in Posyet Bay, it is determined by variations in Chl-a concentration. Incorporating both Chl-a concentration and CDOM concentration (mCD model) in all analyzed cases increases the accuracy of $KPAR$ estimation from measurements of optically active components by 30–40 %. For the general model, this approach improves accuracy by approximately twofold compared to using Chl-a concentration alone. The application of the general mCD model for different areas of Peter the Great Bay yielded $KPAR$ estimates with the following relative root mean square errors: $RMSE \%_{Amur}^{mCD} = 23.6$, $RMSE \%_{Ussur}^{mCD} = 19.3$, $RMSE \%_{Posyet}^{mCD} = 15.5$. It is advisable to use the general mCD model, as it demonstrates greater adaptability to regional conditions in Peter the Great Bay.

Keywords: underwater photosynthetically active radiation, colored dissolved organic matter, chlorophyll-a, bio-optical characteristics, optically active constituents, the Sea of Japan

Для цитирования: Горбов М.И., Салюк П.А., Павлов А.Н., Гаревских Г.П. Анализ зависимости показателя ослабления подводной фотосинтетически активной радиации от концентрации хлорофилла-а и окрашенных растворенных органических веществ в отдельных районах залива Петра Великого. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 4, с. 361–369. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.361-369>; <https://www.elibrary.ru/yeqyta>

For citation: Gorbov M.I., Salyuk P.A., Pavlov A.N., Dependence of the diffuse attenuation coefficient for underwater photosynthetically active radiation on chlorophyll-a and colored dissolved organic matter in Peter the Great Bay. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 4, pp. 361–369. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.361-369>; <https://www.elibrary.ru/yeqyta>

Финансирование

Работы выполнены в рамках государственных заданий ТОИ ДВО РАН № 124022100080-0 (анализ результатов) и № 124042300003-5 (методика расчета), а также при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-77-00004) (анализ данных подводной фотосинтетически активной радиации).

Funding

The work was carried out within the framework of the state task of the POI FEB RAS: No. 124022100080-0 (results analysis) and No. 124042300003-5 (methods of calculations). The work was carried with financial support of Russian Science Foundation (project No. 23-77-00004) (determine of the underwater photosynthetically available radiation).

Введение

Подводная фотосинтетически активная радиация (ФАР) является важной характеристикой светового поля, которая определяет количество света, доступного для фотосинтеза фитопланктона [1, 2], и является одним из основных параметров биооптических моделей по расчету первичной продукции [3]. ФАР может быть использована также для оценки подводной освещенности [4] и для оценки поглощения тепла в морской толще в видимом спектральном диапазоне [5, 6]. Актуальной является разработка моделей по оценке под-

водной ФАР из прямых измерений биооптических характеристик [7]. Это позволяет упростить как используемые приборные океанографические комплексы, за счет уменьшения количества датчиков, так и модели по оценке первичной продукции, уменьшая количество неизвестных параметров. Кроме того, возможна оценка ФАР для архивов океанографических данных, где такие измерения не проводились.

Общепризнанным методом оперативной оценки подводной ФАР является использование измерений концентрации хлорофилла-а (хл-а) (C) [8, 9] или показателя ослабления

света [10] контактными или дистанционными способами. При этом важно понимать, что концентрация хл-а не единственная характеристика морской воды, определяющая изменчивость подводной освещенности [11, 16]. Не менее важны концентрация окрашенных растворенных органических веществ (ОРОВ) (D) [12] и показатель рассеяния света назад взвешенными частицами (как органическими, так и неорганическими) [13]. Поэтому при использовании в качестве входных данных содержания оптически активных компонентов необходимо проанализировать влияние концентрации не только хл-а, но и ОРОВ, а также, по возможности, концентрации минеральной взвеси. А при использовании измерений показателя ослабления света на конкретной длине волны важно оценить, существенно ли влияние ОРОВ на используемой длине волны.

Цель данной работы – определить влияние концентраций хлорофилла-а и окрашенных органических растворенных веществ на изменчивость подводной фотосинтетически активной радиации для отдельных районов зал. Петра Великого Японского моря (заливы Амурский, Уссурийский, Посыета).

Материалы и методы

Анализировались данные 2664 станций, из которых 390 относится к Амурскому заливу, 1611 к Уссурийскому и 663 – к зал. Посыета. Для исследований использованы архивные экспедиционные данные ТОИ ДВО РАН, полученные в зал. Петра Великого с июля по сентябрь 2008 г. с помощью мультипараметрического зонда SeaBird SBE 19-plus (частота измерений 4 Гц, равномерное профилирование от поверхности до дна со скоростью около 0.5 м/с). Значения температуры (T) и солености (S) морской воды получены с помощью процедур обработки SBE

DataProcessing. Значения концентраций хл-а C и окрашенных растворенных органических веществ D (в мг/м^3 хинина-сульфата) получены из калиброванных измерений флуоресцентными датчиками WETStar, установленными на зонде SBE 19-plus. Для дальнейшего анализа все полученные значения приведены к равномерным вертикальным профилям с шагом 1 м, путем усреднения в интервалах ± 0.5 м от целых значений глубины.

Для определения показателя ослабления подводной ФАР $KPAR$ использовались подводные измерения профилей суммарной ФАР (восходящей и нисходящей) с помощью сферического датчика Licor Li-193. Значение $KPAR(z)$ на глубине z определялось как модуль наклона полинома первой степени (рис. 1 а), построенного в диапазоне глубин от $z-dz/2$ до $z+dz/2$ по значениям $\ln(PAR(z))$ методом наименьших квадратов. Оптимальным значением dz было выбрано 5 м. Дополнительно отбраковывались отрицательные значения $KPAR(z)$, которые связаны с влиянием тени от судна, когда значение ФАР росло при увеличении глубины. Каждому корректно посчитанному значению $KPAR(z)$ сопоставлялось значение $C(z)$ и $D(z)$, а также

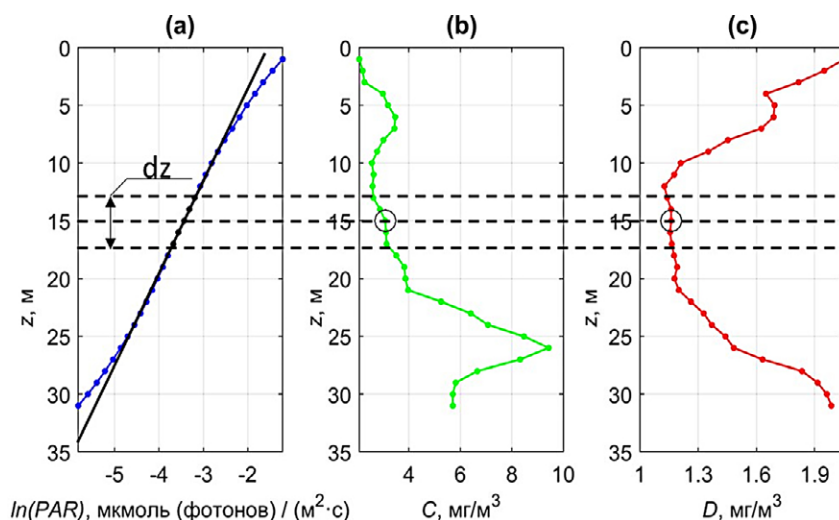


Рис. 1. Пример расчета значения $KPAR$ в каждой точке на интервале dz ; вертикальное распределение натурального логарифма PAR по z (а), C по z (б), D по z (в). Черной линией на рисунке (а) обозначен полином первой степени, построенный по точкам в интервале dz , кружками на рисунках (б) и (в) обозначены значения C и D для рассчитанного значения $KPAR$ в центре указанного интервала.

Fig. 1. Example of calculating the $KPAR$ value at each point in the interval dz ; vertical distribution of the natural logarithm of PAR by z (а), C by z (б), and D by z (в). The black line on diagram (а) represents a first-degree polynomial constructed from points in the interval dz , while circles on diagrams (б) and (в) represent the values of C and D for the calculated $KPAR$ value in the center of specified interval.

значения гидрологических характеристик $T(z)$ и $S(z)$ (значения из центра диапазона от $z-dz/2$ до $z+dz/2$ без дополнительного усреднения).

Для анализа качества линейной аппроксимации зависимости $KPAR(z)$ от $C(z)$ и $D(z)$ использовались коэффициент детерминации R^2 , среднеквадратичное отклонение ($RMSE$), $RMSE$ относительно среднего значения $KPAR$ в % ($RMSE\%$), смещение ($Bias$) и $Bias$ относительно среднего значения $KPAR$ в % ($Bias\%$).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (2)$$

$$RMSE\% = RMSE / \bar{y} * 100\%, \quad (3)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i), \quad (4)$$

$$Bias\% = Bias / \bar{y} * 100\%, \quad (5)$$

где y_i – наблюдаемые (реальные) значения, \hat{y}_i – предсказанные моделью значения, \bar{y} – среднее наблюдаемых значений, n – количество наблюдений.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны координаты измерений (рис. 2 а) используемого массива данных и диаграмма «температура (T) – соленость (S)» морских вод (рис. 2 б) для точек, в которых есть одновременное определение $KPAR(z)$, $C(z)$, $D(z)$, $T(z)$ и $S(z)$. На рис. 2 б можно отметить значимое влияние приповерхностного распределения при значениях солености менее 33 епс, которое выражается в резком изменении наклона между T и S , что характерно при наличии речного стока.

На рис. 3 приведены диаграммы рассеяния $D - C$ (рис. 3 а), $KPAR - C$ (рис. 3 б) и $KPAR - D$ (рис. 3 с). На рис. 3 а видно, что в используемом массиве данных присутствуют воды с различными соотношениями концентраций хл-а и ОРОВ, что говорит как о разных источниках происхождения ОРОВ, так и о разных стадиях развития фитопланктонных сообществ в районах исследований [14]. На рис. 3 б, с можно выделить линейные зависимости между $KPAR$ и концентрациями хл-а и ОРОВ. Эта линейная связь теоретически обоснована, поскольку чем больше содержание поглощающих свет

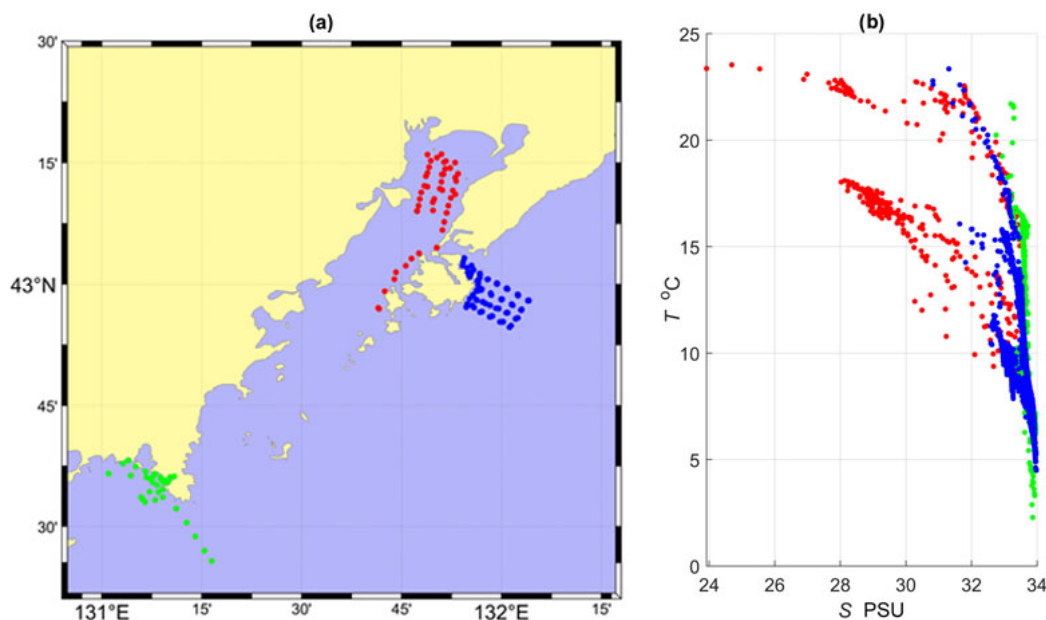


Рис. 2. Координаты станций в зал. Петра Великого (а); диаграмма «температура (T) – соленость (S)» морских вод (б). Красными точками обозначены станции в Амурском заливе, синими – в Уссурийском, зелеными – в зал. Посыета.

Fig. 2. Coordinates of stations in Peter the Great Bay (а); “temperature (T) – salinity (S)” diagram of the seawater (б). Red dots indicate stations of Amur Bay; blue, of Ussuri Bay; green, of Posyet Bay.

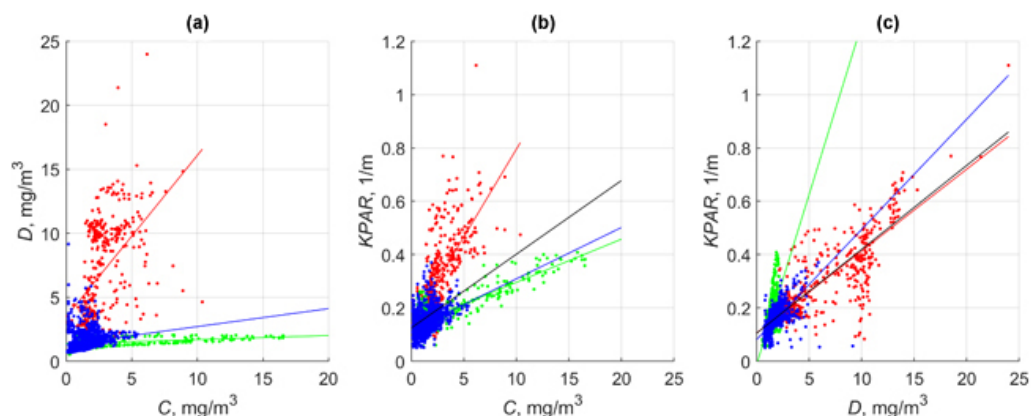


Рис. 3. Диаграммы рассеяния $D - C$ (a), $KPAR - C$ (b) и $KPAR - D$ (c). Точки и линейные регрессии, построенные для отдельных районов, обозначены красным (Амурский залив), синим (Уссурийский залив) и зеленым (зал. Посыета). Черной линией на рис. 3 б, с показана линейная регрессия, построенная по всем точкам.

Fig. 3. The scatter plots of $D - C$ (a), $KPAR - C$ (b), and $KPAR - D$ (c). Dots and linear regressions are denoted in red (Amur Bay), blue (Ussuri Bay), and green (Posyet Bay). Black lines in (b) and (c) indicate linear regression plotted across all points.

веществ, тем больше должен быть показатель ослабления света. В случае зависимости от концентрации хл-а, которая является оценкой содержания фитопланктона в морской воде, ослабление ФАР дополнительно связано с рассеянием света клетками фитопланктона [8].

Анализ данных позволяет ввести следующие виды эмпирических линейных моделей:

$$mC: KPAR_{region}^{mC} = \gamma_{region} \cdot C_{region} + \delta_{region}, \quad (6)$$

$$mD: KPAR_{region}^{mD} = \psi_{region} \cdot D_{region} + \delta_{region}, \quad (7)$$

$$mCD: KPAR_{region}^{mCD} = \gamma_{region} \cdot C_{region} + \psi_{region} \cdot D_{region} + \delta_{region}. \quad (8)$$

Таблица. Значения коэффициентов и статистические метрики качества линейных аппроксимаций (6) – (8)

Table. Coefficient values and statistical quality metrics of linear approximations (6) – (8)

Модель расчета	Эмпирические коэффициенты			Применение локальной модели		Применение общей модели		
	γ_{region}	ψ_{region}	δ_{region}	$R^2_{model_{region}}$	$RMSE\%_{model_{region}}$	$R^2_{model_{region}}$	$RMSE\%_{model_{region}}$	$bias\%_{model_{region}}$
$KPAR_{Total}^{mC}$	0.028	0	0.126	0.31	44.1	0.31	44.1	0.00
$KPAR_{Total}^{mD}$	0	0.031	0.105	0.69	29.1	0.69	29.1	0.00
$KPAR_{Total}^{mCD}$	0.018	0.028	0.081	0.81	23.3	0.81	23.3	0.00
$KPAR_{Amur}^{mC}$	0.066	0	0.138	0.47	33.4	-0.34	53.0	36.9
$KPAR_{Amur}^{mD}$	0	0.031	0.107	0.63	27.9	0.63	27.9	-1.18
$KPAR_{Amur}^{mCD}$	0.036	0.023	0.058	0.74	23.6	0.71	24.8	-0.82
$KPAR_{Posyet}^{mC}$	0.016	0	0.134	0.66	20.5	0.22	30.9	-11.5
$KPAR_{Posyet}^{mD}$	0	0.127	-0.011	0.39	27.9	0.02	34.9	13.6
$KPAR_{Posyet}^{mCD}$	0.136	0.082	0.021	0.81	15.5	0.71	19.0	5.43
$KPAR_{Ussur}^{mC}$	0.019	0	0.117	0.16	26.7	-0.10	30.6	-14.1
$KPAR_{Ussur}^{mD}$	0	0.041	0.082	0.48	21.0	0.41	22.3	-6.04
$KPAR_{Ussur}^{mCD}$	0.014	0.038	0.067	0.56	19.3	0.52	20.1	-2.19

Примечание. Отрицательные значения R^2 свидетельствуют о нецелесообразном использовании модели в данном случае, поскольку она показывает результаты хуже, чем использование среднего.

Note. Negative R^2 values suggest that using the model is not appropriate in this case, as it produces worse results than the average.

В таблице приведены значения коэффициентов γ_{region} , ψ_{region} , δ_{region} представленных видов эмпирических моделей для трех рассматриваемых районов отдельно (локальные модели, $region = \{Amur, Ussur, Posyet\}$) и общая модель для каждого района ($region = \{Total\}$). Общая модель представляет собой расчет для зал. Петра Великого по каждому виду модели. Также приведены статистические метрики для оценки качества линейной аппроксимации: R^2 , $RMSE\%$ и $bias\%$ между измеренными и рассчитанными по моделям значениями $KPAR$.

Из таблицы видно, что в Амурском и Уссурийском заливах $KPAR$ сильнее коррелирует с D ($R^2_{Amur}^{mD} = 0.63$, $RMSE\%_{Amur}^{mD} = 27.9\%$, $R^2_{Ussur}^{mD} = 0.48$, $RMSE\%_{Ussur}^{mD} = 21\%$), чем с C ($R^2_{Amur}^{mC} = 0.47$, $RMSE\%_{Amur}^{mC} = 33.4\%$ и $R^2_{Ussur}^{mC} = 0.16$, $RMSE\%_{Ussur}^{mC} = 26.7\%$). А в зал. Посыета наоборот ($R^2_{Posyet}^{mD} = 0.39$, $RMSE\%_{Posyet}^{mD} = 27.9\%$ и $R^2_{Posyet}^{mC} = 0.66$, $RMSE\%_{Posyet}^{mD} = 20.5\%$). При этом одновременный учет концентраций хл-а и ОРОВ во всех случаях улучшает результаты работы эмпирической линейной модели вида mCD ($R^2_{Amur}^{mCD} = 0.74$, $RMSE\%_{Amur}^{mCD} = 26.6\%$; $R^2_{Ussur}^{mCD} = 0.56$, $RMSE\%_{Ussur}^{mCD} = 19.3\%$;

$R^2_{Posyet}^{mCD} = 0.81$, $RMSE\%_{Posyet}^{mCD} = 15.5\%$). Большая зависимость от ОРОВ, чем от хл-а, наблюдается и в других районах Мирового океана, например в отдельных районах Черного [15] и Средиземного [12] морей.

На рис. 4 представлены результаты работы рассматриваемых вариантов общей модели по сравнению измеренных и рассчитанных значений $KPAR$. Применение общей модели типа mCD позволяет получить оценки $KPAR$ в отдельных районах без существенного ухудшения качества аппроксимации ($Rsquare_{Amur}^{mCD} = 0.71$, $RMSE\%_{Amur}^{mCD} = 24.8\%$; $Rsquare_{Ussur}^{mCD} = 0.52$, $RMSE\%_{Ussur}^{mCD} = 20.1\%$; $Rsquare_{Posyet}^{mCD} = 0.71$, $RMSE\%_{Posyet}^{mCD} = 19\%$), в отличие от локальных моделей вида mCD. Таким образом, для дальнейшего анализа целесообразно использовать общую модель вида mCD, поскольку она демонстрирует более высокую адаптивность к региональным условиям зал. Петра Великого.

В статье отдельно не рассмотрено влияние взвешенных веществ на оценку $KPAR$, однако косвенно это влияние отражено в параметре C , который оценивает концентрацию хл-а (основного пигмента клеток фитопланктона), а также в параметре D , оценивающим концентрацию ОРОВ. Последняя в свою очередь может быть связана с концентрацией минеральной взвеси

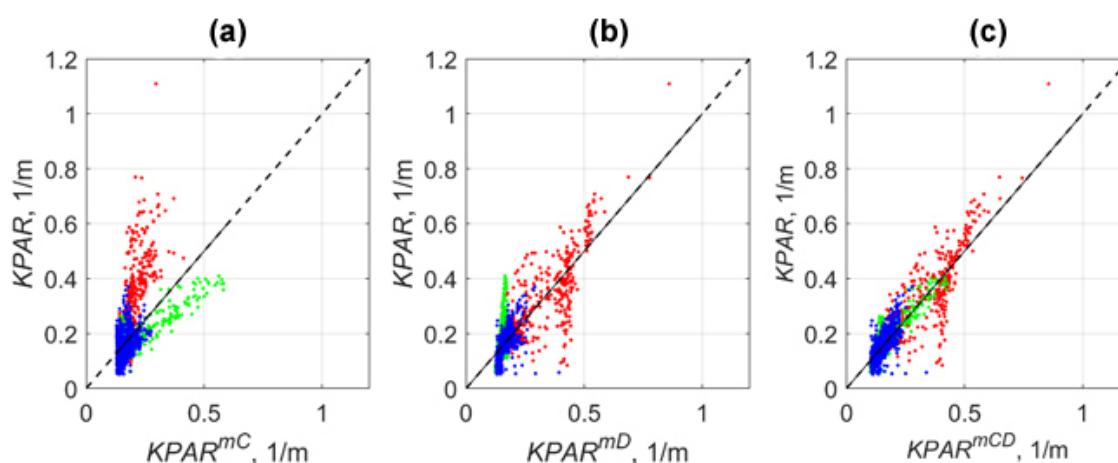


Рис. 4. Результаты работы рассматриваемых вариантов общих моделей (4)–(6) по сравнению измеренных (ось y) и рассчитанных (ось x) значений $KPAR$: модели вида mC (a), mD (b), mCD (c). Красными точками обозначен Амурский залив, синими – Уссурийский, зелеными – зал. Посыета. Штриховая линия – линия 1:1 ($y = x$).

Fig. 4. Results of the considered variants of general models (4)–(6) in terms of comparison measured (y -axis) and calculated (x -axis) $KPAR$ values: model mC (a), model mD (b), and model mCD (c). Red dots indicate Amur Bay, blue dots indicate Ussuri Bay, and green dots indicate Posyet Bay. The dotted line represents the 1:1 line ($y = x$).

в области стока р. Раздольная в Амурском заливе. Даже несмотря на отсутствие прямого учета взвешенных частиц, оценка КРАР выполняется с приемлемым уровнем точности как локальными моделями, так и общей моделью.

Заключение

В работе проанализирована зависимость показателя ослабления подводной фотосинтетически активной радиации (КРАР) от концентрации хл-а (C) и ОРОВ (D) в отдельных районах зал. Петра Великого (заливы Амурский, Уссурийский, Посыета) на основе экспериментальных *in situ* данных, полученных с июля по сентябрь 2008 г. По результатам исследований предложено 3 модели для восстановления значений КРАР из содержания оптически активных компонентов (C , D): модель mC – расчет только через C ; модель mD – только через D ; модель mCD – одновременно через C и D . Анализ статистических метрик использования представленных моделей в разных районах зал. Петра Великого позволил сделать следующие выводы.

Показатель ослабления ФАР в Амурском и Уссурийском заливах в первую очередь определялся содержанием ОРОВ в морской воде, а в зал. Посыета – концентрацией хл-а.

Одновременный учет концентрации хл-а и концентрации ОРОВ значимо увеличивает точность оценки КРАР из измерений содержания данных оптически активных компонентов во всех рассмотренных случаях.

При использовании общей модели вида mCD КРАР оценен с относительным $RMSE$ ~20–25 % в пределах зал. Петра Великого.

Полученные результаты позволяют повысить точность определения показателя диффузного ослабления ФАР в зал. Петра Великого из биооптических характеристик водной толщи, а также определить вклад таких оптически активных компонентов водной толщи, как фитопланктон и ОРОВ, в формирование значений подводной ФАР в отдельных районах залива. В дальнейшем полученные коэффициенты будут валидированы на данных других экспедиций и лягут в основу создания универсальной модели по оценке подводной ФАР в зал. Петра Великого.

Список литературы

1. Churilova T., Suslin V., Moiseeva N., Efimova T. **2020**. Phytoplankton bloom and photosynthetically active radiation in coastal waters. *Journal of Applied Spectroscopy*, 86: 1084–1091. <https://doi.org/10.1007/s10812-020-00944-0>
2. Ryther J. **1956**. Photosynthesis in the ocean as a function of light intensity. *Limnology and Oceanography*, 1(1): 61–70. <https://doi.org/10.4319/lo.1956.1.1.0061>
3. Westberry T.K., Silsbe G.M., Behrenfeld M.J. **2023**. Gross and net primary production in the Global Ocean: An ocean color remote sensing perspective. *Earth-Science Reviews*, 237: 104322. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104322>
4. Nechad B., Ruddick K. **2010**. A model of diffuse attenuation of the downwelling irradiance for ecosystem models. *Remote Sensing of the Coastal Ocean, Land, and Atmosphere Environment*, 7858. <https://doi.org/10.1117/12.872979>
5. Mobley C.D., Chai F., Xiu P., Sundman L.K. **2015**. Impact of improved light calculations on predicted phytoplankton growth and heating in an idealized upwelling-downwelling channel geometry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(2): 875–892. <https://doi.org/10.1002/2014JC010588>
6. Глуховец Д.И., Салюк П.А., Шеберстов С.В., Вазюля С.В., Салинг И.В., Степочкин И.Е. **2021**. Восстановление полного комплекса оптических характеристик для оценки теплосодержания в южной части Баренцева моря в июне 2021 г. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 18(5): 214–225. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-214-225>
7. Xing X., Lee Z., Xiu P., Chen S., Chai F. **2022**. A dual-band model for the vertical distribution of photosynthetically available radiation (PAR) in stratified waters. *Frontiers in Marine Science*, 9: 928807. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.928807>
8. Xing X., Boss E. **2021**. Chlorophyll-based model to estimate underwater photosynthetically available radiation for modeling, in-situ, and remote-sensing applications. *Geophysical Research Letters*, 48. <https://doi.org/10.1029/2020GL092189>
9. Renosh P.R. et al. **2023**. Vertically resolved Global Ocean light models using machine learning. *Remote Sensing*, 15(24): 5663. <https://doi.org/10.3390/rs15245663>
10. Латушкин А.А., Салюк П.А., Суслин В.В., Мартынов О.В. **2023**. Региональный алгоритм расчета толщины фотического слоя из вертикального профиля показателя ослабления направленного света на примере северо-западной части моря Уэдделла. *Океанология*, 63(4): 628–633. <https://doi.org/10.31857/S0030157423040081>

11. IOCCG. **2000**. *Remote sensing of ocean color in coastal, and other optically complex waters* (Ed. S. Sathyendranath). Dartmouth, Canada: IOCCG. (Reports of the International Ocean-Color Coordinating Group; no. 3).
12. Sempéré R., Para J., Tedetti M., Charrière B., Mallet M. **2015**. Variability of solar radiation and CDOM in surface coastal waters of the northwestern Mediterranean Sea. *Photochemistry and Photobiology*, 91(4): 851–861. <https://doi.org/10.1111/php.12434>
13. Gohin F., Loyer S., Lunven M., Labry C., Froidefond J.-M., Delmas D., Herbland A. **2005**. Satellite-derived parameters for biological modeling in coastal waters: Illustration over the eastern continental shelf of the Bay of Biscay. *Remote Sensing of Environment*, 95(1): 29–46. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.007>
14. Букин О.А., Салюк П.А., Майор А.Ю., Павлов А.Н. **2005**. Исследование процессов воспроизводства органического вещества клетками фитопланктона методом лазерной индуцированной флуоресценции. *Оптика атмосферы и океана*, 18(11): 976–983. EDN: HRPKFZ
15. Чурилова Т.Я., Суслин В.В., Сосик Х.М. **2009**. Спектральная модель подводной облученности в Черном море. *Морской гидрофизический журнал*, 6: 33–46. EDN: VKGALV
16. Kirk J. **2010**. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. 3rd ed. UK: Cambridge University Press, 662 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139168212>
6. Glukhovets D.I., Salyuk P.A., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V., Saling I.V., Stepotchkin I.E. **2001**. [Retrieval of the full complex of optical characteristics for heat content assessing in the southern part of the Barents Sea in June 2021]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 18(5): 214–225. (In Russ.).
7. Xing X., Lee Z., Xiu P., Chen S., Chai F. **2022**. A dual-band model for the vertical distribution of photosynthetically available radiation (PAR) in stratified waters. *Frontiers in Marine Science*, 9: 928807. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.928807>.
8. Xing X., Boss E. **2021**. Chlorophyll-based model to estimate underwater photosynthetically available radiation for modeling, in-situ, and remote-sensing applications. *Geophysical Research Letters*, 48. <https://doi.org/10.1029/2020GL092189>
9. Renosh P.R. et al. **2023**. Vertically resolved Global Ocean light models using machine learning. *Remote Sensing*, 15(24): 5663. <https://doi.org/10.3390/rs15245663>
10. Latushkin A.A., Salyuk P.A., Suslin V.V., Martynov O.V. **2023**. A regional algorithm for calculating the photic zone thickness from the vertical profile of the beam attenuation coefficient on the example of the northwestern part of the Weddell Sea. *Oceanology*, 63(4): 545–549. <https://doi.org/10.31857/s0030157423040081>
11. IOCCG. **2000**. *Remote sensing of ocean color in coastal, and other optically complex waters* (Ed. S. Sathyendranath). Dartmouth, Canada: IOCCG. (Reports of the International Ocean-Color Coordinating Group; no. 3).
12. Sempéré R., Para J., Tedetti M., Charrière B., Mallet M. **2015**. Variability of solar radiation and CDOM in surface coastal waters of the northwestern Mediterranean Sea. *Photochemistry and Photobiology*, 91(4): 851–861. <https://doi.org/10.1111/php.12434>
13. Gohin F., Loyer S., Lunven M., Labry C., Froidefond J.-M., Delmas D., Herbland A. **2005**. Satellite-derived parameters for biological modeling in coastal waters: Illustration over the eastern continental shelf of the Bay of Biscay. *Remote Sensing of Environment*, 95(1): 29–46. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.007>
14. Bukin O.A., Saluk P.A., Maior A.Yu., Pavlov A.N. **2005**. Studies of organic matter reproduction in phytoplankton cells by laser-induced fluorescence method. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 18(11): 879–885.
15. Churilova T.Ya., Suslin V.V., Sosik Kh.M. **2010**. Spectral model of underwater irradiance in the Black Sea. *Physical Oceanography* (2009), 19: 366–378. <https://doi.org/10.1007/s11110-010-9060-8>
16. Kirk J. **2010**. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. 3rd ed. UK: Cambridge University Press, 662 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139168212>

References

1. Churilova T., Suslin V., Moiseeva N., Efimova T. **2020**. Phytoplankton bloom and photosynthetically active radiation in coastal waters. *Journal of Applied Spectroscopy*, 86: 1084–1091. <https://doi.org/10.1007/s10812-020-00944-0>
2. Ryther J. **1956**. Photosynthesis in the ocean as a function of light intensity. *Limnology and Oceanography*, 1(1): 61–70. <https://doi.org/10.4319/lo.1956.1.1.0061>
3. Westberry T.K., Silsbe G.M., Behrenfeld M.J. **2023**. Gross and net primary production in the Global Ocean: An ocean color remote sensing perspective. *Earth-Science Reviews*, 237: 104322. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104322>
4. Nechad B., Ruddick K. **2010**. A model of diffuse attenuation of the downwelling irradiance for ecosystem models. *Remote Sensing of the Coastal Ocean, Land, and Atmosphere Environment*, 7858. <https://doi.org/10.1117/12.872979>
5. Mobley C.D., Chai F., Xiu P., Sundman L.K. **2015**. Impact of improved light calculations on predicted phytoplankton growth and heating in an idealized upwelling-downwelling channel geometry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(2): 875–892. <https://doi.org/10.1002/2014JC010588>

Об авторах

Горбов Максим Иванович (<https://orcid.org/0009-0001-0057-0869>), инженер лаборатории физических методов исследования океана, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия, maigorbov@mail.ru

Салюк Павел Анатольевич (<https://orcid.org/0000-0002-3224-710X>), кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории спутниковой океанологии и лазерного зондирования, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия, psalyuk@poi.dvo.ru

Павлов Андрей Николаевич (<https://orcid.org/0000-0001-6099-1174>), доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории лазерных методов исследования вещества, Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия, anpavlov@iacp.dvo.ru

Гаревских Георгий Павлович (<https://orcid.org/0009-0002-8528-6062>), старший инженер лаборатории физических методов исследования океана, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия, garevskih.gp@poi.dvo.ru

Поступила 09.07.2025

Принята к публикации 15.10.2025

About the Authors

Gorbov, Maxim I. (<https://orcid.org/0009-0001-0057-0869>), Engineer of the Laboratory of physical methods of ocean research, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia, gorbov.mi@poi.dvo.ru

Salyuk, Pavel A. (<https://orcid.org/0000-0002-3224-710X>), Cand. Sci (Phys. And Math.), Associate Professor, Leading Researcher, Leader of the Laboratory for satellite oceanography and laser sensing, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia, psalyuk@poi.dvo.ru

Pavlov, Andrey N. (<https://orcid.org/0000-0001-6099-1174>), Doctor of Physics and Mathematics, Principal Researcher, Laboratory of laser methods for studying matter, Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia, anpavlov@iacp.dvo.ru

Garevskikh, Georgiy P. (<https://orcid.org/0009-0002-8528-6062>), Senior Engineer of the Laboratory of physical methods of ocean research, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia, garevskih.gp@poi.dvo.ru

Received 9 July 2025

Accepted 15 October 2025

© Авторы, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.344.4+551.21

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.370-386>
<https://www.elibrary.ru/yvnskm>

Землетрясение и цунами 4(5) октября 1994 года на побережье Южных Курильских островов (взгляд 30 лет спустя)

*В. М. Кайстренко^{@1}, П. Виллис², Н. Г. Разжигаева³,
Л. А. Ганзей³, Г. В. Шевченко^{4,1}, Ю. П. Королёв¹*

@E-mail: vict-k@mail.ru

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

² *Институт физики Земли, Париж, Иль-де-Франс, Франция*

³ *Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия*

⁴ *Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института
рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск, Россия*

Резюме. 4(5) октября 1994 г. произошло одно из сильнейших цунамигенных землетрясений в истории региона Южных Курильских островов, которое сопровождалось масштабными тектоническими проявлениями. Интенсивные сотрясения привели к коллапсу всей инфраструктуры на Шикотане и Кунашире, 11 человек погибли. Цунами, последовавшее за землетрясением, достигало высоты порядка 10 м на океанской стороне о. Шикотан и регистрировалось по всему побережью Тихого океана. Основные работы по изучению проявлений этого события проводились с октября 1994 г. и завершились в 1997 г. изданием объемных обзоров. Впервые был собран и систематизирован материал по специфическим эффектам на поверхности океана (моретрясение), сопровождавшим это землетрясение. В последующие годы интерес к этому неординарному событию инициировал продолжение исследований. При этом на первое место выдвинулось изучение отложений цунами 4(5) октября 1994 г. в общем контексте изучения отложений древних цунами (палеоцунами) в этом регионе. Эти исследования позволили получить оценки «сохранения» / «стирания» следов этого и более древних событий на побережье Южных Курильских островов. Ряд важных данных, приведенных в обзоре, публикуется впервые.

Ключевые слова: Южные Курилы, землетрясение, моретрясение, деформации земной коры, цунами, следы цунами, палеоцунами

Earthquake and tsunami of October 4(5), 1994, on the coast of the Southern Kuril Islands (a look 30 years later)

*Victor M. Kaistrenko^{@1}, Pascal Willis², Nadezhda G. Razjigaeva³,
Larisa A. Ganzey³, Georgy V. Shevchenko^{4,1}, Yury P. Korolev¹*

@E-mail: vict-k@mail.ru

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

² *Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France*

³ *Pacific Geographical Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia*

⁴ *Sakhalin Branch of the All-Russian Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

Abstract. On October 4(5), 1994, one of the strongest tsunamigenic earthquakes in the history of the Southern Kuril Islands occurred, which was accompanied by large-scale tectonic manifestations. Intense shaking led to the collapse of the entire infrastructure on Shikotan and Kunashir Islands; 11 people died. The tsunami that followed the earthquake

reached a height of about 10 m on the ocean side of Shikotan Island and was recorded along the entire coast of the Pacific Ocean. Generally, the study of the manifestations of this event had been carried out since October 1994 and ended in 1997 with the publication of extensive reviews. For the first time, the data on the specific effects on the ocean surface (seaquake) that accompanied this earthquake have been collected and systematized. In the following years, the interest in this extraordinary event initiated further research. At the same time, the study of the deposits of the tsunami of October 4(5), 1994, in the general context of study of ancient tsunami (paleotsunami) deposits in this region came to the fore. These studies allowed us to obtain estimates of the “preservation”/“erasure” of the traces of this tsunami and more ancient events on the coast of the Southern Kuril Islands. Some important data presented in this review are being published for the first time.

Keywords: Southern Kuril Islands, earthquake, seaquake, deformations of the Earth’s crust, tsunami, tsunami traces, paleotsunami

Для цитирования: Кайстренко В.М., Виллис П., Разжигаяева Н.Г., Ганзей Л.А., Шевченко Г.В., Королёв Ю.П. Землетрясение и цунами 4(5) октября 1994 года на побережье Южных Курильских островов (взгляд 30 лет спустя). *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 4, с. 370–386. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.370-386>; <https://www.elibrary.ru/yvnskm>

For citation: Kaistrenko V.M., Willis P., Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Shevchenko G.V., Korolev Yu.P. Earthquake and tsunami of October 4(5), 1994, on the coast of the Southern Kuril Islands (a look 30 years later). *Geosistemy perednykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 4, pp. 370–386. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.370-386>; <https://www.elibrary.ru/yvnskm>

Финансирование и благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН «Мониторинг и моделирование океанологических процессов, прогнозирование катастрофических явлений на шельфе и в прибрежной зоне» (№ 121021000268-9) и Тихоокеанского института географии ДВО РАН «Естественная и антропогенная динамика, трансформация и эволюция разноранговых геосистем и их компонентов в переходной зоне «суша-океан» в условиях возрастания природных и техногенных рисков; разработка методов и геоинформационных технологий их мониторинга и моделирования» (№ 125021302113-3).

Осенью 1994 г. работа исследовательской группы на островах, и особенно на Шикотане, проходила в условиях разрухи, вызванной землетрясением, и помощь властей на местах (В.И. Белоносов, В.И. Берг, А.Ф. Шулятьев, Н.А. Покидин) в сборе информации и, эпизодически, с транспортом была очень существенной. Детальные данные о проявлении цунами в порту Южно-Курильска были получены от В.А. Смorchкова – главного инженера рыбколхоза «Родина» в 1994 г.

Авторы благодарны уважаемым рецензентам за их замечания, которые помогли устранить ряд неточностей.

Funding and Acknowledgements

The research was carried out 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 “Monitoring and modeling of oceanological processes, forecasting catastrophic events on the shelf and in the coastal zone” (No. 121021000268-9) and the Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences “Natural and anthropogenic dynamics, transformation and evolution of heterogeneous geosystems and their components in the transition zone “land–ocean” in conditions of increasing natural and man-made risks; development of methods and geoinformation technologies for their monitoring and modeling” (No. 125021302113-3).

In the Autumn of 1994, the work of the research group on the Islands, and especially on Shikotan, took place in conditions of devastation caused by an earthquake, and the assistance of local authorities (V.I. Belonosov, V.I. Berg, A.F. Shulyatyev, and N.A. Pokidin) in collecting information and occasionally arranging transportation was very significant. Detailed data on the tsunami effects in the port of Yuzhno-Kurilsk was provided by V.A. Smorchkov, chief engineer of the “Rodina” fish factory in 1994.

The authors are grateful to the respected Reviewers for their comments, which helped to eliminate a number of inaccuracies.

Введение

5 октября 1994 г. в 00 ч 23 мин по местному времени (4 октября в 13 ч 23 мин по Гринвичу) в районе Южных Курильских островов произошло сильное землетрясение, магнитуда которого оценивалась в разных шкалах как $M_s = 8.1$, $M_w = 8.26$, $M_t = 8.2$, координаты

эпицентра 43.85° с.ш. и 147.17° в.д. Землетрясение проявилось с интенсивностью 8-9 баллов (по 12-балльной шкале MSK-64) на о. Шикотан, 7-8 баллов на других островах Малой Курильской гряды и о. Кунашир, 6-7 баллов на островах Итуруп и Хоккайдо, до 5-6 баллов на севере о. Хонсю, 2-4 балла на севере Курильской гряды. 9 октября в 07 ч 55 мин

по Гринвичу произошел крупнейший афтершок с оценками магнитуды $M_s = 7$, $M_w = 7.25$, $M_t = 6.9$ и координатами эпицентра 43.91° с.ш. и 147.82° в.д.*[1]. Вслед за землетрясением побережье Южных Курильских островов подверглось воздействию цунами. В результате землетрясения и в меньшей степени от цунами пострадали 13.4 тыс. чел., в том числе 11 чел. погибли при обрушении конструкций, 32 были серьезно ранены, 210 легко ранены, 7.7 тыс. чел. осталось без крова. Разрушено полностью 111 домов, частично – более 250, материальный ущерб составил около 600 млрд руб. в ценах 1994 г. [1].

Через 10 дней после землетрясения на Южные Курилы выехала группа специалистов-геофизиков и океанологов из ряда академических институтов страны, Сахалин гидромета и двух университетов США для сбора натурных данных о проявлениях землетрясения и цунами. Полевые работы проводились с использованием визуального обследования, фотографирования, геодезической и аэрофотосъемки. Наиболее детально были обследованы побережья островов Шикотан и Кунашир с океанской стороны, обращенной к очагу цунами. Результаты анализа полученных данных были опубликованы в серии статей и книг.

Землетрясение и деформации земной поверхности

Возникновение сильного, потенциально цунамигенного землетрясения с $M_s > 7.5$ в районе Южных Курил в течение 1993–1997 гг. ожидалось с позиций долгосрочного и среднесрочного прогноза. К сожалению, прогноз не был осуществлен, так как в марте 1994 г. из-за финансовых трудностей прекратились сейсмологические наблюдения на Южных Курилах, включая службу предупреждения о цунами [2, 3]. Они возобновились лишь спустя 1–2 недели после землетрясения.

Отдельные сильные форшоки фиксировались на островах и судах в районе Южных Курильских островов. Так, по сообщению капитана судна Мельника (приняла В.А. Голова-

нова), 31 августа 1994 г. на судне (43.285° с.ш., 146.010° в.д.) ощущались сильные толчки (моретрясение). По данным с/ст «Южно-Сахалинск» этот форшок ощущался в Малокурильском с интенсивностью 4 балла, в Южно-Курильске – 6 баллов. В каталоге [4] приводятся координаты эпицентра форшока 43.61° с.ш., 146.01° в.д.; глубина очага $H = 82$ км и магнитуда $M_w = 6.1$.

Землетрясение 4 (5) октября 1994 г. оказалось сильнейшим сейсмическим событием в районе Малой Курильской гряды по крайней мере с начала XX столетия, оно сопровождалось масштабными тектоническими проявлениями. На поверхности о. Шикотан образовались многочисленные трещины, максимальная – длиной более 200 м и глубиной несколько метров (рис. 1). Наряду с разрывными нарушениями наблюдались также деформации земной поверхности.

Землетрясение и цунами затронули соседнюю Японию и, соответственно, инициировали ряд интересных исследований японских специалистов, из которых следует отметить [5, 6].

Изучение динамики уровня океана дает возможность оценить масштаб тектонического опускания о. Шикотан в целом. На рис. 2 приведены графики изменения уровня моря (кривая 1) и так называемого приведенного уровня, скорректированного на давление (кривая 2), на станции Малокурильское, которые позволили оценить величину смещения земной поверхности как разность среднесуточных значений уровней за 3 и 5 октября, которая составила 46 см. Расчет средних значений по интервалам времени за 1 сентября – 3 октября и за 5 октября – 8 ноября 1994 г. дал несколько большую величину смещения, равную 55 см. Это связано с тем, что в период с 11 по 18 октября продолжалось опускание о. Шикотан (подъем уровня моря)

Еще одно свидетельство масштабов деформации земной коры, вызванной этим землетрясением, удалось получить, используя глобальную французскую систему спутниковой геодезии DORIS (Doppler Orbitography

* TL/ICMMG Global Historical Tsunami Database. <http://tsun.sssc.ru/gtdb/default.aspx> (accessed 25.08.2025).

(a)



(b)



(c)



Рис. 1. Гигантская оползневая трещина отрыва на севере о. Шикотан, вызванная землетрясением, недалеко от пос. Малокурильское: (a) вид сверху (фото В.М. Кайстренко, 1995 г.), (b) вид изнутри (фото А.О. Бобкова, 1994 г.), (c) снимок Google Earth из космоса (2025 г.).

Fig. 1. Giant landslide rupture in the North of Shikotan Island near the village of Malokurilskoye, caused by the earthquake: (a) top view (photo by V.M. Kaistrenko, 1995), (b) view from the inside (photo by A.O. Bobkov, 1994), (c) Google Earth satellite image (2025).

and Radiopositioning Integrated by Satellite), запущенную в 1990 г. Международное сотрудничество ИМГиГ ДВО РАН по программе DORIS естественным образом включалось в программу Российской академии наук «Космическая геодезия и твердая Земля», раздел «Спутниковый мониторинг крупномасштабных деформаций земной коры и изменчивость уровня в зоне перехода от Азиатского континента к Тихому океану». Согласно межправительственному франко-российскому соглашению, один из радиопередающих маяков этой системы (рабочие частоты 400.25 МГц и 2.03625 ГГц, координаты антенны 47°01'46.876" с.ш., 142°43'0.834" в.д., WGS 84) был установлен на бетонном пилоне крыши ИМГиГ ДВО РАН в г. Южно-Сахалинск (рис. 3), запущен 17.05.1990 г. и работал с небольшими перерывами до февраля 2012 г. [8–10].

В результате землетрясения 4 октября 1994 г. расстояние (по прямой) между маяками в Южно-Сахалинске и на о. Кауаи (22°07'23" с.ш., 159°39'56", Гавайские остро-

ва) увеличилось на 19 см, а сильнейший афтершок 9 октября уменьшил это расстояние на 6 см (решения по данным системы DORIS за сутки) (рис. 4) [10].

Основной толчок землетрясения 4 октября сопровождался необычными явлениями, в частности довольно ярким свечением

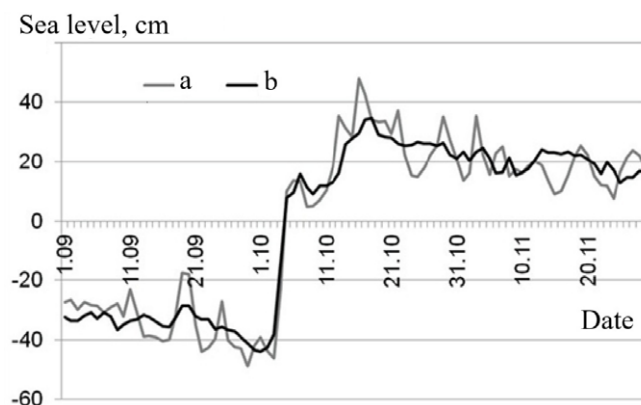


Рис. 2. Вариации среднесуточных значений уровня моря на станции Малокурильское (о. Шикотан) осенью 1994 г. (a – исходный уровень, b – приведенный) [7].

Fig. 2. Variations of the average daily sea level values at the Malokuril'skoye station (Shikotan Island) in the autumn of 1994 (a, baseline; b, corrected) [7].

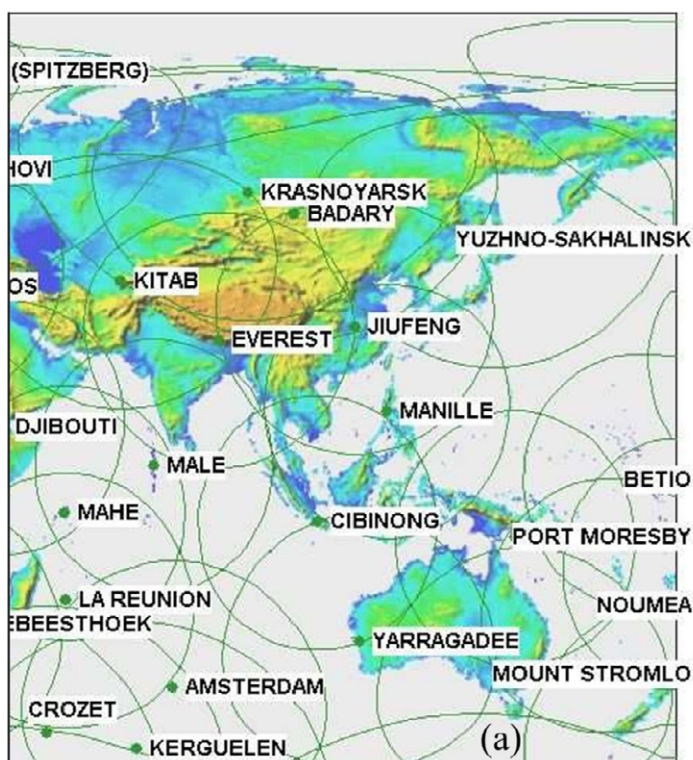


Рис. 3. Часть системы DORIS в Восточном полушарии (a), фото передающей антенны (b) на пилоне крыши ИМГиГ ДВО РАН. Фото В.М. Кайстренко, 2013 г.

Fig. 3. A part of the DORIS system in the Eastern hemisphere (a), the transmitting antenna (b) on the roof pylon of IMGG FEB RAS. Photo by V.M. Kaistrenko, 2013.

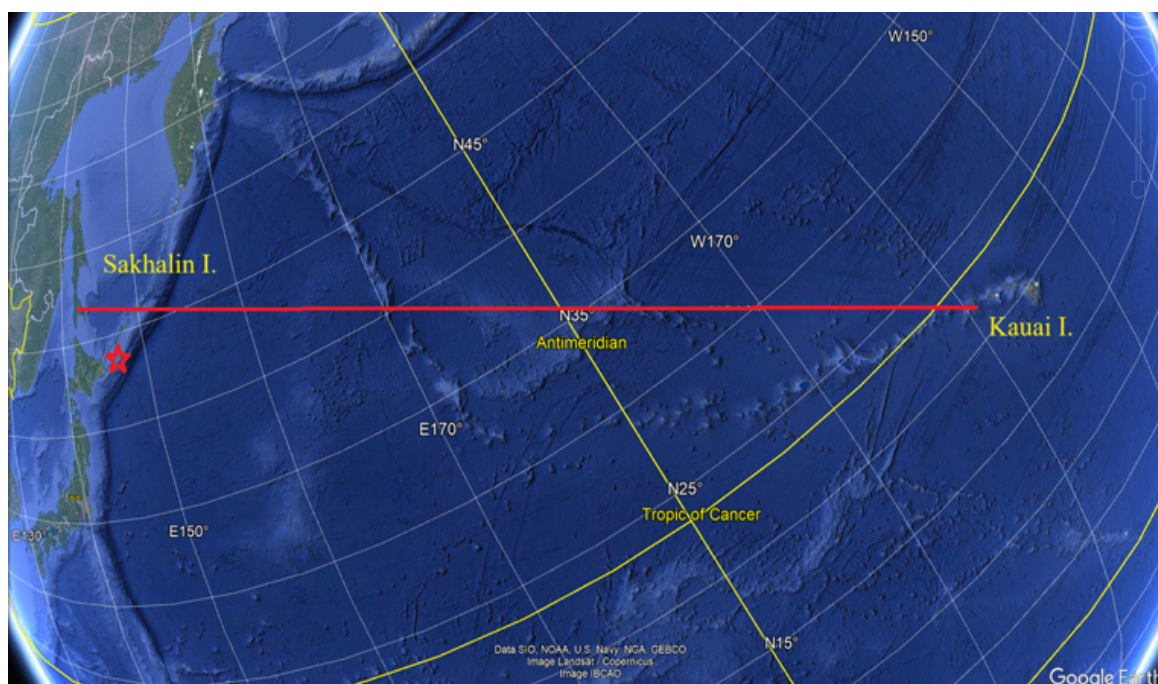


Рис. 4. Позиции маяков DORIS в Южно-Сахалинске (о. Сахалин) и на о. Кауаи (Гавайи) и соединяющая их дуга большого круга. Звездочкой отмечено положение эпицентра землетрясения 4 октября 1994 г.

Fig. 4. The positions of the DORIS beacon in Yuzhno-Sakhalinsk (Sakhalin Island) and on the Island of Kauai (Hawaii), and the great circle arc connecting them. An asterisk marks the location of the earthquake epicenter on October 4, 1994.

со стороны вулкана Менделеева, хорошо заметным в ночное время. Это свечение отметили многие, включая сейсмолога Ирину Мухину, находившуюся на Горячем Пляже, о. Кунашир. Это же свечение со стороны вулкана наблюдала в Отрадном (вблизи Южно-Курильска) сестра Л. Садчиковой, сотрудницы сейсмостанции «Южно-Курильск». М.Н. Цветков, житель Малокурильского (о. Шикотан), отметил яркие сполохи в небе со стороны о. Кунашир. А.В. Цыганов, военный, находясь в пос. Крабозаводском (о. Шикотан), наблюдал молнии со стороны горы Томари (потухший вулкан).

Цунами и моретрясение

Землетрясение 4 октября 1994 г. сопровождалось цунами, высота которого на океанском побережье Южных Курил достигала 10–15(?) м. Волны были зарегистрированы также на Сахалине и во многих пунктах на побережье Тихого океана (в Японии, США, Чили и др.). Сильнейший афтершок 9 октября сопровождался слабым цунами, отчетливо заре-

гистрированным мареографами на Шикотане, Кунашире и севере Хоккайдо (рис. 5; табл. 1).

Служба предупреждения о цунами отреагировала на событие в штатном режиме, хотя во время землетрясения служба базировалась на данных только одной сейсмической станции, «Южно-Сахалинск» (на цунамистанциях «Курильск» и «Шикотан» наблюдения прекратились с марта 1994 г.). Через 8 мин с момента регистрации землетрясения (регламент 10 мин) дежурный сейсмолог передал в Центр цунами Сахалинского УГМС и штаб ГО и ЧС по Сахалинской области сообщение об объявлении тревоги цунами. Однако тревожное сообщение поступило только в Курильский район. На Южных Курильских островах сильные сотрясения вывели из строя аппаратуру связи и оповещения, и тревога цунами объявлялась мэром Южно-Курильска Н.А. Покидиным по факту сильного ощутимого землетрясения. Жертв от цунами не было, поскольку жители, не дожидаясь сигнала тревоги, сразу после землетрясения покидали свои дома и уходили на возвышенные места [1].

Таблица 1. Высоты цунами 1994 г. в ближайших к очагу портах
Table 1. The heights of the 1994 tsunami in the ports closest to the source

Порт	4 октября	9 октября
Малокурильское, о. Шикотан	2.5 м около рыбзавода «Ликвид»*; 3.7 м в долине р. Отрада**	0.11 м* / 08 ч 50 м GMT
Южно-Курильск, о. Кунашир	4.5 м у здания диспетчерской в порту** (рис. 6)	0.10 м* / 11 ч 20 м GMT
Ханасаки, п-ов Немуро, о. Хоккайдо	1.68 м***	0.12 м***
Куширо, о. Хоккайдо	1.03 м***	0.06 м***

* максимальное превышение уровня над мгновенным значением прилива, запись мареографа.

** максимальное превышение относительно среднего уровня.

* maximum exceedance of the level above the instantaneous tide value, tide gauge record.

** maximum exceedance relative to the average sea level.

*** TL/ICMMG, <http://tsun.sccc.ru/gtdb/default.aspx>.

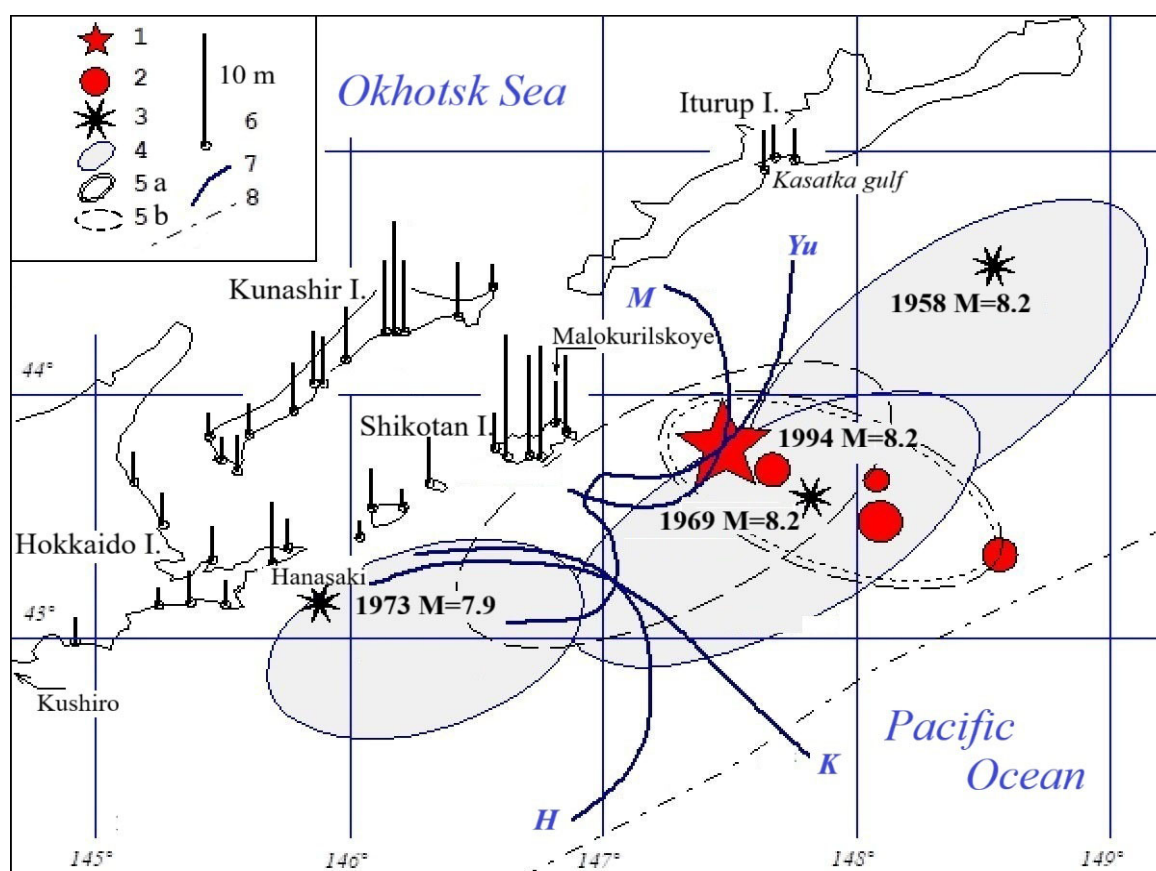


Рис. 5. Область очага Шикотанского цунами 05.10.1994 г. и максимальные наблюдаемые высоты цунами на побережье (по результатам полевого обследования). 1–3 – эпицентры: главного толчка 05.10.1994 г. (1); афтершоков с $M \geq 6.8$ в первые 6 ч после главного толчка (2); сильнейших исторических землетрясений (указаны год и магнитуда землетрясения) (3); 4, 5 – контуры очагов цунами: (4) сильнейших исторических цунами; (5a) очаг цунами 05.10.1994 г., по сильнейшим афтершокам за первые 6 ч; (5b) очаг цунами 05.10.1994 г., по области афтершоков первой недели; 6 – пункты на побережье и максимальные наблюдаемые в них высоты цунами; 7 – обратные изохроны добегания цунами, построенные от ряда пунктов на побережье (Ханасаки *H*, Куширо *K*, Малокурильское *M*, Южно-Курильск *Yu*); 8 – ось глубоководного желоба [11, 12].

Fig. 5. The area of the Shikotan tsunami of October 5, 1994, and the maximum observed tsunami heights on the coast (according to the results of a field survey): 1–3, epicenters: main shock on October 5, 1994 (1); aftershocks with $M \geq 6.8$ in the first 6 hours after the main shock (2); the strongest historical earthquakes (the year and magnitude of the earthquake are indicated) (3); 4 and 5, contours of the tsunami sources: (4) the strongest historical tsunamis; (5a) tsunami of October 5, 1994, according to the strongest aftershocks during the first 6 hours; (5b) tsunami of October 5, 1994, according to the aftershocks area during the first week; 6, coastal positions and the maximum tsunami heights observed at them; 7, inverse isochrons of the tsunami, built from the some coastal positions (Hanasaki *H*, Kushiro *K*, Malokuril'skoye *M*, Yuzhno-Kuril'sk *Yu*); 8, the axis of the deep-sea trough [11, 12].

Активное обследование проявлений этого цунами, одного из сильнейших в этом регионе, начатое в октябре 1994 г., завершилось в 1997 г. подготовкой сводных публикаций [11, 12]. В последующие годы удалось собрать важную дополнительную информацию.

В.А. Сморгчов, в 1994 г. главный инженер рыбколхоза «Родина», дал детальное описание проявлений цунами 1994 г. в порту Южно-Курильска, позволившее потом сделать замеры пиковых значений уровня цунами в районе порта до высоты $h = 4.5$ м относительно среднего многолетнего уровня, дополнительные к сводкам [11, 12]: порт Южно-Курильск, здание диспетчерской (рис. 6), $h = 4.5$ м ($44^{\circ}01.473'$ с.ш., $145^{\circ}51.295'$ в.д.; замер 27.09.2005 в 09:12 местного); пгт Южно-Курильск, стена бывшего стройцеха р/к «Родина», $h = 4.5$ м (замер 27.09.2005 в 10:55 местного).

Двухэтажный деревянный дом диспетчерской в порту Южно-Курильска всплыл на волне цунами, но в итоге опустился практически на свой фундамент с поворотом $\sim 15^{\circ}$ почти без повреждений (рис. 6).

Еще одно дополнительное к сводке [11, 12] сведение о заплеске цунами 1994 г. отно-

сительно среднего многолетнего уровня было получено по сохранившемуся следу в проливе о. Айвазовского, бухте Церковная: $h = 3.5$ м ($43^{\circ}43.72'$ с.ш., $146^{\circ}40.79'$ в.д.).

А.М. Скрыпнюк, в 1990-е годы сотрудник лаборатории цунами, сообщил информацию майора С.Н. Сухарева о проявлениях цунами 1994 г. на заставе в Сентябрьском, бухта Зоркая, север о. Итуруп. Цунами началось ночью с отката, оголившего дно примерно на 200 м. При этом баржа-лесовоз, с которой шла разгрузка леса, села на дно. Затем последовал медленный накат, который вынес баржу на берег, не вызвав ни размывов, ни разрушений. Уже выгруженные бревна цунами вынесло на берег на высоту до 3–4 м и на расстояние до 30 м. Важно, что эта информация позволила продолжить ряд данных обо всех сильных цунами в Сентябрьском, начиная с сильного события 1958 г., без пропусков.

Всего было сделано 180 замеров высот заплесков цунами вдоль побережья Южных Курильских островов.

Цунами 4(5) октября 1994 г. нанесло серьезный ущерб флоту и береговой инфраструктуре островов (табл. 2; рис. 6–8),



Рис. 6. Порт Южно-Курильск. Двухэтажный дом диспетчерской, сдвинутый волной цунами в 1994 г. Фото И.С. Прядченко, осень 2014 г.

Fig. 6. Port of Yuzhno-Kurilsk. A two-storey office building moved by the 1994 tsunami wave. Photo by I.S. Pryadchenko, autumn 2014.

несравнимый, однако, с масштабом ущерба от землетрясения [1].

Землетрясение 4(5) октября 1994 г. сопровождалось специфическими эффектами на поверхности океана (моретрясение) [14]. Все суда, находившиеся в регионе, испытывали ударное воздействие по корпусу. Все отмечали низкий гул, шедший из глубины. В течение двух-трех минут наблюдались сильная вибрация и сотрясения, судно подбрасывало, как на камнях, было трудно устоять на ногах. Появлялось опа-

сение, что судно развалится. Почти всюду отмечалась приповерхностная кавитация, похожая на «кипение» воды с образованием фонтанчиков до 15 см высотой с отрывающимися каплями. В двух местах штиль сменился на быстрое развитие зыби высотой до 2 м, потом снова наступил штиль. На ряде судов моретрясение вызвало продольные колебания «нос – корма», которые закончились вместе с тряской.

На нескольких судах ударное воздействие моретрясения привело к критическим

Таблица 2. Ущерб от цунами 4(5) октября 1994 г., по данным администрации Южно-Курильска

Table 2. The damage caused by the tsunami of October 4(5), 1994, according to the data of Yuzhno-Kurilsk government

Объект	Описание	Ущерб (млн руб. в ценах 1994 г.)
Мосты	4 разрушены полностью, 2 частично	2214
Водопропускные сооружения		440
Автомобильные дороги	Трещины, размывы	2195
Рыболовный флот	На Шикотане одно судно затонуло, 3 выброшены на берег. На Кунашире одно судно затонуло, 3 подняты волной на причал.	8586
Гидротехнические сооружения, пирсы		8600



Рис. 7. Улица в прибрежной части пос. Южно-Курильск после землетрясения и цунами, октябрь 1994 г. Фото Г.Н. Березюка [13].

Fig. 7. A street in the coastal part of Yuzhno-Kurilsk settlement after the earthquake and tsunami, October 1994. Photo by G.N. Bereznyuk [13].

повреждениям. На плавба-
зе «Советское Заполярье»
(поз. 11 на рис. 9) лопнули
аммиачные трубы судово-
го холодильника. После
устранения поломки плав-
база трое суток «проветри-
валась» на полном ходу.
На РТМС «Пелагиаль»
(поз. 12) треснула маслян-
ная труба на главном дви-
гателе (давление 360 атм.),
что привело к мгновенно-
му заполнению всего ма-
шинного отделения взры-
воопасным аэрозолем.
На ПСКР «Леднев» лопну-
ли воздушные и паровые
трубопроводы. На СТР
«Сердеж» (поз. 16) и СТР
«Саломатинск» (поз. 13)
ударное воздействие сдви-
нуло главный и вспомога-
тельные двигатели с фун-
даментов, сорвав часть
болтов крепления, и суда
потеряли ход. Из-за воз-
действия ударной волны
в воде по всей поверх-
ности бухты Крабовой
(о. Шикотан) сразу после
главного толчка всплыла
оглушенная рыба.

Моретрясения от аф-
тершоков отмечались на
судах еще несколько раз
до ноября, но проявления
были значительно слабее.
Разнообразные эффекты
моретрясений интересны
с научной точки зрения,
но почти не изучены. Ис-
следования этих эффектов
важны для приложений,
поскольку некоторые из
очаговых процессов в оке-
ане представляют серьез-
ную опасность для море-
плавания [13].



Рис. 8. Южно-Курильск. Одинокий дом, перенесенный волной на расстояние около 500 м. Фото А. Ключкова, 18.10.1994.

Fig. 8. A Yuzhno-Kurilsk area. A lonely house carried by the tsunami wave to a distance of about 500 m. Photo by A.A. Klochkov, October 18, 1994.

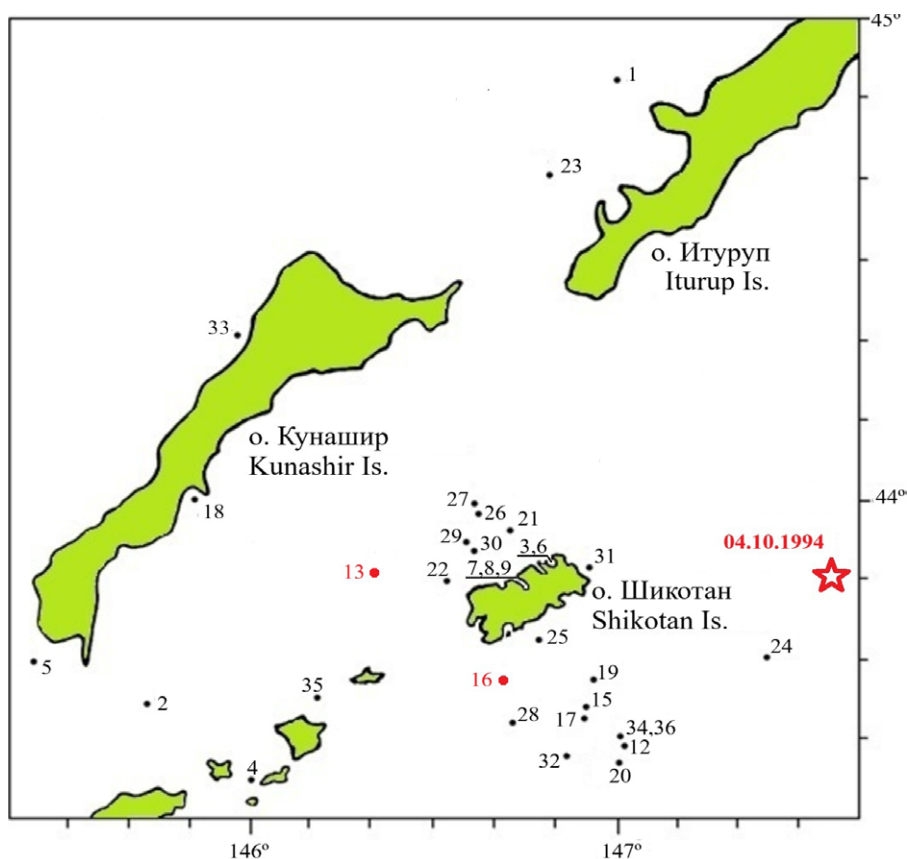


Рис. 9. Позиции судов, попавших в моретрясение 4(5) октября 1994 г. [14]. Красным цветом отмечены позиции судов, получивших критические повреждения. Звездочкой отмечено положение эпицентра землетрясения 4 октября 1994 г.

Fig. 9. Positions of vessels caught in the seaquake on October 4(5), 1994 [14]. The positions of the critically damaged vessels are marked in red. An asterisk marks the location of the earthquake epicenter on October 4, 1994.

Отложения Шикотанского цунами 1994 г.

При оценке возможного масштаба и частоты проявления сильных цунами в прошлом большое значение имеет информация о сохранности следов цунами в геологических разрезах, поэтому для интерпретации данных по отложениям палеоцунами важно изучать особенности осадконакопления современных крупных событий. На Курильских о-вах такие работы были выполнены после Шикотанского цунами 1994 г. [15, 16], Симуширских цунами 2006–2007 гг. [17–19] и после Тохоку цунами 2011 г. на островах Кунашир и Шикотан [20, 21].

Изучение покровных отложений цунами началось спустя год после события 1994 г. Осадки цунами были найдены на побережье о. Шикотан – в юго-западной и центральной части бухты Димитрова и бухте Церковная [22]. В бухте Димитрова высота заплеска цунами варьировала от 5.3 до 9.8 м, зона затопления достигала 600 м [11, 23]. Небольшие пятна пляжного песка были обнаружены на некотором удалении от береговой линии, более выраженное (мощностью до 20 см) имело размер до 10 м, за пределами этой зоны песок покрывал траву слоем менее 3 см и встречался до высо-

ты 2.8 м над уровнем моря. В бухте Церковная песок залегал небольшими пятнами на мористом склоне штормового вала и в понижениях между древними штормовыми валами [22].

Комплексные работы по изучению отложений современных цунами и палеособытий на Южных Курильских островах начались в 2000-х годах и продолжались несколько лет. Это дало возможность оценить сохранность следов цунами в геологических разрезах [15, 16, 24]. Несмотря на то что цунами 1994 г. было одним из наиболее сильных событий на Курильских о-вах за исторический период (TL/ICMMG, <http://tsun.sssc.ru/gtdb/default.aspx>), «цунамигенные» пески были найдены в разрезах торфяников лишь на побережье нескольких бухт на тихоокеанской стороне островов Шикотан (бухты Димитрова, Агатовая, Церковная и Малая Церковная, рис. 10), Танфильева, Зеленый и в Южно-Курильской бухте на о. Кунашир.

К цунами 1994 г. отнесена также линза илов, найденная в верхней части разрезов торфяников на берегу закрытой бухты Крабовая на западном побережье о. Шикотан [21]. На тихоокеанской стороне о. Итуруп (зал. Касатка) отложения цунами 1994 г. не обнаружены [26]. Во всех бухтах цунамигенные отложения 1994 г. перекрыты слоем дерна или моховой подушки и залегают линзами или прослоями, которые прослеживаются вглубь суши на небольшие расстояния. Мощность прослоев не превышает 2 см (рис. 11). Зона осадконакопления не достигала границы зоны затопления и прослеживалась на удалении 130 до 470 м от уреза моря. Наиболее часто осаждение и захоронение отложений происходило в нижней части заболоченных долин в небольших понижениях за древними штормовыми валами.

Цунамигенные пески по гранулометрическому и минеральному составу отличаются от осадков осушки, пляжа и

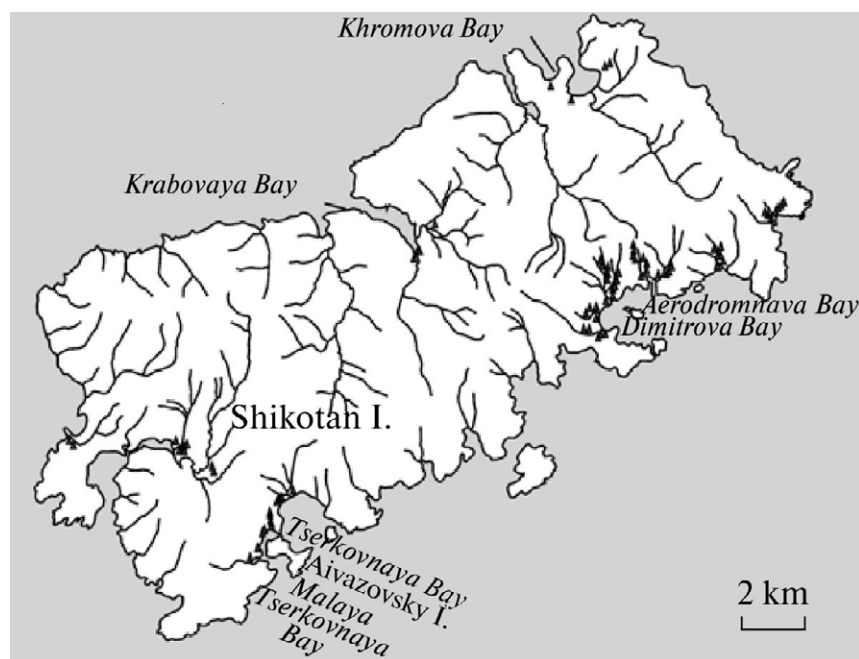


Рис. 10. Остров Шикотан [24].

Fig. 10. Shikotan Island [24].

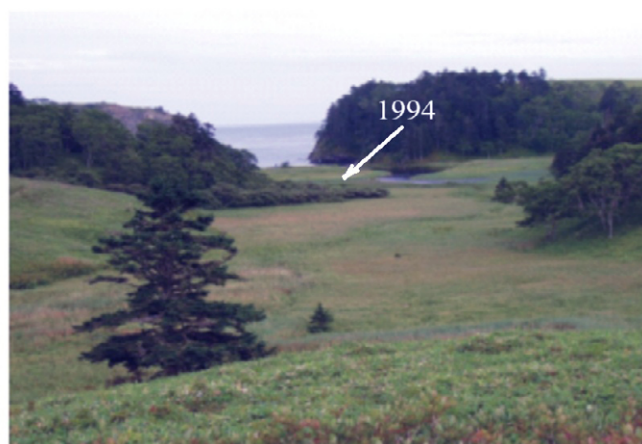


Рис. 11. Отложения цунами 1994 г. в разрезе торфяника бухты Аэродромная (север бухты Димитрова).

Фото Н.Г. Разжигаевой, 2004.

Fig. 11. Deposits of the 1994 tsunami in the section of the peat bog in the Aerodromnaya bay (Northern part of the Dimitrov bay).

Photo by N.G. Razjigaeva, 2004.

штормовых валов. Отложения цунами представляют собой смесь материалов, перенесенных волной из разных источников. Поступление материала шло в основном с подводного берегового склона и в меньшей степени – за счет эрозии древних штормовых валов и пляжа, иногда захватывался материал со дна небольших береговых озер, которые попадали в зону затопления. Сравнение гранулометрического состава осадков цунами 1994 г. и Тохоку цунами в бухте Малая Церковная показывает, что в осадках цунами 1994 г. больше крупных фракций и, как правило, они полимодальные. Это связано с тем, что проявления цунами 1994 г. были более сильными и вызвали большую эрозию, материал поставлялся из разных источников, в том числе перерабатывались склоновые отложения. Несмотря на то что отложения цунами и сильных штормов имеют одни и те же источники, их вклад в формирование осадков существенно различен: в отличие от штормов, цунами захватывает больше материала с подводного берегового склона. Как правило, штормовые осадки существенно грубее, часто содержат примесь гравия (до 66 %), практически не включают алеврита, присутствующего в осадках цунами (до 33 %), сортировка материала штормов лучше, чем осадков цунами [27]. Такая же закономерность была установлена при сравнении характеристик осадков цунами 1993 г. и шторма, связанного с прохождением в 1959 г. тайфуна Миякодзима (Miyakojima) на юго-западном побережье Хоккайдо [28].

Отложения цунами включают морские и пресноводные диатомеи разной экологии [15]. Среди морских форм преобладают солоновато-водные и морские сублиторальные виды, перенесенные с подводного берегового склона; неритические и океанические диатомеи встречаются в небольшом количестве. На участках берега, где происходила активная эрозия, створки сильно изломаны. Видовой состав диатомей свидетельствует о том, что волна цунами захватывала не только материал из прибрежной зоны, но и в ряде случаев воду и осадки береговых озер и створки раковин из приустьевой части ручьев, которые затопливались во время цунами.

Находки осадков цунами 1994 г. на ряде участков побережья, где не проводилось обследование сразу после цунами, позволили оценить параметры заплесков волн. Так, на побережье бухты Агатова под дерном обнаружен слой мелкозернистого хорошо сортированного песка, прослеженный до 170 м вглубь суши. Далее по профилю найдено большое бревно, вследствие чего минимальный заплеск цунами оценен в ~5 м, зона затопления имела ширину до 250 м. На восточном побережье о. Танфильева цунамигенный песок обнаружен на удалении вглубь суши до 210 м, высота заплеска здесь была до 2.5 м. Высота цунами на побережье прол. Танфильева была также около 2–2.5 м, зона затопления 200–250 м. Полученные оценки сходны с результатами замеров параметров заплеска, проведенных во время

обследования сразу же после цунами: на островах Зеленый и Юрий высота заплесков достигала 3.5 м, зона затопления – 200 м [12].

Изучение отложений цунами 1994 г. имеет большое значение для реконструкции палеоцунами и понимания пространственных масштабов проявления цунами, проходивших в прошлом, оценки их заплесков и повторяемости. Другие региональные цунами в инструментальный период наблюдения, имевшие меньший масштаб, практически не отражены в геологической летописи, несмотря на высокие заплески на отдельных участках побережья (TL/ICMMG, <http://tsun.sccc.ru/gtdb/default.aspx>). В геологических разрезах ниже отложений цунами 1994 г. встречаются 1-2 прослоя песков исторического возраста, глубже выходит слой мегацунами XVII в., ярко проявившегося и на побережье Восточного Хоккайдо [28–30].

На всех обследованных участках побережья Южных Курил отложения цунами 1994 г. и предыдущих исторических событий имеют большое сходство по составу и отличаются от других фаций прибрежно-морской зоны – осадков пляжа, осушки, береговых валов и т.п. Это может свидетельствовать о подобии ситуаций на конкретных участках побережья при прохождении цунами, близких по интенсивности и захватывающих материал из одних источников.

Следует отметить, что отложения палеоцунами, которые встречаются в разрезах тихоокеанской стороны Малой Курильской гряды, лучше выражены, чем отложения цунами 1994 г., имеют большую мощность и образуют непрерывные покровы, протягивающиеся вглубь суши. Предполагается, что палеоцунами, оставившие выраженные покровы отложений, были гораздо более сильными событиями, чем исторические цунами.

Заключение

4(5) октября 1994 г. вблизи о. Шикотан (Южные Курильские острова) произошло одно из наиболее значимых цунамигенных землетрясений в истории этого региона. Транспортная изолированность Южных Курил и невозможность быстро восстановить многочисленные разрушенные здания в условиях

приближающейся зимы заставили принять решение об эвакуации населения. Шикотан покинуло около 70 % жителей острова. Масштаб разрушений и гибель людей в условиях бедственной ситуации в стране, характерной для 1990-х годов, вызвали резонанс в обществе в целом и научной среде в частности, а также в средствах массовой информации. Итогом уже через месяц стало принятие Правительством РФ Постановления № 1207 «Развитие Федеральной системы сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений», которое сыграло важную роль в возрождении, расширении и развитии сети сейсмических наблюдений и службы предупреждения о цунами в стране. На особую роль землетрясения и цунами 1994 г. в жизни Дальнего Востока страны и науках о Земле указывает также закономерное появление первых обзорных публикаций уже к концу 1994 г., а в последующем – приуроченных к годовщинам этого события [13, 31, 32] (приложение к сборнику статей [31] содержит большой объем иллюстративного материала о проявлениях землетрясения и цунами 1994 г.).

Для сейсмического режима района Малой Курильской гряды характерно чередование периодов затишья и активности. Событие 4(5) октября 1994 г. было завершающим в цепочке сильных цунамигенных землетрясений с очагами в этом районе, стартовавшей в 1973 г. событием $M = 7.9$ (рис. 5). Этой цепочке событий в свою очередь предшествовал период длительного сейсмического затишья, наступившего после цунамигенного землетрясения 22.03.1894 г., $M = 8.8$ [4]. После события 1994 г. и до сих пор в этом районе снова наблюдается период относительного сейсмического затишья (отсутствие сильных цунамигенных землетрясений).

Изучение отложений цунами 1994 г. показало, что даже такое крупное региональное событие будет иметь фрагментарную запись в геологических разрезах и не совсем полно отражать весь масштаб этого события. Это следует учитывать при оценке древних событий на основе их записей в разрезах и реконструкции повторяемости мегацунами, имевших трансокеанический масштаб, поскольку данные об исторических и палеоцунами являются одной из основ для получения объективных оценок цунамиопасности в регионе.

Список литературы

- Иващенко А.И., Гусяков В.К., Джумагалиев В.А., Йех Г., Жукова Л.Д., Золотухина Н.Д., Кайстренко В.М., Като Л.Н., Ключков А.А., Королев Ю.П. и др. **1996**. Шикотанское цунами 5 октября 1994 г. *Доклады АН*, 348(4): 532–538.
- Кособоков В.Г., Шебалин П.Н., Тихонов И.Н., Хили Дж.Х., Дьюи Дж.У. **1994**. Заблаговременный среднесрочный прогноз Шикотанского землетрясения 4 октября 1994 г. В кн.: *Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений: Информ.-аналит. бюл. ФССН*. М.: ОИФЗ РАН, с. 71–73.
- Федотов С.А., Шумилина Л.С., Чернышева Г.В., Потапова О.В. **1994**. Долгосрочный сейсмический прогноз и развитие очага Шикотанского землетрясения 4 октября 1994 г. В кн.: *Федеральная система сейсмологических наблюдений и землетрясений: Информ.-аналит. бюл. ФССН*. М.: ОИФЗ РАН, с. 57–67.
- Андреева М.Ю., Ким Ч.У. **2012**. *Землетрясения Курило-Камчатского региона (1737–2009 гг.)*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 384 с.
- Tanioka Y., Ruff L., Satake K. **1995**. The great Kurile earthquake of October 4, 1994 tore the slab. *Geophysical Research Letters*, 22(13): 1661–1664. doi:10.1029/95GL01656
- Hirata K., Satake K., Tanioka Y., Hasegawa Y. **2009**. Variable tsunami sources and seismic gaps in the Southernmost Kuril Trench: A review. *Pure and Applied Geophysics*, 166: 77–96. https://doi.org/10.1007/978-3-0346-0064-4_5
- Седаева О.С., Семакин В.П., Шевченко Г.В. **2012**. Вертикальные смещения земной поверхности по уровенным данным в районе Южных Курильских островов в связи с Шикотанским землетрясением 4 (5).10.1994 г. *Тихоокеанская геология*, 31(6): 79–86.
- Willis P., Boucher C., Fagard H., Garayt B., Gobinddass V-L. **2010**. Contributions of the French Institut Geographique National (IGN) to the International DORIS Service. *Advances in Space Research*, 45(12): 1470–1480. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.09.019>
- Кузин С.П., Ораевская С.П., Сорокин Н.А. **2009**. DORIS – составная компонента глобальной системы геодезических наблюдений. *Геодезия и картография*, 5: 17–22.
- Kaistrenko V., Vasilenko N., Willis P. **1998**. The great Shikotan earthquake and tsunami October 4, 1994 and Earth crust deformation detected by Topex-Poseidon. *Proceedings of Int. Conf. DORIS DAYS, CNES, Toulouse, France, 27–29 April, 1998*.
- Кайстренко В.М., Гусяков В.К., Джумагалиев В.А., Дыхан Г.С., Иващенко А.И., Йех Г., Като Л.Н., Ключков А.А., Пелиновский Е.Н., Предтеченский Г.С., Сасорова Е.В., Титов В.В., Харламов А.А., Шельтинг Е.В. **1997**. Проявление цунами 4 октября 1994 года на Шикотане. В кн.: Сергеев К.Ф. (ред.) *Проявления конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 годов на побережье России*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, с. 55–73. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; т. 8).
- Королев Ю.П., Жукова Л.Д., Золотухина Н.Д., Ключков А.А., Куликов Е.А., Куркин В.Н., Кругляков А.А., Левин Б.В., Поплавский А.А., Терентьев Н.С. **1997**. Проявления цунами 4 октября 1994 года на побережье Курильских островов. В кн.: Сергеев К.Ф. (ред.) *Проявления конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 годов на побережье России*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, с. 74–92. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; т. 8).
- Осень испытаний. К 30-летию Шикотанского землетрясения 1994 года*. URL: <https://giaso.ru/scientific-work/exhibition/autumn-trials.html> (дата обращения: 15.09.2025).
- Кайстренко В.М. **1997**. Моретрясения 4 октября 1994 года. В кн.: Сергеев К.Ф. (ред.) *Проявления конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 годов на побережье России*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, с. 103–104. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; т. 8).
- Разжигаета Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А., Ильев А.Я., Кайстренко В.М. **2007**. Осадки цунами Шикотанского землетрясения 1994 г. *Океанология*, 47(4): 622–630. <https://doi.org/10.1134/S0001437007040157>
- Разжигаета Н.Г., Ганзей Л.А., Кайстренко В.М., Гребенникова Т.А., Харламов А.А. **2015**. Осадки Шикотанского цунами 1994 г. В кн.: И.Н. Тихонов, Г.В. Шевченко (сост.) *Шикотанское землетрясение и цунами 4(5) октября 1994 года. Хроника событий, анализ последствий и современное состояние проблемы*. Изд. 2-е, доп. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, с. 78–82.
- MacInnes B.T., Bourgeois J., Pinegina T.K., Kravchunovskaya E.A. **2009**. Tsunami geomorphology: Erosion and deposition from the 15 November 2006 Kuril Island tsunami. *Geology*, 37: 995–998. doi:10.1130/G30172A.1
- MacInnes B.T., Pinegina T.K., Bourgeois J., Razhigaeva N.G., Kaistrenko V.M., Kravchunovskaya E.A. **2009**. Field survey and geological effects of the 15 November 2006 Kuril tsunami in the Middle Kuril Islands. In: Cummins P.R., Satake K., Kong L.S.L. (eds) *Tsunami science four years after the 2004 Indian Ocean tsunami. Pageoph Topical Volumes*. Basel: Birkhäuser Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-0346-0064-4_2
- MacInnes B., Kravchunovskaya E., Pinegina T., Bourgeois J. **2016**. Paleotsunamis from the central Kuril Islands segment of the Japan-Kuril-Kamchatka subduction zone. *Quaternary Research*, 86(1): 54–66. <https://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2016.03.005>

20. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Ivanova E.D., Kharlamov A.A., Kaistrenko V.M., Shishkin A.A. **2013**. Coastal sedimentation associated with the Tohoku tsunami of 11 March 2011 in South Kuril Islands, NW Pacific Ocean. *Pure and Applied Geophysics*, 170: 1081–1102. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0478-4>
21. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Ivanova E.D., Kharlamov A.A., Kaistrenko V.M., Arslanov Kh.A., Chernov S.B. **2014**. The Tohoku tsunami of 11 March 2011: The key event to understanding tsunami sedimentation on the coasts of closed bays of the Lesser Kuril Islands. *Tsunamis in the Pacific Ocean: 2011–2012. Pure and Applied Geophysics*, 171(12): 3307–3328. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0794-y>
22. Иванов В.В. **1997**. Исследование влияния цунами на осадконакопление по следам цунами 4 октября 1994 года. В кн.: Сергеев К.Ф. (ред.) *Проявления конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 годов на побережье России*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, с. 119–128. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; т. 8).
23. Yeh H., Titov V., Gusiakov V., Pelinovsky E., Khrumushin V., Kaistrenko V. **1995**. The 1994 Shikotan earthquake tsunamis. *Pure and Applied Geophysics*, 144(3–4): 855–874. <https://doi.org/10.1007/BF00874398>
24. Кайстренко В.М. **2019**. Особенности использования данных о палеоцунами для оценок цунамиопасности. *Геосистемы переходных зон*, 3(4): 403–416. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.403-416>
25. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А., Кайстренко В.М., Арсланов Х.А., Горбунов А.О. **2012**. Проявление палеоцунами на Малой Курильской гряде в голоцене. *Тихоокеанская геология*, 31(6): 48–56.
26. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А., Лоскутов А.В., Булгаков Р.Ф. **2023**. Геологические свидетельства проявления сильных цунами на побережье острова Итуруп (Курильские острова) за последние 3500 лет. *Геосистемы переходных зон*, 7(4): 357–374. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.357-374>
27. Ганзей Л.А., Разжигаева Н.Г., Харламов А.А., Ивельская Т.Н. **2010**. Экстремальные шторма 2006–2007 гг. на о. Шикотан: воздействие на прибрежный рельеф и осадки. *Океанология*, 50(3): 458–467.
28. Nanayama F., Shigeno K., Satake K., Shimokawa K., Koitabashi S., Miyasaka S., Ishii M. **2000**. Sedimentary differences between the 1993 Hokkaido-nansei-oki tsunami and the 1959 Miyakojima typhoon at Taisei, southwestern Hokkaido, northern Japan. *Sedimentary Geology*, 135: 255–264. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(00\)00076-2](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00076-2)
29. Nanayama F. **2021**. Evidence of giant earthquakes and tsunamis of the seventeenth-century type along the southern Kuril subduction zone, eastern Hokkaido, northern Japan: a review. In: Dilek Y., Ogawa Y., Okubo Y. (eds) *Characterization of modern and historical seismic-tsunami events, and their global-societal impacts*. Geological Society, London, Special Publications, 501: 131–157. <https://doi.org/10.1144/SP501-2019-99>
30. Atwater B.F., Furakawa R., Hemphill-Haley E., Ikeda Y., Kashima K., Kawase K., Kelsey H.M., Moore A.L., Nanayama F., Nishimura Y., Odagiri S., Ota Y., Park S.-C., Satake K., Sawai Y., Shimokawa K. **2004**. Seventeenth-century uplift in eastern Hokkaido, Japan. *The Holocene*, 14: 487–501. <https://doi.org/10.1191/0959683604hl726rp>
31. *Шикотанское землетрясение и цунами 4 (5) 1994 года. Хроника событий, анализ последствий и современное состояние проблемы*: сб. ст. **2015**. Изд. 2-е, доп. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 128 с.
32. Сидорин А.Я. **2020**. Шикотанское землетрясение 1994 г. и его влияние на развитие российской сейсмологии. *Сейсмические приборы*, 56(1): 76–84. <https://doi.org/10.21455/si2020.1-7>

References

1. Ivashchenko A.I., Gusiakov V.K., Dzhumagaliev V.A., Yeh G., Zhukova L.D., Zolotukhina N.D., Kaistrenko V.M., Kato L.N., Klochkov A.A., Korolev Yu.P., et al. **1996**. The Shikotan tsunami of October 5, 1994. *Transactions (Doklady of the Russian Academy of Sciences). Earth Science Sections*, 348(4): 693–699.
2. Kossobokov V.G., Shebalin P.N., Tikhonov I.N., Healy J.H., Dewey J.W. **1994**. [Advance medium-term forecast of the Shikotan earthquake of October 4, 1994]. In: *Federal System of Seismological Observations and Earthquake Forecasting: Information and Analytical Bulletin of the FOEF*. Moscow: OIFE RAS, p. 71–73. (In Russ.).
3. Fedotov S.A., Shumilina L.S., Chernysheva G.V., Potapova O.V. **1994**. [Long-term seismic forecast and development of the Shikotan earthquake of October 4, 1994]. In: *Federal System of Seismological Observations and Earthquake Forecasting: Information and Analytical Bulletin of the FOEF*. Moscow: OIFE RAS, p. 57–67. (In Russ.).
4. Andreeva M.Yu., Kim Ch.U. **2012**. *Earthquakes of the Kuril-Kamchatka region (1737–2009)*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, 384 p. (In Russ.).
5. Tanioka Y., Ruff L., Satake K. **1995**. The great Kurile earthquake of October 4, 1994 tore the slab. *Geophysical Research Letters*, 22(13): 1661–1664. [doi:10.1029/95GL01656](https://doi.org/10.1029/95GL01656)
6. Hirata K., Satake K., Tanioka Y., Hasegawa Y. **2009**. Variable tsunami sources and seismic gaps in the Southernmost Kuril Trench: A review. *Pure and Applied Geophysics*, 166: 77–96. https://doi.org/10.1007/978-3-0346-0064-4_5
7. Sedaeva O.S., Semakin V.P., Shevchenko G.V. **2012**. Vertical displacements of the Earth's surface from level

- data in the South Kuril Islands in relevance to the Shikotan earthquake of October 4(5), 1994. *Russian Journal of Pacific Geology*, 31(6): 79–86. (In Russ.).
8. Willis P., Boucher C., Fagard H., Garayt B., Gobindass V.-L. **2010**. Contributions of the French Institut Géographique National (IGN) to the International DORIS Service. *Advances in Space Research*, 45(12): 1470–1480. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.09.019>
 9. Kuzin S.P., Oraevskaya S.P., Sorokin N.A. **2009**. [DORIS, an integral component of the global geodetic observation system]. *Geodesy and Cartography*, 5: 17–22. (In Russ.).
 10. Kaistrenko V., Vasilenko N., Willis P. **1998**. The great Shikotan earthquake and tsunami October 4, 1994 and Earth crust deformation detected by Topex-Poseidon. *Proceedings of Int. Conf. DORIS DAYS, CNES, Toulouse, France*, 27–29 April, 1998.
 11. Kaistrenko V.M., Gusiakov V.K., Dzhumagaliev V.A., Dykhan G.S., Ivashchenko A.I., Yeh G., Kato L.N., Klochkov A.A., Pelinovsky E.N., Predtechensky G.S., Sasorova E.V., Titov V.V., Kharlamov A.A., Shelting E.V. **1997**. Tsunami manifestation of October 4, 1994 in Shikotan Island. In: Sergeev K.F. (ed.) *Concrete tsunami manifestation. Tsunamis of 1993 and 1994 on the Russian coast*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, p. 55–73 (Geodynamics of tectonosphere of the Pacific-Eurasia conjunction zone; vol. 8). (In Russ.).
 12. Korolev Yu.P., Zhukova L.D., Zolotukhina N.D., Klochkov A.A., Kulikov E.A., Kurkin V.N., Krugliakov A.A., Levin B.V., Poplavsky A.A., Terentyev N.S. **1997**. The aftereffects of 4 October 1994 tsunami on the shore of Kuril Islands. In: Sergeev K.F. (ed.) *Concrete tsunami manifestation. Tsunamis of 1993 and 1994 on the Russian coast*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, p. 74–92. (Geodynamics of tectonosphere of the Pacific-Eurasia conjunction zone; vol. 8). (In Russ.).
 13. [Autumn of trials: On the 30th anniversary of the 1994 Shikotan earthquake]. URL: <https://giaso.ru/scientific-work/exhibition/autumn-trials.html> (accessed 15.09.2025). (In Russ.).
 14. Kaistrenko V.M. **1997**. The seaquake of 4 October, 1994. In: Sergeev K.F. (ed.) *Concrete tsunami manifestation. Tsunamis of 1993 and 1994 on the Russian coast*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, p. 103–104. (Geodynamics of tectonosphere of the Pacific-Eurasia conjunction zone; vol. 8). (In Russ.).
 15. Razzhigaeva N.G., Ganzeyi L.A., Grebennikova T.A., Kharlamov A.A., Il'ev A.Y., Kaistrenko V.M. **2007**. Tsunami deposits of the Shikotan earthquake of 1994. *Oceanology*, 47: 579–587. <https://doi.org/10.1134/S0001437007040157>
 16. Razzhigaeva N.G., Gansey L.A., Kaistrenko V.M., Grebennikova T.A., Kharlamov A.A. **2015**. [Sediments of the 1994 Shikotan tsunami]. In: I.N. Tikhonov, G.V. Shevchenko (comp.). *The 4(5) October 1994 Shikotan earthquake and tsunami. Chronicle of events, analysis of impact and current state of the art*. Special issue. 2^d ed., expanded. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, p. 78–82. (In Russ.).
 17. MacInnes B.T., Bourgeois J., Pinegina T.K., Kravchunovskaya E.A. **2009**. Tsunami geomorphology: Erosion and deposition from the 15 November 2006 Kuril Island tsunami. *Geology*, 37: 995–998. doi:10.1130/G30172A.1
 18. MacInnes B.T., Pinegina T.K., Bourgeois J., Razhigaeva N.G., Kaistrenko V.M., Kravchunovskaya E.A. **2009**. Field survey and geological effects of the 15 November 2006 Kuril tsunami in the Middle Kuril Islands. In: Cummins P.R., Satake K., Kong L.S.L. (eds) *Tsunami science four years after the 2004 Indian Ocean tsunami. Pageoph Topical Volumes*. Basel: Birkhäuser Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-0346-0064-4_2
 19. MacInnes B., Kravchunovskaya E., Pinegina T., Bourgeois J. **2016**. Paleotsunamis from the central Kuril Islands segment of the Japan-Kuril-Kamchatka subduction zone. *Quaternary Research*, 86(1): 54–66. <https://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2016.03.005>
 20. Razhigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Ivanova E.D., Kharlamov A.A., Kaistrenko V.M., Shishkin A.A. **2013**. Coastal sedimentation associated with the Tohoku tsunami of 11 March 2011 in South Kuril Islands, NW Pacific Ocean. *Pure and Applied Geophysics*, 170: 1081–1102. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0478-4>
 21. Razhigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Ivanova E.D., Kharlamov A.A., Kaistrenko V.M., Arslanov Kh.A., Chernov S.B. **2014**. The Tohoku tsunami of 11 March 2011: The key event to understanding tsunami sedimentation on the coasts of closed bays of the Lesser Kuril Islands. *Tsunamis in the Pacific Ocean: 2011–2012. Pure and Applied Geophysics*, 171(12): 3307–3328. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0794-y>
 22. Ivanov V.V. **1997**. The investigation of tsunami action on sedimentation by using the traces of October 4, 1994 tsunami. In: Sergeev K.F. (ed.) *Concrete tsunami manifestation. Tsunamis of 1993 and 1994 on the Russian coast*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, p. 119–128. (Geodynamics of tectonosphere of the Pacific-Eurasia conjunction zone; vol. 8). (In Russ.).
 23. Yeh H., Titov V., Gusiakov V., Pelinovsky E., Khrumushin V., Kaistrenko V. **1995**. The 1994 Shikotan earthquake tsunamis. *Pure and Applied Geophysics*, 144(3–4): 855–874. <https://doi.org/10.1007/BF00874398>
 24. Kaistrenko V.M. **2019**. Peculiarity of using the paleotsunami data for the tsunami hazard estimation. *Geosystems of Transition Zones*, 3(4): 403–416. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.403-416>
 25. Razzhigaeva N.G., Ganzei L.A., Grebennikova T.A., Kharlamov A.A., Kaistrenko V.M., Arslanov Kh.A., Gorbunov A.O. **2012**. Manifestation of Holocene Tsunamis on the Lesser Kuril Ridge. *Russian Journal of Pacific Geology*, 6(6): 448–456.

26. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Kharlamov A.A., Loskutov A.V., Bulgakov R.F. **2023**. Geological evidence of strong tsunami manifestations on the Iturup Island (Kuril Islands) at last 3500 years. *Geosystems of Transition Zones*, 7(4): 357–374. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.357-374>
27. Ganzey L.A., Razzhigaeva N.G., Harlamov A.A., Ivel'skaya T.N. **2010**. Extreme storms in 2006–2007 on Shikotan Island and their impact on the coastal relief and deposits. *Oceanology*, 50(3): 425–434.
28. Nanayama F., Shigeno K., Satake K., Shimokawa K., Koitabashi S., Miyasaka S., Ishii M. **2000**. Sedimentary differences between the 1993 Hokkaido-nansei-oki tsunami and the 1959 Miyakojima typhoon at Taisei, southwestern Hokkaido, northern Japan. *Sedimentary Geology*, 135: 255–264. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(00\)00076-2](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00076-2)
29. Nanayama F. **2021**. Evidence of giant earthquakes and tsunamis of the seventeenth-century type along the southern Kuril subduction zone, eastern Hokkaido, northern Japan: a review. In: Dilek Y., Ogawa Y., Okubo Y. (eds) *Characterization of modern and historical seismic-tsunami events, and their global-societal impacts*. Geological Society, London, Special Publications, 501: 131–157. <https://doi.org/10.1144/SP501-2019-99>
30. Atwater B.F., Furakawa R., Hemphill-Haley E., Ikeda Y., Kashima K., Kawase K., Kelsey H.M., Moore A.L., Nanayama F., Nishimura Y., Odagiri S., Ota Y., Park S.-C., Satake K., Sawai Y., Shimokawa K. **2004**. Seventeenth-century uplift in eastern Hokkaido, Japan. *The Holocene*, 14: 487–501. <https://doi.org/10.1191/0959683604hl726rp>
31. *The 4(5) October 1994 Shikotan earthquake and tsunami. Chronicle of events, analysis of impact and current state of the art*. Special issue. **2015**. 2^d ed., expanded. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, 128 p. (In Russ.).
32. Sidorin A.Ya. **2020**. The 1994 Shikotan earthquake and its effects on the development of Russian seismology. *Seismic instruments*, 56(1): 76–84. (In Russ.). <https://doi.org/10.21455/si2020.1-7>

Об авторах

Кайстренко Виктор Михайлович (<https://orcid.org/0000-0003-1026-2509>), доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории цунами, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия, vict-k@mail.ru

Виллис Паскаль (<https://orcid.org/0000-0002-3257-0679>), доктор наук, старший научный сотрудник, Управление исследований и обучения, Институт физики Земли, Париж, Иль-де-Франс, Франция, pascal.willis@ign.fr

Разжигаяева Надежда Глебовна (<https://orcid.org/0000-0001-7936-1797>), доктор географических наук, главный научный сотрудник лаборатории палеогеографии и геоморфологии, Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия, nadyar@tigdvo.ru;

Ганзей Лариса Анатольевна (<https://orcid.org/0000-0002-2538-6603>), кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории палеогеографии и геоморфологии, Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия, lganzey@mail.ru

Шевченко Георгий Владимирович (<https://orcid.org/0000-0003-0785-4618>), доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией океанографии, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО), Южно-Сахалинск, Россия, shevchenko_zhora@mail.ru

Королёв Юрий Павлович (<https://orcid.org/0000-0002-7068-7341>), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории цунами, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия, Yu_P_K@mail.ru

About the Authors

Kaistrenko, Victor M. (<https://orcid.org/0000-0003-1026-2509>), Doctor of Physics and Mathematics, Leading Researcher, Tsunami laboratory, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, vict-k@mail.ru

Willis, Pascal (<https://orcid.org/0000-0002-3257-0679>), PhD, Senior Researcher (Direction de la Recherche et de l'Enseignement), Institut de Physique du Globe de Paris: Paris, Île-de-France, France, pascal.willis@ign.fr

Razjigaeva, Nadezhda G. (<https://orcid.org/0000-0001-7936-1797>), Doctor of Geography, Principal Researches, Laboratory of paleogeography and geomorphology, Pacific Geographical Institute of the Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, rnadya@tigdvo.ru

Ganzey, Larisa A. (<https://orcid.org/0000-0002-2538-6603>), Cand. Sci. (Geography), Leading Researcher, Laboratory of paleogeography and geomorphology, Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, lganzey@mail.ru

Shevchenko, Georgy V. (<https://orcid.org/0000-0003-0785-4618>), Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Oceanography laboratory, Sakhalin Branch of the All-Russian Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography (SakhNIRO), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, shevchenko_zhora@mail.ru

Korolev, Yury P. (<https://orcid.org/0000-0002-7068-7341>), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Tsunami laboratory, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, Yu_P_K@mail.ru

Поступила 19.10.2025

Принята к публикации 21.11.2025

Received 19 October 2025

Accepted 21 November 2025

© Автор, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 556.54

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.387-397>
<https://www.elibrary.ru/zieudx>

Гидролого-морфологический подход при установлении верхней (речной) границы устьевой области реки

Н. Н. Назаров

E-mail: nikolainazarovpsu@gmail.com

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

Резюме. В статье представлены результаты исследований по установлению местоположения верхней (речной) границы устьевых областей рек с использованием гидролого-морфологического подхода. Определение ее местоположения у двух десятков рек проведено по результатам дешифрирования космических снимков. Были задействованы спутниковые материалы свободного доступа (Yandex-карты, GoogleMaps). Критерием отбора рек для исследования стало наличие прямых и косвенных признаков распространения проявлений морских процессов (приливов, ветровых нагонов) в речных руслах и пойменных геосистемах. Выделялись участки рек, различающиеся морфодинамическим типом русла и морфометрией его элементов. Местоположение речной границы устьевой области и расстояние до нее от устьевого створа определялось по изменению (уменьшению) градиента частоты сменяемости этих участков. Для малых рек средняя длина устьевой области составила 22.6 км, для «малых-средних» – 54.4 км, для средних – 42.3 км. Доля протяженности устьевой области в длине малых водотоков в среднем составляет около 30 %, «малых-средних» – 21 %, средних – 9 %.

Ключевые слова: устьевая область реки, морские процессы, прилив, морфодинамический тип русла, дистанционное зондирование Земли

Hydrological and morphological approach to establishing the upper (river) boundary of the river mouth area

Nikolai N. Nazarov

E-mail: nikolainazarovpsu@gmail.com

Pacific Geographical Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract. The article presents the results of studies on establishing the location of the upper (river) boundary of the river mouth areas using the hydrological and morphological approach. Its location for two dozen rivers was determined based on the results of satellite imagery interpretation. Free-access satellite materials (Yandex-maps, GoogleMaps) were used. The selection of rivers for the study was the presence of direct and indirect signs of the spread of marine processes (tides and wind surges) in river channels and floodplain geosystems. River sections differing in the morphodynamic type of the channel and the morphometry of its elements were identified. The location of the river boundary of the river mouth area and the distance to it from the river mouth section were determined by the change (decrease) in the gradient of the frequency of change of these sections. For small rivers, the medium length of the mouth area was 22.6 km; for “small-medium” rivers, 54.4 km; for medium rivers, 42.3 km. The share of the length of the river mouth area in the length of small rivers is about 30 % on average; “small-medium” rivers, 21 %; medium rivers, 9 %.

Keywords: river mouth area, marine processes, tide, morphodynamic channel type, remote sensing of the Earth

Для цитирования: Назаров Н.Н. Гидролого-морфологический подход при установлении верхней (речной) границы устьевой области реки. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 4, с. 387–397. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.387-397>; <https://www.elibrary.ru/zieudx>

For citation: Nazarov N.N. Hydrological and morphological approach to establishing the upper (river) boundary of the river mouth area. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 4, pp. 387–397. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.387-397>; <https://www.elibrary.ru/zieudx>

Финансирование и благодарности

Работа выполнена по теме государственного задания Тихоокеанского института географии ДВО РАН «Естественная и антропогенная динамика, трансформация и эволюция разноранговых геосистем и их компонентов в переходной зоне «суша-океан» в условиях возрастания природных и техногенных рисков; разработка методов и геоинформационных технологий их мониторинга и моделирования» (FWMW-2025-0001).

Автор благодарит уважаемых рецензентов за внимание к работе и конструктивные рекомендации по улучшению статьи.

Funding and Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the state task of the Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of RAS on the topic “Natural and anthropogenic dynamics, transformation and evolution of different-rank geosystems and their components in the transition zone “land-ocean” in the context of increasing natural and man-made risks; development of methods and geoinformation technologies for their monitoring and modeling” (FWMW-2025-0001).

The author thanks the respected Reviewers for their valuable attention to the article and their constructive recommendations for its improvement.

Введение

Устьевые участки рек представляют для человека повышенный интерес, поскольку являются переходной зоной между двумя смежными геосистемами, в которой на ограниченном пространстве присутствуют черты (свойства, условия, структурность) двух типов водных объектов – реки и приемного водоема. В силу этой особенности самые нижние участки реки становились местом постоянной или временной концентрации населения. При все возрастающей социально-экономической значимости переходной зоны «суша-океан» (прибрежно-территориальной части береговой геоструктуры по [1]) поиск новых форм и направлений рационального и ресурсосберегающего использования прибрежных территорий в устьях рек, безусловно, требует полного понимания ее места в географическом пространстве и представления о том, где проходит граница распространения морского влияния в речном русле и долинных геосистемах в целом [2]. Решение проблемы, исходя из современных знаний о природно-ресурсном пространстве, может заключаться в установлении изменчивости индивидуальных характеристик природных компонентов устьевых геосистем по мере удаления от приемного водоема, что, в конечном итоге, поможет определить размер (ширину) переходной зоны [3], в частности

протяженность устьевой части реки. С практической точки зрения результатом таких исследований может стать повышение уровня планирования и развития поселенческой инфраструктуры. А для этого необходимо установление границы влияния геодинамических процессов морского происхождения на комфортность и безопасность проживания населения.

В учении о водных потоках свойство постепенности снижения влияния морских процессов в устье реки (до полного исчезновения) наиболее концентрированно представлено в понятии «устьевая область реки» (УОР). Под УОР гидрологи понимают устьевую часть реки и приустьевую часть моря, в которых в разных комбинациях пространственно-временной активности фиксируются проявления речных и морских процессов [4–6]. К последним, влияющим на местоположение речной границы УОР, относятся приливы и ветровые нагоны морских вод в русла рек. Известно, что расстояние от устьевого створа, на котором в реке и речной долине в целом фиксируются проявления морских процессов, зависит от высоты приливной и/или нагонной волны, заходящей в ее устье, расходов воды и уклона русла. Как показывают результаты исследований, для УОР по сравнению с участком реки, расположенным выше по течению, характерна более высокая степень разнообразия морфодинамических типов русла и типов морфолитоге-

неза [7]. Как правило, формирование переходного участка реки сопровождается изменением не только структуры пойменных геосистем и формированием дельты, но и характеристик компонентов ландшафта. Обычно в качестве показателей увеличения/уменьшения значений компонентных характеристик в географическом пространстве используются градиенты различия однородных свойств [8–11]. Перспективным параметром, в части его использования для пространственной дифференциации УОР, по-видимому, можно считать специфический градиент, предложенный П.Я. Баклановым [12], – сокращение активности природных процессов в виде разницы в точке (ареале) с максимальной интенсивностью и в точке, удаленной от нее на условную единицу расстояния (1, 10, 100 км).

К настоящему времени устья водотоков хорошо изучены только на гидрологическом уровне и с помощью преимущественно инструментальных наблюдений [13, 14]. По результатам изучения многих десятков рек получены ответы на многие вопросы, объясняющие изменчивость структуры УОР и особенности ее функционирования в зависимости от сезонности гидрологических речных и морских процессов. Тем не менее, исследователи отмечают, что в процессе изучения устьев рек методы гидрологии и океанологии в чистом виде часто неприменимы и по многим вопросам еще существует большая неопределенность [15]. Дискуссионным остается вопрос о величине обеспеченности редких гидрологических событий, установленных при средних минимальных расходах, для «назначения» верхней границы УОР [16]. Исходя из этого, сама констатация фиксированного значения дальности расположения речной границы УОР становится не окончательной и, по-видимому, не лишенной некоторой субъективности при ее определении.

Решение вопроса о местоположении верхней границы УОР, которая является континуальной границей между устьевыми («речно-морскими») и предустьевыми («речными») участками реки, требует использования не только гидрологических, но и других методов, которые в дополнение к гидрологи-

ческим могут диагностировать предельное расстояние распространения влияния морских процессов на речные – определять местоположение речной (верхней) границы развития устьевого морфолитогенеза.

К устьевым процессам морского происхождения, непосредственно воздействующим на русло реки, относятся обратные (реверсивные) течения, возникающие в период приливов и/или ветровых нагонов морских вод. При этом процесс эрозии руслового канала одновременно сопровождается и повышением уровня воды в нем, которое в свою очередь, из-за периодического обводнения и высыхания его стенок, приводит к развитию гидрофизических процессов в почво-грунтах берегового уступа. Кроме прямого воздействия обратного течения на стенки русла на участке реки выше границы его распространения происходит корректировка активности и собственно речных (русловых) процессов. На усиление/ослабление в них эрозионной или аккумулятивной составляющей влияет фактор пространственно-временной периодичности подпора водных масс, возникающий в межень, но часто полностью отсутствующий при повышении расходов в половодье и во время дождевых паводков.

Результатом параллельного развития речных и морских процессов в УОР, где «постоянно-периодически» изменяется доля влияния каждого из них на речное русло и природные компоненты устьевых геосистем, является формирование устьевых пойменно-русловых комплексов (ПРК). Фиксируемым «откликом» на взаимодействие речных и морских процессов становятся изменения в морфодинамике русла и строении пойменных геосистем. Различия в структуре речных (приустьевых) и устьевых пойменно-русловых комплексов уже отмечались исследователями в разрезе ландшафтных и геоморфологических характеристик [17]. Ландшафтно-геоморфологический подход в изучении устьев рек плодотворно и уже достаточно продолжительное время осуществляется в рамках исследований эстуарно-дельтовых систем – субэкральных аккумулятивных форм в структуре УОР [18, 19].

Важным обстоятельством целесообразности применения гидролого-морфологического

и ландшафтно-геоморфологического подходов при установлении верхней границы УОР является возможность использования в этих случаях методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые в ландшафтных, геоморфологических и русловых исследованиях широко применяются и могут стать альтернативой инструментальным наблюдениям в труднодоступных районах разных природных зон [20, 21]. В первую очередь дистанционные методы целесообразно использовать при изучении устьевых систем малых и средних рек, составляющих подавляющее большинство водотоков на Земле и не всегда доступных для проведения комплексных инструментальных гидрологических исследований.

Цель нашей работы – установление с помощью ДЗЗ пространственных особенностей расположения верхней границы устьевой области (расстояния от нее до устьевого створа) малых и средних рек.

Достижение поставленной цели потребовало решения нескольких задач: а) подбор рек из базы спутниковых материалов свободного доступа, отвечающих требованиям и возможностям осуществления геоиндикационного дешифрирования проявлений устьевых процессов в руслах рек и пойменных геосистемах; б) установление прямых и косвенных признаков воздействия морских процессов на пойменно-русловые комплексы устьевых частей рек; в) выявление участков рек, различающихся морфодинамическим типом русла и/или морфометрическими особенностями его элементов.

Объект и методы исследования

Местоположение верхней границы УОР, определяемое морфодинамическими особенностями русла и ландшафтно-геоморфологическими особенностями строения поймы, не должно значительно отличаться от ее местоположения, определяемого с использованием только гидрологических параметров. Объяснить это можно тем, что в любом случае положение речной границы УОР определяется деятельностью одних и тех же гидрологиче-

ских процессов. Выше УОР в качестве основного агента формирования русла и компонентов ПРК выступают только речные процессы, а начиная с ее верхней границы и до устьевого створа к ним добавляется комплекс морских процессов.

Тем не менее, при всей объективности использования природных компонентов и особенностей русловой морфодинамики в качестве признаков влияния моря на развитие речных и пойменных геосистем, степень совпадения гидрологических, гидролого-морфологических и ландшафтно-геоморфологических границ между устьевыми и приустьевыми ПРК и верхней границей УОР при разном подходе к уровню обеспеченности может быть различной и будет зависеть, в частности, от того, что специалист считает индикатором верхней границы УОР: гидрологические события малой, максимальной или средней обеспеченности. Например, по мнению М.В. Михайловой [15], в качестве верхней (речной) границы устья реки целесообразно принимать критерием дальности распространения вверх по течению повышения уровня воды при сизигийных приливах либо при нагонах 10%-ную обеспеченность при средних минимальных расходах воды в межень в период после зарегулирования стока реки. Определенное влияние на распознавание признаков влияния морских процессов на ПРК, безусловно, будет иметь подготовленность специалиста-«дешифрировщика» (гидролога, геоморфолога, ландшафтоведа).

Отбор рек для исследования проводился с учетом как технической стороны (качества спутниковых материалов, времени съемки), так и наличия на космических снимках однозначных признаков развития морских процессов в устьях рек. При этом второй аспект выбора рек по большей части был также связан с технической стороной исследования – качеством и масштабом отображения русловой обстановки. Признаки внедрения морских вод в речное русло визуально устанавливались по фиксации явных различий в окраске воды в направлении от устьевого створа вверх по течению – чаще всего постепенному снижению интенсивности цвета мутяевого шлейфа.

Изучение динамики взвешенных наносов в эстуариях и речных дельтах путем отслеживания с помощью методов ДЗЗ ранее уже показало свою эффективность [22–26]. Дальность фиксируемого визуально внедрения шлейфа муты без учета фазы приливно-отливного процесса и расхода реки в момент проведения космической съемки указывает лишь на принадлежность данного участка русла к УОР и только в самом первом приближении – на положение ее верхней границы.

Для просмотра спутниковых изображений устьев рек использовались материалы свободного доступа (Yandex-карты, GoogleMaps). В качестве ключевых участков для поиска и отбора рек были выбраны в основном побережья мезо- и макроприливных морей, располагающихся в разных регионах мира [27]. Как правило, уже на начальном этапе исследований влияние морских процессов на формирование речного русла и вмещающих его долинных геосистем в той или иной степени находило отражение в особенностях морфодинамического строения русла и природных комплексов речной долины в целом [28–31].

В результате были выбраны малые и средние реки, входящие в бассейны морей разных океанов и климатических поясов: Баренцева (Инди́га), Белого (Сѣмжа, Онега, Лая, Кянда), Охотского (Тымь, Паромай, Лютога), Японского (Туманная, Раздольная, Партизанская), реки Бискайского залива (Дордонь), Бристольского залива о. Великобритания (Северн), зал. Фанди (Шубенакади), Панамского залива (Бальсас), Мозамбикского пролива (Пунгве, Бузи), о. Северный Новой Зеландии (Пунакитере), северного побережья Австралии (Орд, Западный Аллигатор, Аделаида).

По спутниковым снимкам выявлялись участки реки с распространением мутяевого шлейфа – повышенного содержания взвеси в воде, формирующейся в приустьевой части моря или эстуариях. Изменение интенсивности цветовой (тоновой) окраски воды в русле стало основным дешифрировочным признаком визуального установления границ зоны загрязнения. Сначала фиксировалось начало торможения приливной волны (ее нижняя граница), а выше по течению – окончание про-

движения (верхняя граница). Признаком местоположения последней была максимальная степень «чистоты» водного потока – черный или более темный цвет отображения русла на космическом снимке по сравнению с более светлым на участке реки, расположенном ниже по течению.

В случаях отсутствия проявлений формирования вод с повышенным содержанием в них взвешенных частиц, в частности у рек с приглубой устьевой частью приемного водоема, распространение морских водных масс довольно уверенно фиксировалось по их особому «морскому» (обычно голубому) оттенку по сравнению с окраской речных вод выше зоны их смешивания с морской водой.

Необходимо отметить, что, поскольку даже в течение полусуток (суток), тем более в периоды сизигийных и квадратурных приливов, расстояние от устьевого створа до верхней границы распространения приливной волны не является постоянной величиной, местоположение искомой границы распространения морских процессов в реке относится только ко времени (дате, времени суток) проведения спутниковой съемки и лишь в первом приближении фиксирует местоположение верхней границы УОР. Важными косвенными признаками при ее установлении стали ландшафтно-геоморфологические признаки – фиксирование изменений ширины зоны осушки вдоль русловой бровки (до ее полного отсутствия) и образование особых по окраске и структуре изображения растительных сообществ – геосистемных фаций, формирующихся в береговой зоне периодического подтопления и/или затопления.

Основную роль при окончательном определении верхней границы УОР при гидролого-морфологическом подходе играет выявление сменяемости морфолого-морфометрических характеристик русла. Результатом проведенного исследования стало определение серии участков реки, различающихся набором морфодинамических типов русла и/или их разновидностей. При выделении таких участков использовалась морфодинамическая классификация МГУ [32]. Корректировка расположения верхней границы распространения влияния морских процессов на русловые осуществлялась

уже после отслеживания следов мутьевого шлейфа (если он присутствовал) и, как правило, происходила со сдвигом ее вверх по реке. Анализ плановых очертаний (рисунка) русла и его отдельных элементов окончательно устанавливал границу распространения проявлений морских процессов – верхнюю границу УОР. Поиск ее по признакам неоднородности состава фиксируемых морфодинамических типов русла основывался на учете изменения градиента частоты сменяемости выделенных участков в направлении от устьевого створа вверх по реке.

Обычно приливные устья рек включали в себя от двух до пяти участков, что отражает естественную реакцию развития устьевого морфолитогенеза при постепенном снижении активности морских процессов вверх по реке и одновременном возрастании активности речных (русловых) процессов в разные фазы приливов/отливов. Длина самого верхнего из выделенных «морфодинамических» участков, относящегося уже к приустьевой части реки, развивающегося исключительно в результате деятельности только русловых процессов, всегда превышала суммарную длину более коротких участков, располагающихся в пределах УОР. Устьевые участки реки от приустьевого обычно отличала также большая ширина русла, относительная прямолинейность и/или меньшая степень извилистости. Кроме того, у рек с приглубым взморьем в их состав включались и эстуарии (эстуарные участки).

Таким образом, в качестве основного критерия при определении верхней границы УОР было использовано изменение окраски воды в русле. Косвенно на ее местоположение также указывали смена структуры изображений береговых фаций и изменение градиента частоты сменяемости участков реки с разным морфолого-морфометрическим строением.

Результаты и обсуждение

С учетом разных подходов к определению ранга водотока [33, 34], к малым были отнесены реки с длиной менее 400 км и площадью бассейна менее 2 000 км², к средним – реки

длиной 400–700 км и 2 000–50 000 км² соответственно. Диапазон значений площади бассейна соответствовал ГОСТ 19179–73. Кроме групп малых и средних в качестве самостоятельной была выделена группа «малых-средних» рек, поскольку длина этих рек попадала в верхнюю часть диапазона малых рек, а площадь бассейна по ГОСТ 19179–73 относилась к средним. Целесообразность выделения промежуточной группы водотоков обосновывается резким увеличением в них меженных и паводковых расходов по сравнению с малыми реками и, как следствие, смещением верхней границы проявлений морских процессов вниз по течению реки.

В группу малых водотоков вошли 10 рек, в группу малых-средних – 6, средних – 5 (см. таблицу). В разных группах примерно в равных долях были представлены микро-, мезо- и макроприливные УОР.

В группе малых рек визуально определяемое расстояние продвижения приливной волны в русле (видимая протяженность мутьевого шлейфа) было зафиксировано лишь у четырех рек из десяти (40 %). На других реках цвет (отенок) воды вверх по течению практически не менялся, что не позволяло достоверно установить максимальное расстояние распространения проявлений морских процессов по данному признаку. В этом случае принадлежность части реки к УОР определялась по наличию условий, связанных с периодической сменой уровней воды. В первую очередь к ним относилось постепенное исчезновение вверх по течению водотока осушек русла, возникающих вдоль береговых бровок. Данный признак в качестве вспомогательного использовался также в группах малых-средних и средних рек.

Количество участков в УОР, выделенных по ведущим морфодинамическим типам русла в их структуре, во всех трех группах составляло от двух до пяти. Например, на р. Сёмжа удалось выделить четыре участка, различающихся между собой морфологией и морфометрией русла и его отдельных элементов (см. рисунок). Первый участок (I) протягивается от устьевого створа до последней крупной пологой излучины. Адаптированное русло, представленное в нем синусоидальной, петлеобразной и сундучной излучинами, включает в себя

и прямолинейную вставку протяженностью 1.5 км. Выше по течению происходит выполаживание излучин (II участок), на коротком расстоянии трансформирующихся в сложные (заваленные, петлеобразные) излучины преимущественно поперечного развития (III участок). Расположенный выше участок (IV) представлен серией относительно прямолинейных фрагментов русла в пределах односторонней поймы с немногочисленными следами прорванных петлеобразных излучин небольшого радиуса. Выше границы УОР морфолого-морфометрические характеристики русла

меняются: резко увеличивается степень его извилистости, а основной разновидностью излучин становятся петлеобразные.

Гидролого-морфологический подход при выделении устьевых областей рек, проведенный с использованием методов ДЗЗ, позволил установить следующие их характеристики.

Длина УОР в группе исследуемых рек составила от 10 до 83 км (см. таблицу). Как правило, наибольшими значениями характеризовались УОР, которые пересекают низменные, плавно понижающиеся к морю заболоченные равнины (реки Шубенакади, Зап. Аллигатор,

Таблица. Основные характеристики рек и их устьевых областей (по данным спутниковых изображений и литературным источникам)

Table. General features of rivers and their mouth areas (according to the satellite images and literature)

№	Река	Длина, км	Площадь водосбора, тыс. км ²	Расстояние распространения мутьевого шлейфа, км	Количество МУР	Длина УОР, км, (К)
Малые реки						
1	Сёмжа	63	0.49	6	4	10 (11)
2	Паромай	44	0.21	–	3	25 (57)
3	Лютюга	130	1.53	–	3	12 (8)
4	Партизанская	142	4.14	–	2	11 (8)
5	Кянда	49	0.51	–	2	10 (20)
6	Пунакитери	43	0.32	–	5	16 (37)
7	Бальсас	152	1.95	20	3	26 (17)
8	Шубенакади	72	1.30	36	3	40 (55)
9	Западный Аллигатор	80	–	45	3	52 (65)
10	Лая	131	2.12	–	3	26 (20)
Малые-средние реки						
11	Раздольная	245	16.80	–	3	28 (11)
12	Тымь	330	7.85	30	3	32 (13)
13	Северн	354	11.42	62	3	66 (19)
14	Инди́га	193	3.79	–	5	33 (17)
15	Аделаида	180	7.64	–	5	83 (46)
Средние реки						
16	Туманная	549	33.00	–	2	19 (3)
17	Орд	650	53.8	41	3	51 (8)
18	Онега	416	58.90	–	3	31 (7)
19	Дордонь	470	24.00	44	3	52 (11)
20	Пуангве	400	31.00	58	4	65 (16)
21	Бузи	437	27.00	29	4	36 (8)

Примечание. МУР – морфодинамический участок русла; К – отношение (%) длины УОР к длине реки; прочерк – нет данных.

Note. МУР, morphodynamic section of the channel; K, proportion (%) of the length of the river mouth area to the length of the river; a dash indicates no data.

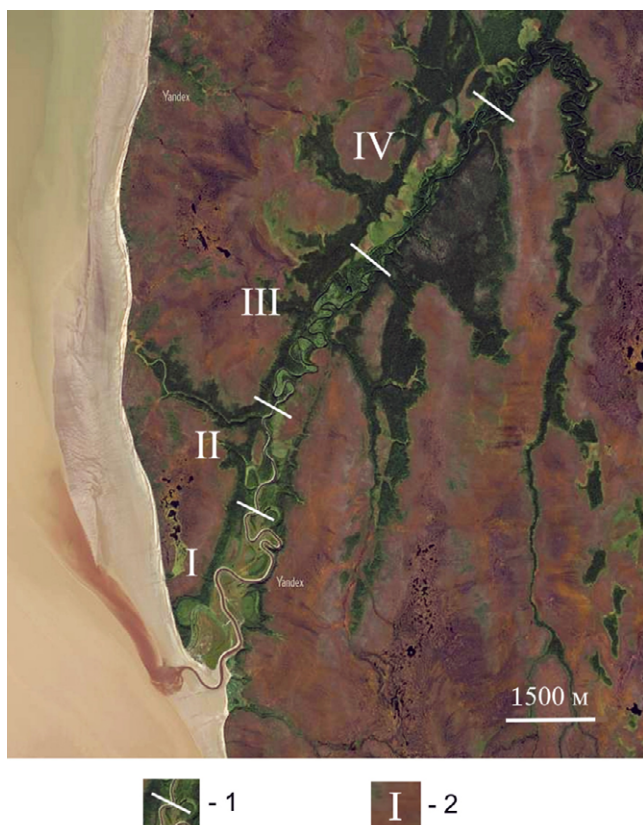


Рисунок. Устьевая область р. Сёмжа. 1 – граница участка; 2 – номер участка.

Figure. The mouth area of the Semzha River. 1, section boundary; 2, section number.

Аделаида и др.). Среднее значение показателя, определяющего расстояние (длину) распространения проявлений морских процессов вверх по руслу реки, для малых, малых-средних и средних водотоков составило, соответственно, 22.6, 54.4 и 42.3 км. Другая характеристика, являющаяся производной от среднего значения длины УОР, заключается в соотношении длины УОР и длины реки. Расчеты показали, что у малых рек доля средней длины устьевых участков составляет почти 30 %, у малых-средних – около 21 %, а у средних – всего 9 %. Большой информативностью и практической значимостью в получении оперативных (предварительных) данных о длине УОР обладает соотношение расстояния, на котором исчезает мутевой шлейф, и фактической длины УОР. Рассчитанные средние значения этого показателя составили 0.79 для малых рек, 0.93 для малых-средних и 0.83 для средних.

Таким образом, в первом приближении с ошибкой 7–21 % в большую сторону верхняя

граница УОР может быть установлена по визуально фиксируемой верхней границе распространения мутевого шлейфа. Более полная же информация о ее расположении возможна только с подключением морфодинамического анализа русла, объективно фиксирующего дальность распространения проявлений морских процессов в речном русле.

Заключение

На основе гидролого-морфологического и ландшафтно-геоморфологического подходов при выделении устьевых участков рек выявлены прямые и косвенные признаки воздействия морских процессов на речное русло в разные фазы приливно-отливного цикла. Основную роль при выделении типически однородных участков реки, в которых присутствуют проявления морских процессов, сыграл морфодинамический и морфометрический анализ русла. Окончательно местоположение верхней границы устьевой области реки устанавливалось по резкому изменению (уменьшению) градиента частоты сменяемости выделенных участков в направлении от устьевого створа вверх по течению. Количество морфодинамических участков русла в пределах УОР составило от двух до пяти. Длина УОР варьирует в интервале 10–83 км. Среднее значение расстояния, на которое распространяются проявления морских процессов вверх по руслу реки, для малых рек составило 22.6 км, для малых-средних – 54.4 км, для средних – 42.3 км. Средняя доля протяженности УОР в длине реки для малых водотоков составляет почти 30 %, для малых-средних – 21 %, для средних – 9 %. Доля протяженности мутевого шлейфа в длине УОР для малых рек равна 0.79, малых-средних – 0.93, средних – 0.83. Достаточно высокие значения данного показателя указывают на высокую информативность и практическую значимость измерения расстояния исчезновения мутевого шлейфа при оперативном (в первом приближении) установлении длины УОР. Более полную информацию о местоположении ее верхней границы дает морфодинамический анализ русла, фиксирующий дальность распространения проявлений морских процессов на фоне речных (русловых).

Список литературы

1. Бакланов П.Я., Ганзей К.С., Ермошин В.В. **2018**. Береговые географические структуры в прибрежно-морском природопользовании. *Доклады Академии наук*, 2: 229–231. <https://doi.org/10.7868/S0869565218020226>
2. *Прибрежно-морское природопользование: теория, индикаторы, региональные особенности*. **2010**. Владивосток: Дальнаука, 308 с.
3. Бакланов П.Я., Каракин В.П. **2013**. Природно-ресурсное пространство: дифференциация, границы, типы. *География и природные ресурсы*, 4: 11–18. <https://doi.org/10.1134/S1875372813040021>
4. Самойлов И.В. **1952**. *Устья рек*. М.: Географгиз, 526 с.
5. Байдин С.С. **1971**. Устьевая область реки как часть прибрежной зоны моря. В кн.: *Геоморфология и литология береговой зоны моря и других крупных водоемов*. М.: Наука, с. 67–74.
6. Михайлов В.Н., Рогов М.М., Макарова Т.А., Полонский В.Ф. **1977**. *Динамика гидрографической сети непритливых устьев рек*. М.: Гидрометеиздат, 297 с.
7. Назаров Н.Н. **2025**. Особенности проявления русловых процессов в устьевых областях приливных рек. *Тихоокеанская география*, 1: 18–32. https://doi.org/10.35735/26870509_2025_21_2
8. Бакланов П.Я., Мошков А.В. **2017**. Географическая дифференциация территориальных структур хозяйства в Тихоокеанской России. *География и природные ресурсы*, 1: 5–15. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-1\(5-15\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-1(5-15))
9. Пузаченко Ю.Г. **2004**. *Математические методы в экологических и географических исследованиях*. М.: Академия, 416 с.
10. Сысуев В.В. **2020**. Полиструктурная организация ландшафтов. *Тихоокеанская география*, 4: 5–13. <https://doi.org/10.35735/tig.2020.4.4.001>
11. Хорошев А.В. **2016**. *Полимасштабная организация географического ландшафта*. М.: Товарищество научных изданий КМК, 416 с.
12. Бакланов П.Я. **2021**. Географические градиенты – как измерение географического пространства. В кн.: *Геосистемы Северо-Восточной Азии: природа, население, хозяйство территорий*. Владивосток, с. 11–13. <https://doi.org/10.35735/tig.2021.56.55.002>
13. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. **2013**. Физические основы гидрологических и морфологических процессов в речных дельтах. *Вестник РФФИ*, 2(78): 26–33.
14. Алабян А.М., Василенко А.Н., Демиденко Н.А., Крыленко И.Н., Панченко Е.Д., Попрядухин А.А. **2022**. Приливная динамика вод в дельте Печоры в летнюю межень. *Вестник Московского университета. Серия 5: География*, 1: 167–179.
15. Михайлова М.В. **2022**. Современные научные и прикладные проблемы гидрологии устьев рек. *Водные ресурсы*, 49(5): 539–551. <https://doi.org/10.31857/S032105962205011X>
16. Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Магрицкий Д.В. **2018**. *Основы гидрологии устьев рек*. М.: Триумф, 313 с.
17. Иванов В.В., Коротаев В.Н., Чернов А.В. **2013**. Нижний Дон: геоморфология, русловая морфодинамика и дельтообразование. В кн.: *Двадцать восьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов*. Пермь, с. 109–112.
18. Коротаев В.Н. **2004**. Геоморфологическая эволюция и прогноз развития эстуарно-дельтовых систем России. В кн.: *Девятнадцатое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов*. Белгород, 41–47.
19. *Эстуарно-дельтовые системы России и Китая: гидролого-морфологические процессы, геоморфология и прогноз развития*. **2007**. М.: ГЕОС, 445 с.
20. Сладкопепцев С.А. **1982**. *Изучение и картографирование рельефа с использованием аэрокосмической информации*. М.: Недра, 216 с.
21. Лабутина И.А. **2004**. *Дешифрирование аэрокосмических снимков*. М.: Аспект-Пресс, 184 с.
22. Лабутина И.А., Сафьянов Г.А., Шарлай Т.Г. **1976**. Исследование распространения взвесей в море по многозональным аэрофотоснимкам. *Доклады Академии наук СССР*, 230(2): 536–538.
23. Зубенко Ф.С., Нерода Л.М. **1987**. Контактные и дистанционные методы исследования взвешенных примесей в эстуариях. В кн.: *Социально-экологические проблемы интенсивного освоения устьевых приморских регионов: тез. докладов*. Ростов-на-Дону, с. 123–125.
24. Albanakis K.S. **1990**. Testing of a model for the simulation of the volume reflectance of water due to suspended sediment under controlled conditions, for various sediment types. *International J. Remote Sensing*, 11(9): 1533–1547.
25. Bhargava D.S., Mariam D.W. **1991**. Light penetration depth, turbidity and reflectance related relationship and models. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*, 46(4): 217–230. [https://doi.org/10.1016/0924-2716\(91\)90055-z](https://doi.org/10.1016/0924-2716(91)90055-z)
26. Doxaran D., Froidefond J.-M., Castaing P. **2002**. A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters. *International J. Remote Sensing*, 23(23): 5079–5085. <http://dx.doi.org/10.1080/0143116021000009912>

27. Davies J.L.A. **1964**. A morphogenic approach to world shorelines. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 8: 27–42.
28. Михайлов В.Н., Полонский В.Ф., Чернецова Г.М. **1990**. Закономерности кинематики и динамики потока в приливных устьях рек. *Вестник Московского университета. Серия 5: География*, 1: 16–24.
29. Долотов Ю.С. **2010**. *Процессы рельефообразования и осадконакопления на приливных побережьях Мирового океана*. М.: Научный мир, 180 с.
30. Мискевич И.В., Алабян А.М., Демиденко Н.А., Коробов В.Б., Панченко Е.Д. **2022**. Формирование высокой мутности вод в малых приливных эстуариях Белого и Баренцева морей. *Вестник Московского университета. Серия 5: География*, 4: 142–153.
31. Панченко Е.Д. **2022**. *Динамика потока в приливных устьях малых рек (на примере Беломорского бассейна)*: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., МГУ, 28 с.
32. Чалов Р.С. **2011**. *Русловедение: теория, география, практика*. Т. 2: *Морфодинамика речных русел*. М.: КРАСАНД, 960 с.
33. Воронков П.П. **1970**. *Гидрохимия местного стока Европейской территории СССР (основы гидрохимического принципа картирования)*. Л.: Гидрометеоиздат, 188 с.
34. Курдов А.Г. **1995**. *Водные ресурсы Воронежской области: формирование, антропогенное воздействие, охрана и расчеты*. Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 224 с.
7. Nazarov N.N. **2025**. Particular manifestation of channel processes in the tidal river mouth areas. *Tihookeanskaja geografija = Pacific Geography Journal*, 1: 18–32. (In Russ.). https://doi.org/10.35735/26870509_2025_21_2
8. Baklanov P.Y., Moshkov A.V. **2017**. Geographical differentiation of territorial structures of the economy in Pacific Russia. *Geography and Natural Resources*, 38: 1–11. <https://doi.org/10.1134/S1875372817010012>
9. Puzachenko Yu.G. **2004**. *Mathematical methods in environmental and geographical research*. Moscow: Akademija, 416 p. (In Russ.)
10. Sysuev V.V. **2020**. Polystructural organization of a landscape: geophysical analysis of geosystems synergy. *Tihookeanskaja geografija = Pacific Geography Journal*, 4: 5–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.35735/tig.2020.4.4.001>
11. Khoroshev A.V. **2016**. [Multiscale organization of geographical landscape]. Moscow: KMK, 416 p. (In Russ.)
12. Baklanov P.Ya. **2021**. Geographical gradients – as a measurement of geographical space. In: *Geosystems of North-East Asia: the nature, population, economy of territories*. Vladivostok, p. 11–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.35735/tig.2021.56.55.002>
13. Mikhailov V.N., Mikhailova M.V. **2013**. Physical principals of hydrological and morphological processes in river deltas. *RFBR Journal*, 2(78): 26–33. (In Russ.)
14. Alabyan A.M., Vasilenko A.N., Demidenko N.A., Krylenko I.N., Panchenko E.D., Popryadukhin A.A. **2022**. Tidal flow dynamics in the Pechora River delta during summer low water. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 5: Geografija*, 1: 167–179. (In Russ.)
15. Mikhailova M.V. **2022**. Current scientific and applied problems of river mouth hydrology. *Water resources*, 49(5): 753–765. <https://doi.org/10.1134/S0097807822050116>
16. Mikhailov V.N., Mikhailova M.V., Magritsky D.V. **2018**. *Fundamentals of river estuary hydrology*. Moscow: Triumf, 313 p. (In Russ.)
17. Ivanov V.V., Korotayev V.N., Chernov A.V. **2013**. Lower Don: geomorphology, channel morphodynamics, and delta formation. In: *Dvadczat' vos' moe plenarnoe mezhvuzovskoe koordinacionnoe soveshhanie po probleme e'rozionny'x, ruslovy'x i ust'evy'x processov*. Perm, p. 109–112. (In Russ.)
18. Korotayev V.N. **2004**. Geomorphological evolution and forecast of the estuarine-delta systems development in Russia. In: *Devyatnadczaetoe plenarnoe mezhvuzovskoe koordinacionnoe soveshhanie po probleme e'rozionny'x, ruslovy'x i ust'evy'x processov*. Belgorod, p. 41–47. (In Russ.)
19. *Estuarine-deltaic systems of Russia and China: hydrological-morphological processes, geomorphology and prediction of evolution*. **2007**. Moscow: GEOS, 445 p. (In Russ.)

References

1. Baklanov P.Y., Ganzei K.S., Ermoshin V.V. **2018**. Coastal geographic structures in coastal-marine environmental management. *Doklady Earth Sciences*, 478: 100–102. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18010105>
2. *Coastal and marine nature management: theory, indicators, regional features*. **2010**. Vladivostok: Dal'nauka, 308 p. (In Russ.)
3. Baklanov P.Y., Karakin V.P. **2013**. Natural-resource space: Differentiation, boundaries, types. *Geography and natural resources*, 34: 308–313. <https://doi.org/10.1134/S1875372813040021>
4. Samoilov I.V. **1952**. [River mouths]. Moscow: Geografiz, 526 p. (In Russ.)
5. Baidin S.S. **1971**. The mouth area of the river as part of the coastal zone of the sea. In: *Geomorphology and lithology of the coastal zone of the sea and other large water bodies*. Moscow: Nauka, p. 67–74. (In Russ.)
6. Mikhailov V.N., Rogov M.M., Makarova T.A., Polonsky V.F. **1977**. [Dynamics of the hydrographic network of non-tidal river mouths]. Moscow: Gidrometeoizdat, 297 p. (In Russ.)

20. Sladkopevtsev S.A. **1982**. *Study and mapping of land-forms using aerospace information*. Moscow: Nedra, 216 p. (In Russ.).
21. Labutina I.A. **2004**. *Deciphering aerospace images*. Moscow: Aspekt-Press, 184 p. (In Russ.).
22. Labutina I.A., Safyanov G.A., Sharlai T.G. **1976**. Study of the distribution of suspended matter in the sea using multi-spectral aerial photographs. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 230(2): 536–538. (In Russ.).
23. Zubenko F.S., Neroda L.M. **1987**. Contact and remote methods for studying suspended impurities in estuaries. In: [Social and environmental problems of intensive development of coastal estuarine regions]. Rostov-on-Don, 123–125. (In Russ.).
24. Albanakis K.S. **1990**. Testing of a model for the simulation of the volume reflectance of water due to suspended sediment under controlled conditions, for various sediment types. *International J. Remote Sensing*, 11(9): 1533–1547. <https://doi.org/10.1080/01431169008955112>
25. Bhargava D.S., Mariam D.W. **1991**. Light penetration depth, turbidity and reflectance related relationship and models. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*, 46(4): 217–230. [https://doi.org/10.1016/0924-2716\(91\)90055-z](https://doi.org/10.1016/0924-2716(91)90055-z)
26. Doxaran D., Froidefond J.-M., Castaing P. **2002**. A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters. *International J. Remote Sensing*, 23(23): 5079–5085. <http://dx.doi.org/10.1080/0143116021000009912>
27. Davies J.L.A. **1964**. A morphogenic approach to world shorelines. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 8: 27–42. <https://doi.org/10.1127/zfg/mortensen/8/1964/127>
28. Mikhailov V.N., Polonsky V.F., Chernetsova G.M. **1990**. Regularities of kinematics and dynamics of flow in tidal river mouths. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*, 1: 16–24. (In Russ.).
29. Dolotov Yu.S. **2010**. [Relief formation and sedimentation processes on the tidal coasts of the World Ocean]. Moscow: Nauchnyj mir, 180 p. (In Russ.).
30. Miskevich I.V., Alabyan A.M., Demidenko N.A., Korobov V.B., Panchenko E.D. **2022**. Formation of high water turbidity in small tidal estuaries of the White and Barents seas. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*, 4: 142–153. (In Russ.).
31. Panchenko E.D. **2022**. [Flow dynamics in tidal mouths of small rivers (using the White Sea basin as an example)]: extended abstract of the thesis ... Cand. Sci. (Geography). Moscow, Lomonosov Moscow State University, 28 p.
32. Chalov R.S. **2011**. [Riverbed science: theory, geography, practice. Vol. 2: Morphodynamics of river channels]. Moscow: KRASAND, 960 p. (In Russ.).
33. Voronkov P.P. **1970**. [Hydrochemistry of local runoff of the European territory of the USSR (Basics of the hydrochemical principle of mapping)]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 188 p. (In Russ.).
34. Kurdov A.G. **1995**. [Water resources of the Voronezh region: formation, anthropogenic impact, protection, and calculations]. Voronezh: Voronezh State University, 224 p. (In Russ.).

Об авторе

Назаров Николай Николаевич (<https://orcid.org/0000-0002-3611-5729>), доктор географических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории палеогеографии и геоморфологии, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, nikolainazarovpsu@gmail.com

About the Author

Nazarov, Nikolay N. (<https://orcid.org/0000-0002-3611-5729>), Doctor of Geographical Sciences, Professor, Leading Researcher at the Laboratory of paleogeography and geomorphology, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, nikolainazarovpsu@gmail.com

Поступила 17.09.2025

Принята к публикации 27.10.2025

Received 17 September 2025

Accepted 27 October 2025

© Авторы, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 553.791+550.461

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.398-409>
<https://www.elibrary.ru/xsyomt>

Современное состояние источников и генетическое разнообразие углекислых минеральных вод Приморского края

И. В. Брагин^{@1}, Г. А. Челноков², В. Ю. Лаврушин², А. А. Павлов¹,
Б. И. Челнокова³, Н. А. Харитонова^{4,1}

@E-mail: bragin_ivan@mail.ru

¹Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

²Геологический институт РАН, Москва, Россия

³Дальневосточный научный центр физиологии и патологии дыхания – НИИ медицинской климатологии
и восстановительного лечения, Владивосток, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Резюме. Представлены результаты комплексного исследования углекислых минеральных вод Приморского края, направленного на выявление их генезиса и условий формирования. В работе впервые для ряда малоизученных источников проведена совместная интерпретация данных химического и микрокомпонентного состава воды, газовой фазы (CO_2 , N_2 , CH_4 , H_2 , He , Ar) и стабильных изотопов кислорода и водорода ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$), полученных как в ходе данного исследования, так и ранее нашей группой. На основе гидрогеохимических данных выделены три генетические группы вод: 1) воды Ca-HCO_3 типа (источники «Большой ключ», «Фабричный»), формирующиеся в терригенных толщах; 2) воды глубинного силикатного типа (источники «Покровский», «Глуховка»), связанные с взаимодействием с кристаллическими породами фундамента и обогащенные литием, рубидием и барием; 3) кислые воды зоны окисления сульфидов (источник «Неробинский»), являющиеся индикаторами рудной минерализации. Воды смешанного типа, проявляющие черты трех вышеописанных типов, составляют четвертую группу. Газогеохимические исследования подтвердили преобладание CO_2 мантийного генезиса (>96.9 об.%) и восстановительный характер среды. Выявлены уникальные аномалии, такие как высокое содержание метана (до 2.26 об.%) в источнике «Покровский», что указывает на возможные термогенные процессы. Изотопный состав вод ($\delta^{18}\text{O}$ от -14.71 до -8.70 ‰, $\delta^2\text{H}$ от -103.79 до -60.28 ‰) однозначно свидетельствует об их метеорном происхождении из осадков холодного климата, а сдвиг относительно глобальной метеорной линии – об интенсивном изотопном обмене в системе «вода–порода–газ». Результаты работы имеют фундаментальное значение для понимания флюидодинамики недр Сихотэ-Алиня и прикладное – для расширения минерально-сырьевой базы, развития бальнеологии и проведения геолого-поисковых работ в регионе.

Ключевые слова: минеральные воды, углекислые воды, Приморский край, геохимия вод

Current state of springs and genetic diversity of high PCO_2 mineral waters of Primorsky Krai

Ivan V. Bragin^{@1}, Georgy A. Chelnokov², Vasily Yu. Lavrushin², Andrey A. Pavlov¹,
Berta I. Chelnokova³, Natalia A. Kharitonova^{4,1}

@E-mail: bragin_ivan@mail.ru

¹Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

²Geological Institute of RAS, Moscow, Russia

³The Far Eastern Scientific Center of Physiology and Pathology of Respiration – Research Institute of Medical
Climatology and Rehabilitation Treatment, Vladivostok, Russia

⁴Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract. We present the results of a comprehensive study of high PCO_2 mineral waters of Primorsky Krai, aimed at identifying their genesis and conditions of formation. For the first time, a joint analysis of the chemical and micro component composition of water, the gas phase (CO_2 , N_2 , CH_4 , H_2 , He, and Ar), and stable isotopes of oxygen and hydrogen ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) was carried out for a number of poorly studied springs, gained either during this study or previously by our group. Three genetic groups of waters were identified based on hydrogeochemical data: 1) Ca-HCO_3 type waters (Bolshoy Klyuch and Fabrichny springs) formed in terrigenous strata; 2) deep silicate-type waters (Pokrovsky and Glukhovka springs) associated with interaction with crystalline basement rocks and enriched with lithium, rubidium, and barium; 3) acidic waters of the sulfide oxidation zone (Nerobinsky spring), which are indicators of ore mineralization; 4) mixed-type waters showing the features of the three types described above. Gas-geochemical studies confirmed the predominance of CO_2 of mantle genesis (>96.9 vol.%) and the redox environment. Unique anomalies were identified, such as a high methane content (up to 2.26 vol.%) in the Pokrovsky spring, indicating possible thermogenic processes. The isotopic composition of the waters ($\delta^{18}\text{O}$ from -14.71 to -8.70 ‰, $\delta^2\text{H}$ from -103.79 to -60.28 ‰) clearly indicates their meteoric origin from cold climate precipitation, while the shift relative to the global meteor line indicates intensive isotope exchange in the water–rock–gas system. The results of the study are of fundamental importance for understanding the fluid dynamics of the Sikhote-Alin subsurface and can be applied for expanding the mineral resource base, developing balneology, and conducting geological prospecting in the Primorsky region.

Keywords: mineral water, high PCO_2 waters, Primorsky Krai, water geochemistry

Для цитирования: Брагин И.В., Челноков Г.А., Лаврушин В.Ю., Павлов А.А., Челнокова Б.И., Харитонов Н.А. Современное состояние источников и генетическое разнообразие углекислых минеральных вод Приморского края. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 4, с. 398–409. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.398-409>; <https://www.elibrary.ru/xsyomt>

For citation: Bragin I.V., Chelnokov G.A., Lavrushin V.Yu., Pavlov A.A., Chelnokova B.I., Kharitonova N.A. Current state of springs and genetic diversity of high PCO_2 mineral waters of Primorsky Krai. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 4, pp. 398–409. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.398-409>; <https://www.elibrary.ru/xsyomt>

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-27-20091, <https://rscf.ru/project/25-27-20091/>) и Правительства Приморского края.

Funding

This study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 25-27-20091, <https://rscf.ru/project/25-27-20091/>) and with the support of the Government of Primorsky Krai.

Введение

Минеральные воды представляют собой уникальный природный ресурс, предмет исследования в геологии, гидрогеологии, медицине и курортологии. Их комплексное изучение является междисциплинарной задачей, имеющей значительное народно-хозяйственное и научное значение. С точки зрения геологии и горного дела, минеральные воды являются полезным ископаемым. Критериями их отнесения к категории «минеральные» служат повышенная минерализация (общая или по специфическим компонентам), содержание биологически активных компонентов (CO_2 , H_2S , As, Rn и др.) и/или специфические физические свойства

(температура, радиоактивность). Они рассматриваются как жидкие руды, месторождения которых имеют строгие границы, подсчитанные запасы и подлежат охране от истощения и загрязнения. Минеральные воды – это природные растворы, формирующиеся в недрах Земли. Их химический и изотопный состав является индикатором глубинных геологических и гидрогеологических процессов. При этом химический состав вод (микроэлементы, редкоземельные элементы, газы) служит поисковым признаком на рудные месторождения. Например, аномальные концентрации лития, цезия, рубидия в водах могут свидетельствовать о наличии редкометалльных гранитов в глубине. Вместе с тем термальные флюиды являются

спутником современной вулканической и сейсмической активности. Мониторинг изменения их температуры, химического состава (особенно соотношения изотопов гелия, концентрации CO_2 , H_2 , Rn) используется для прогноза вулканических извержений и оценки сейсмической опасности. Помимо этого минеральные водоносные горизонты часто являются стратегическими запасами питьевой воды. Изучение их гидрохимии позволяет отслеживать загрязнение со стороны поверхности (нитраты, тяжелые металлы, органические загрязнители) и принимать меры по охране подземной гидросферы.

Немаловажным аспектом изучения минеральных вод является бальнеологический. Его основа – изучение механизмов воздействия вод на организм человека через питье, лечение, ванны, ингаляции и другие процедуры. Эффект обусловлен комплексным влиянием ионного состава (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}), биологически активных компонентов (радон, сероводород, углекислый газ, метакремниевая кислота), а также физических свойств (температура, радиоактивность, pH). На основе детального изучения состава и свойств вод разрабатываются показания и противопоказания для лечения конкретных заболеваний (болезни ЖКТ, опорно-двигательного аппарата, нервной, сердечно-сосудистой систем, кожи); методики применения (дозировка, температура, продолжительность процедур); стандарты для курортов [1]. Наличие уникальных минеральных вод является мощным драйвером развития регионов.

В Приморском крае выделены три провинции минеральных вод: холодных углекислых вод областей молодой магматической деятельности; азотных щелочных терм областей новейших тектонических движений; азотных, азотно-метановых и метановых вод артезианских бассейнов платформ, краевых прогибов и складчатых областей. В регионе широко распространены разнообразные гидроминеральные ресурсы, многие из которых используются уже более семидесяти лет. По данным Гидро-

геологической экспедиции Приморского края, на начало XXI в. насчитывалось около 75 различных проявлений минеральных вод, большей частью холодных (4–12 °C) [2]. Термальные минеральные воды выявлены только на восточном побережье края. Они относятся к низкотемпературным и поэтому не могут использоваться для целей энергетики [3]. Углекислые воды содержат глубинный, мантийный CO_2 (доказано по $\delta^{13}\text{C}$ и соотношениям $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$) [4]. Азотные термы и азотно-метановые воды содержат газы атмосферного происхождения (N_2 , O_2 , Ar) или образовавшиеся в результате преобразования органического вещества (CH_4) [5, 6].

На основе данных мониторинга химического состава вод в рамках научных проектов и поисково-разведочных работ на сегодняшний день имеются представления об условиях формирования вод месторождений Ласточка, Шмаковка, Горноводное, Чистоводное, Амгу [7, 8]. Данные по месторождениям Фадеевское и Нижние Лужки потеряли свою актуальность в связи с закрытием первого (с последующим отзывом лицензии) и разрушением скважин второго (последствие тайфуна «Лайонрок», прошедшего по территории края в 2017 г).

Наблюдения за химическим составом вод при эксплуатации месторождений Шмаковское, Горноводненское, Ласточка, Чистоводненское и др. ведутся с начала двадцатого века. Создание новых и развитие существующих курортов привлекают инвестиции, создают рабочие места и формируют положительный имидж территории края. На сегодняшний день имеется научное обоснование для коренного пересмотра отношения к минеральным водам Приморья. Несмотря на богатейший потенциал, степень использования минеральных вод не превышает 10–30 % от прогнозных ресурсов. Регион обладает не недоразвитой, а недооцененной и недоиспользованной ресурсной базой. Решение проблемы лежит не в поиске новых источников, а в комплексном подходе – от глубокой разведки и научного изучения до грамотного маркетинга и создания современной инфраструктуры [9].

Объектом нашего исследования стали углекислые минеральные воды, используемые местным населением десятилетиями, однако в силу разных причин остающиеся недоисследованными. К ним относятся воды источников Пуховский, Неробинский, Фабричный, Покровский, Большой ключ, Курортный, Ариадненский, Милоградовский и Глуховский (рис. 1), частично определяемые ранее в группы Ленинскую и Шетухинскую [7]. Целью исследования было комплексное изучение генезиса и условий формирования малоизученных углекислых минеральных вод Приморского края на основе анализа их химического и газового состава, а также изотопных характеристик ($\delta^{2}\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$).

Методы исследования и результаты

Поскольку данные по общему составу вод известны и опубликованы, для этого исследования отбор проб на катионы и анионы

не производился. Непосредственно на месте пробоотбора проводился замер нестабильных параметров воды: температуры, pH, Eh, TDS при помощи полевых анализаторов фирмы Mettler Toledo, а также определение концентрации HCO_3 прямым титрованием. Пробы предварительно отфильтровывались через мембранный фильтр Hyundai Micro с диаметром пор 0.45 мкм для удаления взвешенной части. Фильтрат подкислялся концентрированной азотной кислотой из расчета 0.5 мл кислоты на 50 мл пробы для анализа на катионы и микроэлементы. Газогеохимическое опробование проводилось по стандартной методике с отбором проб методом вытеснения и анализом на газовом хроматографе в ГИН РАН. Макро и микрокомпоненты определялись с помощью ICP-MS, гидрокарбонат-ион – при помощи титрования на месте отбора проб, изотопные соотношения кислорода и водорода в воде определялись на изотопном анализаторе Picarro 2140i в ГИН РАН. Полученные результаты сведены в таблицы 1 и 2.



Рис. 1. Объекты исследования – минеральные углекислые воды Приморского края. Нумерация согласно таблице 1.

Fig. 1. Object of study: high pCO_2 mineral waters of Primorsky Krai. Numbering according to the Table 1.

Таблица 1. Результаты аналитических измерений, а также основные физико-химические параметры углекислых минеральных вод Приморского края. Информация в виде интерактивной карты представлена в сети интернет <https://clck.ru/3PWit3>

Table 1. The results of analytical measurements, as well as the main physico-chemical parameters of high pCO₂ mineral waters of the Primorsky Krai. Information in the form of an interactive map is presented on the Internet <https://clck.ru/3PWit3>

№ п/п	Название источника	Координаты		Химический тип (по О.А. Алёкину)	TDS, мг/л	pH	Eh, мВ
		с.ш.	в.д.				
1	Глуховка (скважина)	43.731243	132.167839	Na-Mg-HCO ₃	548	6.03	26
2	Большой ключ	44.862483	133.891727	Ca-HCO ₃	1034	6.04	12
3	Неробинский	44.842511	133.933338	Ca-Na-HCO ₃	212	5.43	69
4	Фабричный	44.851426	133.960958	Ca-HCO ₃	795	6.17	159
5	Покровский (скважина)	44.3944	133.621596	Na-Ca-HCO ₃	771	5.97	7
6	Курортный	44.039491	134.100868	Ca-HCO ₃	756	5.94	41
7	Ариадненский нижний	45.105599	134.484754	Ca-Mg-Na-HCO ₃	172	5.38	78
8	Ариадненский верхний	45.11043	134.487761	Na-Ca-Mg-HCO ₃	241	5.47	93
9	Пуховский	44.180977	134.378708	Ca-Na-Mg-HCO ₃	40.6	7.24	118
10	Милоградовский	43.407821	134.444357	Ca-HCO ₃	155	5.82	66

№ п/п	Na	Mg	K	Ca	HCO ₃	Fe	Si	Sr	Li	Mn	Zn	As
	мг/л								мкг/л			
1	141	28	8	23	195	4.3	15.3	0.47	183	45	21	8.8
2	67	46	3	443	824	13.5	26.2	4.88	263	1301	42	0.5
3	20	6	1	57	76	25.7	27.4	0.23	65	1498	705	140
4	57	36	3	336	634	0.1	21.5	2.87	253	593	< ПО	< ПО
5	229	22	15	191	676	9.8	33.1	2.17	898	544	6	< ПО
6	98	53	5	270	674	12.4	28.8	4.35	476	1548	< ПО	3.3
7	13	10	2	28	61	23.8	17.8	0.20	66	1746	10	1.4
8	58	13	5	22	171	18.9	11.9	0.19	294	1328	21	2.7
9	3	1	1	4	31	1.4	8.1	0.03	3	76	13	3.8
10	8	3	2	50	95	13.8	10.9	0.20	31	1573	18	23.1

№ п/п	S	Ba	Rb	Pb	Ar	O ₂	He	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
	мкг/л				об. %							
1	187	446.4	8.9	0.11	—	—	—	—	—	—	—	—
2	5056	372.6	4.0	0.29	0.0770	0.0141	0.0011	Н.о.	0.73	0.0032	0.008	99.15
3	2634	9.1	5.3	13.14	0.0297	0.0080	0.0011	Н.о.	1.06	0.0028	0.004	98.60
4	4018	311.9	5.7	0.31	0.0410	0.0940	0.0030	Н.о.	2.31	0.0030	0.013	96.96
5	371	655.3	26.2	0.28	0.0183	0.0086	0.0010	0.0001	0.61	0.0022	2.260	97.05
6	7593	120	10.2	0.38	0.1110	0.0171	0.0037	Н.о.	2.37	0.0026	0.004	97.42
7	921	70.4	5.0	< ПО	—	—	—	—	—	—	—	—
8	1092	119.1	22.3	0.03	0.0384	0.0249	0.0032	0.0005	0.67	0.0031	0.000	98.90
9	1767	7.4	1.3	10.42	0.0547	0.0264	0.0043	Н.о.	1.21	0.0019	0.035	98.61
10	4871	24.5	3.9	0.58	0.0336	0.0121	0.0014	0.0008	1.35	0.0029	0.030	98.46

Примечание. Прочерк здесь и в табл. 2 означает, что проба не анализировалась; ПО – предел обнаружения; Н.о. – не обнаружен.

Note. A dash here and in Table 2 indicates that the sample was not analyzed. ПО, limit of detection. Н.о., not detected.

Таблица 2. Изотопные соотношения кислорода и водорода в углекислых минеральных водах Приморского края
Table 2. Isotopic ratios of oxygen and hydrogen in high pCO₂ mineral waters of Primorsky Krai

Стабильные изотопы, ‰	Номер источника (согласно табл. 1)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
δ ² H	–91	–100.3	–101.4	–100.5	–98.6	–103.8	–102.4	–103.1	–87.8	–60.3
δ ¹⁸ O	–12.8	–14.2	–14.7	–14.1	–13.7	–14.5	–14.2	–14	–12.3	–8.7

Далее подробнее охарактеризуем химический, газовый и изотопный состав минеральных источников Приморского края.

Обсуждение и выводы

Химический состав вод

На основе полученных данных по химическому составу можно выделить несколько генетических групп вод, формирование которых контролируется различными процессами.

1. Воды с ярко выраженным кальциевым составом и влиянием сульфидного окисления (источники «Большой ключ», «Фабричный», «Курортный») характеризуются относительно высокой концентрацией кальция (от 270 до 443 мг/л) и гидрокарбоната (от 634 до 824 мг/л). Это классический признак активного растворения терригенных пород, содержащих карбонат кальция, под действием углекислоты: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$. Присутствие в воде сульфат-иона [7] указывает на окисление сульфидных минералов (например, пирита). Этот процесс также генерирует кислотность, усиливающую выщелачивание. Высокие концентрации железа, марганца и цинка – прямое следствие окисления сульфидов и растворения карбонатов (сидерита, родохрозита, сфалерита). Умеренные значения натрия и калия, а также кремния [7] говорят о вкладе выщелачивания силикатных пород, но он второстепенен по сравнению с карбонатным растворением. Таким образом, данные источники питаются водами, циркулирующими в толщах терригенных пород, содержащих карбонаты, а также прожилковую сульфидную минерализацию, что подтверждается особенностями петрологии вмещающих пород, а также геологического строения территории [10]. Доми-

нирующие процессы – углекислотное растворение карбонатов и окисление сульфидов.

2. Воды натриево-кальциевого состава с признаками глубинной циркуляции и взаимодействия с силикатными породами (источники «Глуховка» и «Покровский»). Высокие концентрации натрия (от 140 до 229 мг/л) при значительных, но не доминирующих концентрациях кальция указывают на активный процесс ионного обмена, где ионы кальция из раствора замещаются натрием из глинистых минералов, что является признаком более длительного и глубинного взаимодействия вода–порода. Аномально высокие концентрации лития и рубидия служат надежным индикатором выщелачивания алюмосиликатов (слюды, полевые шпаты). Высокое содержание кремния также подтверждает длительный контакт с силикатными породами. При этом низкие концентрации сульфатов и восстановительные условия ($E_h = 7\text{--}26$ мВ) предотвращают осаждение барита, чем, в частности, объясняется высокое содержание бария в воде источника «Покровский». Таким образом, эти воды сформировались в результате глубинной циркуляции в толщах кристаллических пород, что подтверждается особенностями геологического строения территории [10, 11]. Их состав сформирован процессами ионного обмена и выщелачивания силикатов при участии глубинной углекислоты. Следует отметить, что оба этих источника изливаются из скважин, что также говорит об отсутствии разбавления вод источников пресными подземными водами.

3. Кислые воды, связанные с активным окислением сульфидов (источники «Неробинский», «Ариадненский нижний», «Милоградовский»), характеризуются низким значением pH (5.38–5.82) и экстремально высокими

концентрациями Al, Fe, Mn (особенно «Неробинский»: Al = 2.5 мг/л, Fe = 25.7 мг/л), что является следствием кислотного сульфатного выщелачивания. В воде отмечаются повышенные содержания тяжелых рудных металлов (цинка, свинца и мышьяка), как результат окисления полиметаллических сульфидов (сфалерит, галенит, арсенопирит соответственно). При этом относительно низкая минерализация указывает на то, что процесс происходит в приповерхностных условиях и вода не успевает сильно минерализоваться. Таким образом, данные источники представляют собой выходы вод, циркулирующих в зонах окисления сульфидных рудопроявлений. Их состав является результатом «кислого дренажа», а не классического углекислотного выщелачивания и может быть использован в качестве оценки ореолов рассеяния рудных элементов при гидрохимических поисках месторождений полезных ископаемых.

4. Воды смешанного типа (источники «Ариадненский верхний», «Пуховский») характеризуются промежуточным составом между представленными выше тремя группами. Так, «Ариадненский верхний» имеет черты как кислых вод (высокие содержания железа и алюминия), так и вод силикатного типа (очень высокие содержания рубидия и цезия, до 14 мкг/л). Источник «Пуховский» резко выделяется нейтральным pH (7.24) и очень низкой минерализацией (TDS = 40.6 мг/л). Это может быть либо результатом сильного разбавления инфильтрационными водами, либо признаком вод, не затронутых глубокими процессами, при котором углекислый газ подводится к самым верхним горизонтам подземных вод [12].

Полученные результаты показывают значительное разнообразие химического состава углекислых вод Приморского края, обусловленное различиями в литологии водовмещающих пород и глубинности протекающих процессов. Выделяются как минимум три генетические группы вод: сформированные в терригенных, кристаллических и рудных (сульфидных) породах. Наличие вод «глубинной силикатной группы» с аномальными концен-

трациями лития, рубидия и бария подтверждает наличие глубинных флюидов и их активное взаимодействие с породами фундамента. Воды зоны «кислого сульфатного выщелачивания» представляют особый интерес как индикаторы рудной минерализации и требуют отдельного изучения. Полученные данные подчеркивают перспективность дальнейших исследований гидроминеральных ресурсов региона не только для бальнеологических целей, но и как индикаторов глубинного строения и рудоносности.

Состав сопутствующих газов

Анализ состава свободно выделяющихся газов минеральных вод Приморского края позволяет сделать важные выводы об их генезисе и условиях формирования. Полученные данные демонстрируют как общие черты, характерные для углекислых вод региона, так и существенные различия, указывающие на разные геохимические процессы на отдельных источниках. При этом поведение радона, выносимого углекислым газом, в минеральных источниках Приморского края обсуждено ранее [13].

Во всех пробах наблюдается подавляющее преобладание углекислого газа (от 96.9 до 99.1 об.%), что подтверждает их принадлежность к классическим углекислым водам, формирование которых связано с поступлением углекислоты. Высокие концентрации обычно являются результатом либо метаморфизма карбонатных пород, либо дегазации мантии по глубинным разломам. При этом проведенные ранее изотопные определения $\delta^{13}\text{C}$ в сопутствующих газах крупнейших месторождений минеральных вод Сихотэ-Алиня свидетельствуют в пользу мантийного генезиса углекислоты.

Содержание азота варьирует в значительном диапазоне (от 0.61 до 2.37 об.%). Для определения его происхождения можно проанализировать азот-аргоновое соотношение (N_2/Ar). Соотношения, значительно отклоняющиеся от атмосферного (38), особенно в пробах источников «Большой ключ» (9.5) и «Фабричный» (56.4), свидетельствуют о неатмосферном происхождении азота. Низкие значения

могут указывать на примесь радиогенного аргона, а высокие – на биогенный источник азота (разложение органического вещества). Присутствие гелия во всех пробах – важный индикатор. Его концентрации хоть и невелики (от 0.00102 до 0.00429 об.%), но значимы. Концентрации аргона также низки. Как и в случае с азотом, отклонения N_2/Ar от 38 помогают исключить или подтвердить атмосферное влияние. Водород и метан являются индикаторами восстановительной среды, и их присутствие в составе газовой фазы служит отражением восстановительных геохимических условий.

Водород обнаружен в пробах источников «Покровский» и «Милоградовский». Его образование чаще всего связано с процессами метаморфизма, протекающими параллельно со взаимодействием воды и силикатных пород (серпентинизация) при повышенных температурах. Концентрации метана испытывают сильные вариации, причем аномально высокое его содержание в том же «Покровском» (2.26 об.%) является уникальным случаем и может свидетельствовать либо о процессах катагенетического преобразования органического вещества на больших глубинах, либо о его мантийном привносе. Низкие концентрации метана в других пробах (менее 0.04 об.%) могут иметь биогенное происхождение.

Следовые количества кислорода (от 0.008 до 0.094 об.%), скорее всего, являются примесью атмосферного воздуха, захваченного при отборе проб. Отсутствие значимых количеств подтверждает восстановительный характер среды. Окись углерода обнаружена во всех пробах в близких концентрациях (от 0.002 до 0.003 об.%). Ее присутствие часто связывают с неполным окислением метана или другими процессами в углеродном цикле в восстановительных условиях.

Данные анализа газов подтверждают, что минеральные воды Приморского края содержат в себе глубинные флюиды, сформированные в восстановительных условиях при активном участии углекислоты, хоть они и неоднородны по своему генезису. Так, газовая фаза источника «Покровский» резко выделяется на общем фоне и требует пристального внимания. Высокое содержание метана делает

ее перспективным объектом для изучения глубинного углеводородного синтеза и связи гидрогеологических и нефтегазогеологических процессов в регионе. Разброс в соотношениях N_2/Ar указывает на разные пути формирования азотной компоненты: от атмосферного влияния до биогенного и радиогенного вклада. Для более точного определения происхождения газов (особенно He и CH_4) необходимо проведение изотопного анализа: $^3He/^4He$ – для разделения мантийного и корового гелия; $\delta^{13}C$ – δ^2H (CH_4) – для определения генезиса метана (термогенный, биогенный, абиогенный); $\delta^{15}N$ (N_2) – для уточнения источников азота.

Таким образом, газовый состав служит надежным индикатором сложных и разнообразных геохимических процессов, происходящих в недрах Сихотэ-Алиня в целом и Приморского края в частности.

Стабильные изотопы δ^2H и $\delta^{18}O$

Анализ данных по стабильным изотопам кислорода и водорода из табл. 2 приводит к следующим ключевым выводам о генезисе и условиях формирования минеральных вод Приморского края. Все пробы характеризуются значительным отрицательным сдвигом изотопных значений относительно стандарта SMOW (Standard Mean Ocean Water). При этом $\delta^{18}O$ варьирует в пределах от –8.70 (источник «Милоградовский») до –14.71 ‰ (источник «Неробинский»), а δ^2H – от –60.28 (источник «Милоградовский») до –103.79 ‰ (источник «Курортный»). Такие отрицательные значения однозначно указывают на атмосферное (метеорное) происхождение вод, при котором исходной влагой являются атмосферные осадки, формирующиеся в условиях холодного климата, что типично для регионов с континентальным климатом и значительной удаленностью от океана [14].

Чтобы точно интерпретировать данные, значения наносятся на график δ^2H vs $\delta^{18}O$ (рис. 2). Однако уже по численным значениям видно, что точки будут смещены вправо от Глобальной метеорной линии воды (GMWL), которая имеет уравнение $\delta^2H = 8 \cdot \delta^{18}O + 10$ [15]. Например, для пробы источника «Неробинский» ($\delta^{18}O = -14.71$ ‰, а $\delta^2H = -101.37$ ‰)

ожидаемое значение $\delta^2\text{H}$ по GMWL будет составлять -107.68‰ , однако фактическое значение (-101.37‰) является более тяжелым по дейтерию, чем ожидалось. Это смещение, характерное для всех проб (кроме, возможно, «Милоградовского»), свидетельствует о процессах изотопного фракционирования после инфильтрации воды в породу. Поскольку исследованные источники не являются термальными водами, для которых был бы возможен процесс испарения, изотопный сдвиг в сторону обогащения кислородом объясняется результатом совокупного взаимодействия порода-вода+газ, при котором происходит изотопный обмен по кислороду. Кислород, находящийся в составе горных пород, а также в углекислом газе, обычно тяжелее, чем в метеорной воде. При формировании углекислых вод происходит насыщение их относительно кальцита, который при выпадении в осадок уносит с собой преимущественно тяжелый ^{18}O . Вода при этом обогащается легким изотопом ^{16}O , что смещает точку вправо по горизонтальной оси. Водород же при этом в обмене практически не участвует, поэтому значение $\delta^2\text{H}$ остается относительно стабильным. Это приводит к наблюдаемому эффекту: $\delta^{18}\text{O}$ уменьшается, а $\delta^2\text{H}$ почти не меняется.

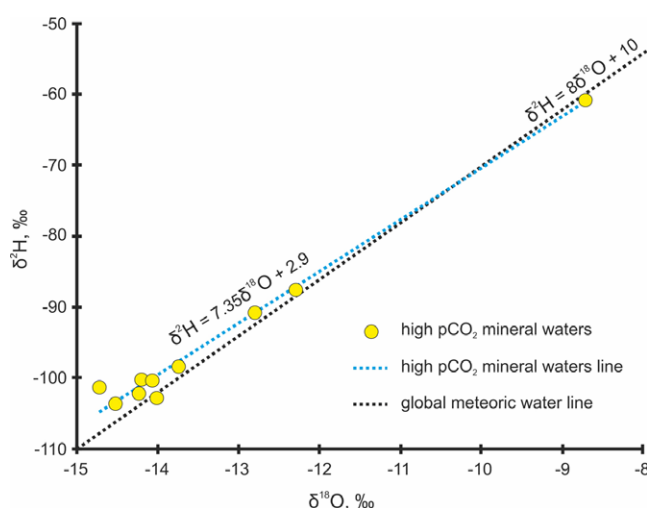


Рис. 2. Диаграмма зависимости $\delta^2\text{H}$ от $\delta^{18}\text{O}$, ‰ для минеральных вод. Черная пунктирная GMWL – линия метеорных вод [15], синяя пунктирная (минеральные воды) – локальная линия для углекислых источников Приморского края.

Fig. 2. Diagram of the dependence $\delta^2\text{H}$ on $\delta^{18}\text{O}$, ‰ for mineral waters. The black dotted line is the global meteoric waters line [15], the blue dotted line is the local line for high $p\text{CO}_2$ mineral waters of Primorsky Krai.

На основе анализа данных выделены два основных кластера минеральных источников. В первую группу попадает подавляющее большинство проб, образующих очень плотную группу со значениями $\delta^{18}\text{O}$ от -14.7 до -13.7‰ и $\delta^2\text{H}$ от -104 до -98‰ , что указывает на сходные условия их формирования в глубинных горизонтах, где происходило интенсивное взаимодействие с породами. Географически они находятся западнее центрального Сихотэ-Алинского хребта в водосборе бассейна р. Амур. Проба источника «Милоградовский» со значениями $\delta^{18}\text{O} = -8.70\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -60.28\text{‰}$ резко выделяется на общем фоне. Такие «тяжелые» значения однозначно указывают на прибрежный источник атмосферного питания, что подтверждается полученными ранее данными [16, 17]. Проба источника «Пуховский», географически расположенного между обозначенной выше группой и источником «Милоградовский», со значениями $\delta^{18}\text{O} = -12.29\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -87.77\text{‰}$, занимает промежуточное положение между пробами основной группы и пробой «Милоградовского» [16]. Это может свидетельствовать о значительной доле разбавления глубинной воды свежими инфильтрационными водами, что согласуется с ее самой низкой минерализацией ($\text{TDS} = 40.6\text{ мг/л}$), отмеченной ранее.

Таким образом, данные по стабильным изотопам кислорода и водорода подтверждают метеорное происхождение минеральных вод Приморского края. Значительный отрицательный изотопный сдвиг характерен для осадков холодного климата континентальных регионов. Наблюдаемое отклонение точек вправо от GMWL является следствием интенсивного изотопного обмена между водой и вмещающими породами в присутствии углекислого газа. Плотная группировка проб доказывает единство источника питания и сходные газогидрогеохимические условия формирования основной группы углекислых вод. Аномальный состав пробы источника «Милоградовский» указывает на ее изолированный генезис и требует пристального внимания к изучению генезиса углекислых источников на восточном склоне Сихотэ-Алия.

Заключение

Основываясь на данных по химическому и изотопному составу вод, а также сопутствующих газов, проведенное комплексное исследование группы малоизученных углекислых минеральных вод Приморского края позволило получить принципиально новые данные об их генезисе и условиях формирования.

1. Установлено генетическое разнообразие вод, обусловленное литологией водовмещающих пород и глубиной протекающих процессов. Выделены три основные генетические группы вод и одна смешанного типа.

2. Газо-геохимические данные подтвердили глубинное происхождение флюидов и восстановительный характер среды. Доминирование CO_2 мантийного генезиса является объединяющим фактором, однако вариации соотношения N_2/Ar и аномально высокое содержание метана в источнике «Покровский» (2.26 об.%) указывают на различные пути формирования газовой фазы – от атмосферного влияния до биогенных и, возможно, термогенных процессов.

3. Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) однозначно подтвердил атмосферное (метеорное) происхождение вод из осадков холодного климата. Наблюдаемый сдвиг относительно Глобальной метеорной линии является следствием интенсивного изотопного обмена в системе «вода–порода–газ». Плотная группировка большинства проб свидетельствует о единстве области питания и сходных условиях глубинной циркуляции, в то время как аномальный изотопный состав источника «Милоградовский» указывает на его обособленный генезис.

Научная и практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты не только углубляют теоретические представления о формировании гидроминеральных ресурсов Сихотэ-Алиня, но и имеют прямую прикладную направленность. Выявленные закономерности являются основой для расширения минерально-сырьевой базы региона за счет переоценки и доразведки известных проявлений; развития бальнеологического направления с учетом уникального источника «Покровский» и других перспективных источ-

ников; проведения геолого-поисковых работ, где воды могут использоваться как индикаторы рудной минерализации.

Перспективы дальнейших исследований связаны с проведением изотопных исследований газов ($^3\text{He}/^4\text{He}$, $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$, $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$) для точной идентификации их источников, а также с организацией мониторинга для оценки устойчивости ресурсов в условиях меняющегося климата и антропогенной нагрузки.

Список литературы

1. Лучанинова В.Н., Каргина А.П., Рудич В.П. **1992**. Минеральные воды Приморского края. *Вестник ДВО РАН*, 3/4: 125–129.
2. Челноков А.Н. **1997**. *Подземные минеральные воды Приморья (распространение, ресурсы и особенности формирования)*: дис. ... канд. геол.-минер. наук. Дальневосточный геологический ин-т, Владивосток, 165 с.
3. Чудаев О.В. **2003**. *Состав и условия образования современных гидротермальных систем Дальнего Востока России*. Владивосток: Дальнаука, 216 с.
4. Шварцев С.Л., Харитонов Н.А., Лепокурова О.Е., Челноков Г.А. **2017**. Генезис и эволюция углекислых минеральных вод месторождения Мухен (Дальний Восток). *Геология и геофизика*, 58(1): 48–59.
5. Челноков Г.А., Брагин И.В., Харитонов Н.А., Александров И.А., Ивин В.В., Челнокова Б.И. **2019**. Геохимия и условия формирования Ульского термального источника (Охотоморское побережье, Хабаровский край). *Тихоокеанская геология*, 38(2): 73–85.
6. Брагин И.В., Павлов А.А., Челноков Г.А., Лаврушин В.Ю., Харитонов Н.А. **2024**. Состав и условия формирования азотно-кремнистых терм Амгинской группы (северо-восток Приморского края). *Тихоокеанская геология*, 43(2): 90–101.
7. Чудаева В.А., Чудаев О.В., Челноков А.Н., Эдмундс У.М., Шанд П. **1999**. *Минеральные воды Приморья (химический аспект)*. Владивосток: Дальнаука, 160 с.
8. Челноков Г.А., Харитонов Н.А. **2008**. *Углекислые минеральные воды юга Дальнего Востока*. Владивосток: Дальнаука, 165 с.
9. Чудаев О.В., Харитонов Н.А., Челноков Г.А., Брагин И.В. **2016**. Гидроминеральные ресурсы Приморского края. *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*, 5(189): 11–20.
10. Ханчук А.И. (ред.) **2006**. *Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России*: в 2 кн. Кн. 1. Владивосток: Дальнаука, 572 с.

11. Khanchuk A.I., Kemkin I.V., Kruk N.N. **2016**. The Sikhote-Alin orogenic belt, Russian South East: Terranes and the formation of continental lithosphere based on geological and isotopic data. *Journal of Asian Earth Sciences*, 120: 117–138. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.10.023>
12. Харитонов Н.А., Вах Е.А., Челноков Г.А., Чудаев О.В., Александров И.А., Брагин И.В. **2016**. Геохимия редкоземельных элементов в подземных водах Сихотэ-Алинской складчатой области (Дальний Восток России). *Тихоокеанская геология*, 35(2): 68–82.
13. Челноков Г.А., Лаврушин В.Ю., Брагин И.В., Харитонов Н.А., Бушкарева К.Ю., Павлов А.А., Челнокова Б.И. **2023**. Радон в минеральных водах Сихотэ-Алиня (Приморский край). *Тихоокеанская геология*, 42(3): 101–115.
14. Dansgaard W. **1964**. Stable isotopes in precipitation. *Journal Earth Sciences Tellus*, 16(4): 436–468. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x>
15. Craig H. **1961**. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133(3465): 1702–1703. <http://dx.doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
16. Харитонов Н.А., Челноков Г.А., Брагин И.В., Вах Е.А. **2012**. Изотопный состав природных вод юга Дальнего Востока России. *Тихоокеанская геология*, 31(2): 75–86.
17. Kurita N., Yoshida N., Inoue G., Chayanova E.A. **2004**. Modern isotope climatology of Russia: A first assessment. *Journal of Geophysical Research*, 109. <https://dx.doi.org/10.1029/2003JD003404>
6. Bragin I.V., Pavlov A.A., Chelnokov G.A., Lavrushin V.Yu., Kharitonova N.A. **2024**. The composition and formation conditions of nitrogen-siliceous thermal waters of the Amgu Group (North-east of the Primorsky Krai). *Russian Journal of Pacific Geology*, 18: 198–209. <https://doi.org/10.1134/S1819714024020039>
7. Chudaeva V.A., Chudaev O.V., Chelnokov A.N., Edmunds W.M., Shand P. **1999**. *Mineral waters of Primorye (Chemical aspect)*. Vladivostok: Dalnauka, 160 p. (In Russ.).
8. Chelnokov G.A., Kharitonova N.A. **2008**. *High PCO₂ mineral waters of the South of Far East of Russia*. Vladivostok: Dalnauka, 165 p. (In Russ.).
9. Chudaev O.V., Kharitonova N.A., Chelnokov G.A., Bragin I.V. **2016**. [Hydromineral resources of Primorsky Krai]. *Vestnik of the FEB RAS*, 5(189): 11–20. (In Russ.).
10. Khanchuk A.I. (Ed.) **2006**. *Geodynamics, magmatism, and metallogeny of Eastern Russia*: in 2 vol. Vol. 1. Vladivostok: Dalnauka, 572 p. (In Russ.).
11. Khanchuk A.I., Kemkin I.V., Kruk N.N. **2016**. The Sikhote-Alin orogenic belt, Russian South East: Terranes and the formation of continental lithosphere based on geological and isotopic data. *Journal of Asian Earth Sciences*, 120: 117–138. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.10.023>
12. Kharitonova N.A., Vakh E.A., Chelnokov G.A., Chudaev O.V., Aleksandrov I.A., Bragin I.V. **2016**. REE geochemistry in groundwater of the Sikhote Alin fold region (Russian Far East). *Russian Journal of Pacific Geology*, 10(2): 141–154. <https://doi.org/10.1134/S1819714016020032>
13. Chelnokov G.A., Lavrushin V.Yu., Bragin I.V., Kharitonova N.A., Bushkareva K.Yu., Pavlov A.A., Chelnokova B.I. **2023**. Radon concentrations in mineral waters of the Sikhote-Alin, Primorsky Krai. *Russian Journal of Pacific Geology*, 17: 284–296. <https://doi.org/10.1134/S1819714023030028>
14. Dansgaard W. **1964**. Stable isotopes in precipitation. *Journal Earth Sciences Tellus*, 16(4): 436–468. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x>
15. Craig H. **1961**. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133(3465): 1702–1703. <http://dx.doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
16. Kharitonova N.A., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Vakh E.A. **2012**. Isotopic composition of natural waters of the southern Far East, Russian. *Russian Journal of Pacific Geology*, 31(2): 75–86. (In Russ.).
17. Kurita N., Yoshida N., Inoue G., Chayanova E.A. **2004**. Modern isotope climatology of Russia: A first assessment. *Journal of Geophysical Research*, 109. <https://dx.doi.org/10.1029/2003JD003404>

References

1. Luchaninova V.N., Kargina A.P., Rudich V.P. **1992**. [Mineral waters of the Primorsky Krai]. *Vestnik of the FEB RAS*, 3/4: 125–129. (In Russ.).
2. Chelnokov A.N. **1997**. [Underground mineral waters of Primorye (distribution, resources, and formation features)]: thesis ... cand. of sci. (Geology and Mineralogy). Far Eastern Geological Institute of the FEB RAS. Vladivostok, 165 p. (In Russ.).
3. Chudaev O.V. **2003**. *Composition and origin of the recent hydrothermal systems in the Far East Russia*. Vladivostok: Dalnauka, 216 p. (In Russ.).
4. Shvartsev S.L., Kharitonova N.A., Lepokurova O.E., Chelnokov G.A. **2017**. Genesis and evolution of high PCO₂ groundwaters of the Mukhen SPA (Russian Far East). *Russian Geology and Geophysics*, 58(1): 48–59.
5. Chelnokov G.A., Bragin I.V., Kharitonova N.A., Alexandrov I.A., Ivin V.V., Chelnokova B.I. **2019**. Geochemistry and conditions of the formation Ul'sk thermal spring (Coast of the Okhotsk, Khabarovsk Krai). *Russian Journal of Pacific Geology*, 13: 163–175. <https://doi.org/10.1134/S1819714019020040>

Об авторах

Брагин Иван Валерьевич (<https://orcid.org/0000-0003-3280-716X>), кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии гипергенных процессов, Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия, bragin_ivan@mail.ru

Челноков Георгий Алексеевич (<https://orcid.org/0000-0001-6020-9277>), кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории тепломассопереноса, Геологический институт Российской академии наук, Москва, Россия, geowater@mail.ru

Лаврушин Василий Юрьевич (<https://orcid.org/0000-0002-4815-7627>), доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, заместитель директора по научной работе, Геологический институт Российской академии наук, Москва, Россия, wl2@yandex.ru

Павлов Андрей Андреевич (<https://orcid.org/0000-0002-8793-4871>), младший научный сотрудник лаборатории геохимии гипергенных процессов, Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия, andreypavlov792@gmail.com

Челнокова Берта Ивановна (<https://orcid.org/0000-0001-7486-2760>), кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории медицинской экологии и рекреационных ресурсов, Дальневосточный научный центр физиологии и патологии дыхания – НИИ медицинской климатологии и восстановительного лечения, Владивосток, Россия, berta-20@mail.ru

Харитоновна Наталья Александровна (<https://orcid.org/0000-0002-0855-3385>), доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, профессор кафедры гидрогеологии, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, tchenat@mail.ru

About the Authors

Bragin, Ivan V. (<https://orcid.org/0000-0003-3280-716X>), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher at the Laboratory of geochemistry of hypergenic processes, Far East Geological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, bragin_ivan@mail.ru

Chelnokov, Georgy A. (<https://orcid.org/0000-0001-6020-9277>), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher at the Laboratory of heat and mass transfer, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, geowater@mail.ru

Lavrushin, Vasily Yu. (<https://orcid.org/0000-0002-4815-7627>), Doctor of Geology and Mineralogy, Principal Researcher, Deputy Director for scientific work, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, wl2@yandex.ru

Pavlov, Andrey A. (<https://orcid.org/0000-0002-8793-4871>), Junior Researcher at the Laboratory of geochemistry of hypergenic processes, Far East Geological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, andreypavlov792@gmail.com

Chelnokova, Berta I. (<https://orcid.org/0000-0001-7486-2760>), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Researcher at the Laboratory of medical ecology and recreational resources, Far Eastern Scientific Center of Physiology and Pathology of Respiration – Research Institute of Medical Climatology and Rehabilitation Treatment, Vladivostok, Russia, berta-20@mail.ru

Kharitonova, Natalia A. (<https://orcid.org/0000-0002-0855-3385>), Doctor of Geology and Mineralogy, Principal Researcher, Professor at the Department of Hydrogeology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, tchenat@mail.ru

Поступила 03.10.2025

Принята к публикации 18.10.2025

Received 3 October 2025

Accepted 18 October 2025

© Авторы, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.8;004.8;004.93

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.410-419>
<https://www.elibrary.ru/reyvch>

Определение оптимальной длительности временного окна для выделения аномалий акустической эмиссии перед сильными землетрясениями на Камчатке

Ю. И. Сенкевич[@], М. А. Мищенко

^{@E-mail:} senkevich@ikir.ru

*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
Паратунка, Россия*

Резюме. На Камчатке в ходе многолетнего мониторинга накоплен обширный эмпирический материал, отражающий динамику параметров акустической эмиссии (АЭ) приповерхностных осадочных пород на этапе подготовки сильных землетрясений. Статья посвящена изучению характеристик акустического сигнала в диапазоне частот от 10 Гц до 10 кГц, источником которого являются приповерхностные осадочные породы. Сформулирована гипотеза, согласно которой фрагменты АЭ, длительностью от нескольких часов до нескольких суток, перед сильными землетрясениями на Камчатке содержат информативные признаки подготовки сейсмических событий. Выполненное для верификации данной гипотезы исследование направлено на идентификацию специфического класса аномалий характеристик АЭ, ассоциированных с возникновением сильных сейсмических событий. Ключевой проблемой в рамках данной задачи является определение временных границ интервалов проявления указанных аномалий. Обнаружено значительное многообразие форм аномалий и их временной протяженности, обусловленное нелинейностью процессов генерации АЭ и воздействием внешних природных факторов. В таких условиях выделение искомым признаков параметрической связи наблюдаемых аномалий АЭ со следующими за ними землетрясениями существенно зависит от правильно выбранных границ интервалов обработки фиксируемого сигнала. Изложен подход к решению задачи определения границ интервала. Представлено практическое доказательство существования класса аномалий, связанных с подготовкой землетрясений. Разработана методика поиска оптимального временного интервала выделения таких аномалий с использованием методов искусственного интеллекта.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, приповерхностные породы, предсейсмические аномалии, нейронные сети

Searching the optimal time window duration for detecting acoustic emission anomalies preceding major earthquakes on Kamchatka

Yury I. Senkevich[@], Mikhail A. Mishchenko

^{@E-mail:} senkevich@ikir.ru

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, FEB RAS, Paratunka, Russia

Abstract. Extensive empirical data have been accumulated during long-term monitoring on Kamchatka, which reflect the dynamics of the parameters of the acoustic emission (AE) of near-surface sedimentary rocks during the initiation of strong earthquakes. The article is devoted to the study of the characteristics of the acoustic signal in the frequency range of 10 Hz to 10 kHz, the source of which is near-surface sedimentary rocks. A hypothesis was formulated suggesting that fragments of the AE signal lasting from several hours to several days contain features indicating the initiation of seismic events preceding strong earthquakes in Kamchatka. To verify this hypothesis, a study was carried out to identify a specific class of anomalies in the parameters of AE signals correlated with the occurrence of strong seismic events. The key challenge in this task was determining the temporal boundaries of the intervals during which these

anomalies occur. A significant diversity in the forms of anomalies and their temporal duration was discovered, caused by the nonlinearity of AE generation processes and the influence of a wide spectrum of external natural factors. Under such conditions, the successful identification of the desired features of the parametric relationship between the observed AE anomalies and subsequent earthquakes depends strongly on the proper selection of boundaries of the signal processing intervals. The study presents the solution to the problem of determining interval boundaries, provides evidence for the existence of a class of anomalies associated with the initiation of earthquakes, and introduces a method for finding the optimal time interval for identifying such anomalies using artificial intelligence.

Keywords: acoustic emission, near-surface rocks, preseismic anomalies, neural networks

Для цитирования: Сенкевич Ю.И., Мищенко М.А. Определение оптимальной длительности временного окна для выделения аномалий акустической эмиссии перед сильными землетрясениями на Камчатке. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 4, с. 410–419. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.410-419>; <https://www.elibrary.ru/reyvch>

For citation: Senkevich Yu.I., Mishchenko M.A. Searching the optimal time window duration for detecting acoustic emission anomalies preceding major earthquakes on Kamchatka. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 4, pp. 410–419. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.410-419>; <https://www.elibrary.ru/reyvch>

Финансирование и благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (№ темы 124012300245-2).

Funding and Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the state task of the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation of FEB RAS (No. 124012300245-2).

Введение

Акустическая эмиссия (АЭ) в осадочных породах генерируется в результате нелинейной перестройки элементов мелкозернистой структуры сыпучих грунтов, обусловленной деформационными процессами и явлением дилатансии [1–3]. Деформационные процессы, инициируемые тектоническими движениями, поддерживают неустойчивое напряженно-деформированное состояние среды в верхних слоях литосферы [4]. Такое состояние среды способно вызывать мгновенную реакцию осадочных пород даже на слабое воздействие поверхностных волн, порождаемых сейсмическими процессами. Реакция проявляется как заметное изменение характеристик АЭ, таких как количество импульсов, распределение их по длительности, амплитуде и скважности. В определенных случаях подобные проявления удастся связать с отдельными сейсмическими событиями [3–8]. В ходе многолетних наблюдений, проводимых в лаборатории акустических исследований ИКИР ДВО РАН, удалось обнаружить связь изменений характеристик АЭ с моментами возникновения

сильных землетрясений на Камчатке [7–11]. Установленный факт лег в основу поиска и обоснования предвестников землетрясений на основе наблюдаемых изменений характеристик АЭ [9–12].

Известная проблема поиска устойчивых признаков, указывающих на подготовку землетрясения, состоит в нелинейной реакции поверхностных слоев литосферы на сейсмические процессы [2, 3, 5, 6]. Это отражается на характеристиках получаемых сигналов и, как следствие, на характеристиках АЭ. Поэтому целью проведенных исследований был поиск скрытых закономерностей в изменчивости характеристик АЭ на различных интервалах наблюдения, измеренных за фиксированные периоды продолжительностью от нескольких часов до нескольких суток. Характерные особенности сигнала АЭ, полученные на интервалах наблюдения непосредственно перед землетрясениями, в отличие от характеристик сигнала АЭ, наблюдаемых на интервалах, значительно удаленных по времени от моментов начала и окончания землетрясений, далее будем называть аномалиями акустической эмиссии.

Материалы и метод

Для изучения аномалий АЭ был разработан подход к представлению серии последовательных оценок характеристики сигнала на определенном временном интервале в виде отображения, подготовленного к дальнейшей обработке и анализу с использованием нейронных сетей. Далее поясним детально причины и сущность применяемого подхода.

Данное исследование проводилось в лаборатории акустических исследований ИКИР ДВО РАН на основе базы данных записей сигнала АЭ, накопленных в период с сентября 2016 по декабрь 2019 г. Сигнал АЭ регистрировался в приповерхностных породах при помощи пьезокерамического гидрофона, установленного в искусственном водоеме в пункте наблюдений «Карымшина» и обеспечивающего прием сигнала в диапазоне частот 10 Гц – 10 кГц. Частота оцифровки регистрируемого сигнала составляла 48 кГц. Расчетный радиус полусферы приема в принимаемом частотном диапазоне составляет от 10 до 30 м. Основная часть принимаемых источников АЭ описывается свойствами фракций геологической колонки, представляющих приповерхностные осадочные породы.

На рис. 1 приведены случайно выбранные файлы из базы данных, в которой хранятся последовательно записанные пятнадцатиминутные фрагменты записи сигнала АЭ, каждый из

которых представляет собой последовательность акустических импульсов. По каждому импульсу проводится измерение различных его параметров (амплитуда, длительность, межимпульсный интервал). На каждом фрагменте можно выделить более тысячи отдельных импульсов (2262 и 3454 импульса на рис. 1 а, б соответственно), что позволяет получать параметрические оценки с достаточной статистикой, содержащей необходимую информацию о параметре распределения на каждом таком фрагменте сигнала. Например, за сутки можно получить 96 таких оценок и проследить изменчивость выбранной характеристики за данный период наблюдений. Поэтому для дальнейшего анализа изменчивости характеристик АЭ на интервале наблюдения применялся метод статистической оценки изменчивости выбранного параметра.

Таким образом, сигнал АЭ на интервале наблюдения рассматривается как поток акустических импульсов с изменяющимися во времени статистическими характеристиками.

Разные фрагменты записи сигнала значительно различаются по структуре полученных нами параметрических оценок отдельно для каждой из характеристик сигнала АЭ, таких как амплитудное распределение, распределение длительности импульсов и распределение межимпульсного интервала. Далее мы представим результаты обработки и анализа изменчивости только амплитудного распределения как

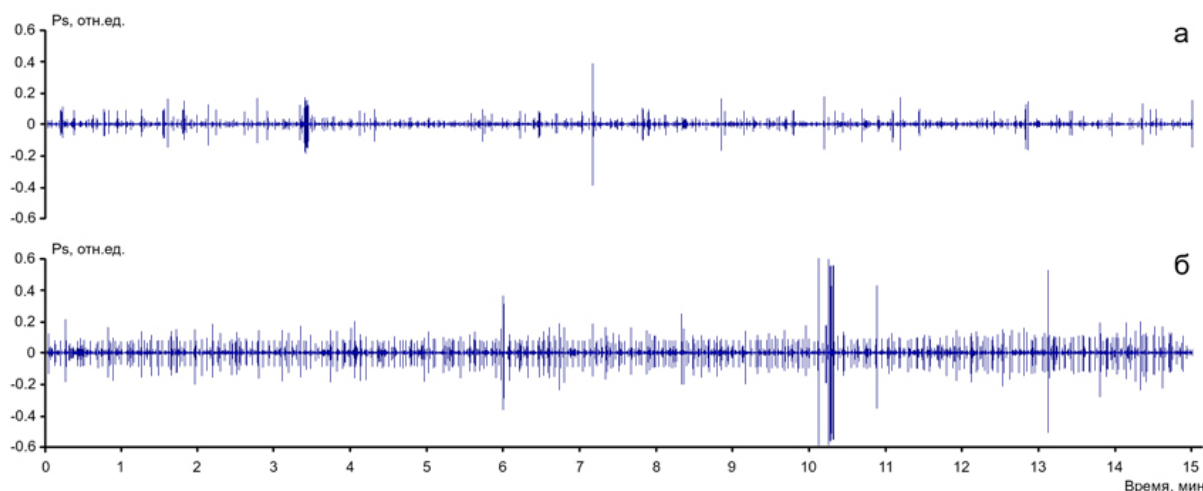


Рис. 1. Фрагменты записи сигнала акустической эмиссии, зарегистрированного 10 января (а) и 25 сентября (б) 2025 г.

Fig. 1. Fragments of the acoustic emission signal recorded on January 10 (a) and September 25 (б), 2025.

наиболее показательного примера для демонстрации предложенного подхода.

На графиках рис. 2 а, б приведены гистограммы распределения амплитуды импульсов, выделенных с фрагментов записи рис. 1 а, б сигнала акустической эмиссии.

Записи сигнала акустической эмиссии, представленные на фрагментах рис. 1 а, б, заметно различаются по картине распределения амплитуд импульсов, что отражается на гистограммах на рис. 2 а, б. Однако чаще всего графическое представление распределений визуальнo трудно различимо даже при сравнении большого числа последовательных фрагментов сигнала. На практике это проявляется

в сложности поиска качественных различий при инструментальном сравнении результатов обработки сигналов и их идентификации. В дальнейшем это серьезно затрудняет задачу достоверного выделения интервалов со специфической изменчивостью выбранной характеристики сигнала, связанной с землетрясением и не связанной с ним. Для выхода из создавшейся ситуации была предпринята попытка анализа трехмерных графических отображений (рис. 3).

На рис. 3 приведены последовательно записанные пятнадцатиминутные фрагменты сигнала АЭ в виде поочередно выстроенных нормированных гистограмм распределения

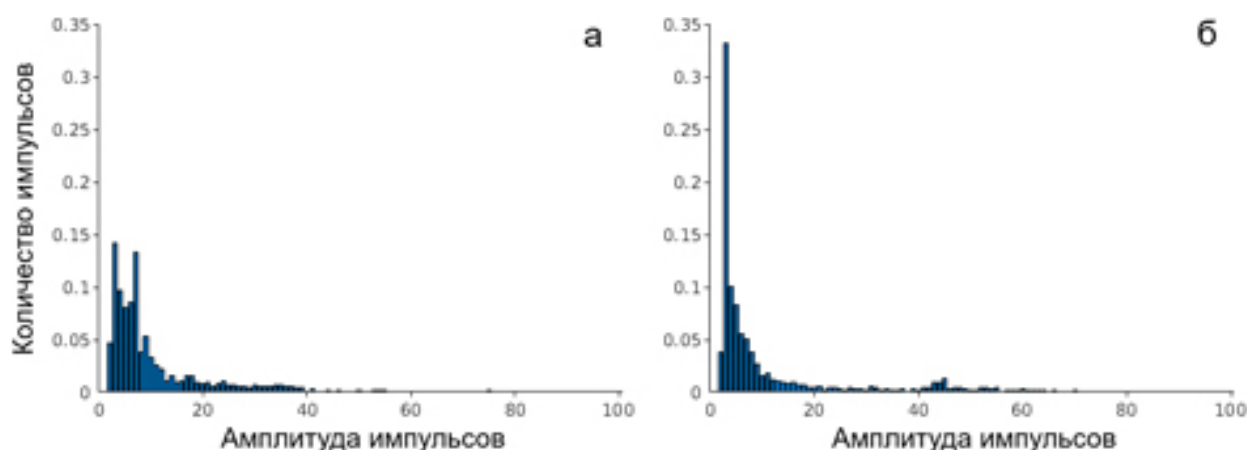


Рис. 2. Гистограммы распределения амплитуды импульсов сигнала акустической эмиссии, построенные по фрагментам записей на рис. 1 а, б.

Fig. 2. Histograms of the acoustic emission pulses amplitude distribution, constructed from fragments of the records in Fig. 1 а, б.

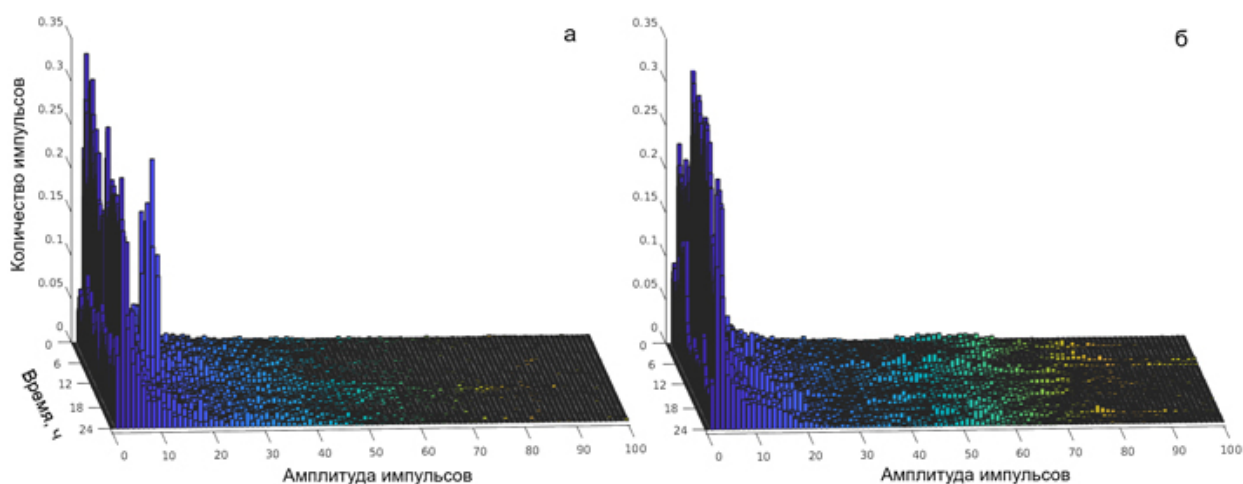


Рис. 3. Пример формирования массива данных динамики распределения амплитуды импульсов сигнала АЭ за сутки 10 января (а) и 25 сентября (б) 2025 г.

Fig. 3. An example of the formation of the data array of the distribution dynamics of the amplitude of the acoustic emission signal pulses over a day: January 10 (а) and September 25 (б), 2025.

амплитуд импульсов. При таком представлении картина изменчивости характеристики сигнала на суточном интервале обработки сигнала АЭ более наглядна. Такое графическое отображение лучшим образом отражает динамику амплитудного распределения на интервале обработки. Однако как визуальный, так и инструментальный анализ еще более усложнился.

Решение возникшей проблемы с анализом трехмерных отображений было подсказано в ходе изучения высококачественной обработки и классификации изображений современными программно-ориентированными архитектурами нейронных сетей. Такие нейронные сети широко используются в различных научных областях для идентификации, кластеризации и классификации 3D-изображений. Поэтому уже полученные массивы данных динамики распределения амплитуды импульсов сигнала АЭ были трансформированы в матричные представления 3D-отображений. На рис. 4 а, б представлена пара таких отображений, полученных на основе данных с рис. 3. Более детально формирование 3D-матриц отображений и их использование для идентификации аномалий АЭ перед сильными землетрясениями представлено в описании патента [9, 12].

Оставалась нерешенной еще одна важная задача – определение оптимального интервала для выделения аномалий изменчивости характеристик АЭ, связанных с землетрясениями. Решению этой задачи и посвящено настоящее исследование.

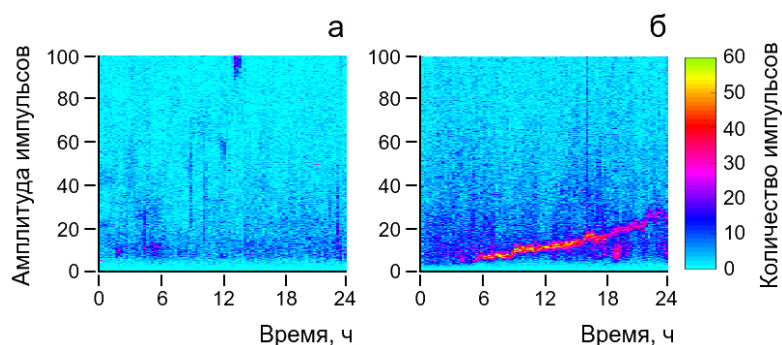


Рис. 4. Графическое представление массивов данных динамики распределения амплитуды импульсов сигнала АЭ (см. рис. 3 а, б), подготовленное для нейронной сети.

Fig. 4. Graphical representation of data arrays of the distribution of the dynamics of the pulse amplitude of the acoustic emission signal pulses (see Fig. 3 а, б), prepared for a neural network.

Постановка задачи исследования

Получен сигнал АЭ $s(t)$, определенный на временном интервале $t \in [0, T]$. Требуется найти временной интервал $\tau = [t_s, t_e]$, где $0 \leq t_s < t_e \leq T$, на котором заданный критерий качества $Q(\tau)$ достигает своего максимального значения. Здесь t_s, t_e – начало и конец искомого интервала. Критерий $Q(\tau)$ оценивает степень выраженности аномалии в динамике определенной характеристики сигнала $s(t)$, ассоциированной с наблюдаемым сейсмическим событием. Интервал наблюдения $[0, T]$ избыточен и гарантированно покрывает всю значимую часть аномалии, включая ее полное проявление.

Принимается условие о привязке окончания временного окна для искомых интервалов выделения аномалий АЭ к моментам, связанным с соответствующими землетрясениями: ($t_e = T$), следовательно $\tau = [t_s, T]$. Тогда целевую функцию поиска лучшего интервала выделения аномалий АЭ можно представить как

$$\tau^* = \max_{\tau \in [0, T]} Q(\tau). \quad (1)$$

В условиях влияния на результат вычисления (1) неопределенного числа факторов, в первую очередь нелинейности сейсмических процессов, оптимальным значением интервала правомерно принять некоторое среднее его значение $\tau_{\text{opt}} = \langle \tau^* \rangle$ среди множества полученных значений.

Ограничения для решения задачи следующие. Применяется оценка степени различимости объектов, сформированных на базе преобразования фрагментов сигнала $s(t)$, на равных интервалах τ . Интервалы, связанные с сейсмическим событием, объединены во множество $[\tau^S]$. Интервалы, не связанные с сейсмическими событиями, объединены во множество $[\tau^N]$. Должно выполняться условие непересечения любых фрагментов сигнала, входящих во множества. Фрагменты сигнала обоих множеств с помощью структурного преобразования переводятся в матричное представление, отражающее изменчивость характеристик

сигнала [10]. Структурное преобразование включает два этапа: первый – вычисление расчленения выбранного параметра сигнала для каждого фрагмента множеств $[\tau^S]$ и $[\tau^N]$ в виде множеств векторов $[v^S]$ и $[v^N]$ соответственно; второй – деление множеств векторов $[v^S]$ и $[v^N]$ на $k = \tau^*/\mu$ (μ – минимальное значение интервала записи сигнала АЭ, равное 15 мин) подмножеств векторов и составление матриц-образов для каждого из полученных подмножеств. В результате структурного преобразования формируются два множества объектов S и N , соответствующие исходным множествам фрагментов сигнала, трансформированным в трехмерные отображения. Теперь качество выделения аномалий АЭ на заданном интервале τ^* можно оценить через результат решения задачи классификации объектов S и N .

Пусть задана фиксированная модель классификатора f . $S = \{S_0, S_1, \dots, S_k\}$ и $N = \{N_0, N_1, \dots, N_k\}$ – наборы объектов, подготовленные структурным преобразованием для серии интервалов $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$ ($\tau_0 < \tau_1 < \dots < \tau_k$) для обоих классов. $D = \{s_i, n_i\}_{i=1}^k$ – датасеты с объектами, собранные для классификации с использованием нейросети, где k – число пар обучающих примеров. Тогда целевую функцию поиска лучшего интервала выделения аномалий АЭ (1) можно заменить функцией поиска индекса i , соответствующего интервалу τ^* . Требуется определить индекс с максимальным значением метрики качества классификации J для фиксированной модели классификатора $f(2)$:

$$i^* = \arg \max_{i \in [0, k]} J(f(d_i)). \quad (2)$$

Методика экспериментов

При поиске оптимального интервала выделения аномалий АЭ, связанных с землетрясениями, принято утверждение, что в основе главных причин, влияющих на изменение характеристик АЭ в осадочных породах, лежит явление дилатансии – процесс увеличения объема породы перед разрывом, который вызван образованием микротрещин под действием высокого напряжения, и другими разруше-

ниями приповерхностных пород в периоды подготовки землетрясений [2, 3]. Изменения характеристик сигнала в периоды, предшествующие землетрясениям, проявляются как аномалии по отношению к периодам, удаленным от моментов подготовки землетрясений, когда изменчивость характеристик выражена слабее или вызвана другими причинами внешнего воздействия на приповерхностные породы. В результате воздействий разной степени параметры АЭ, такие как амплитуда, форма импульсов и межимпульсный интервал, меняются. Для выявления возможной специфики такой изменчивости выполняется препроцессинг групп фрагментов сигнала в виде следующей последовательности операций:

1. Эмпирически выбирается последовательность k – значений временных интервалов, удовлетворяющих условию поставленной задачи исследования.

2. Из регионального сейсмического каталога [13] отбираются m землетрясений, для которых выполняется условие (3):

$$D/R_D < 1, R_D = 10^{0.43(K_S - 4.6)/1.5} \quad (3)$$

где R_D – радиус зоны Добровольского, D – расстояние от пункта наблюдений до гипоцентра землетрясения, K_S – энергетический класс землетрясения.

3. Из непрерывного сигнала извлекаются две группы его фрагментов различной длительности по k серий каждая. Каждая серия первой группы составляется из фрагментов, привязанных ко времени начала одного из m землетрясений. Каждая серия второй группы составляется из фрагментов, не связанных с землетрясениями. В результате будет получено $2 \times k \times m$ фрагментов.

4. Выполняется препроцессинг всех полученных фрагментов применением структурного преобразования [9, 10]. В результате получаем отображения, отражающие динамику характеристик АЭ на заданных по длительности фрагментах сигнала.

5. Упорядоченные отображения дополняются соответствующими метками, указывающими на связь этих объектов с землетрясениями или отсутствием такой связи.

Соответственно, формируются два класса объектов. Объекты собираются в датасеты с использованием программы из библиотеки глубокого обучения нейронных сетей Keras.

6. Объекты в датасетах перемешиваются, датасеты подвергаются очистке от выбросов, выравниваются по числу элементов в классах путем аугментации. Перечисленные операции проводятся с использованием программ из библиотеки глубокого обучения нейронных сетей Keras.

7. Определяется степень близости паттернов отображений к определенному классу для каждой серии с применением подготовленных алгоритмов детектирования по классам. Проводится кластеризация, обучение и тестирование нейросети. Для детектирования синтезирована нейронная сеть – классификатор на основе архитектуры RedNet, состоящий из трех остаточных блоков и двух полносвязных слоев. Архитектура нейронной сети собрана в результате решения задачи оптимизации качества классификации отображений в ходе предшествующих исследований [10–12].

8. Результаты детектирования сравниваются по метрикам правильного и ошибочного выбора элементов по классам для каждой серии. Делается выбор серии с лучшим показателем средней точности распознавания.

Подготовка и обработка данных

Для решения поставленной задачи использовалась база данных записей сигнала АЭ, накопленных в период с сентября 2016 по декабрь 2019 г. Также из регионального сейсмического каталога [13] были отобраны землетрясения с энергетическим классом $K_s \geq 10,0$, произошедшие в согласованный с базой данных период. С учетом временных окрестностей этих землетрясений на основе записей сигнала АЭ строились матрицы отображений (графические изображения, такие, как на рис. 4), которые отражают динамику распределения амплитуды импульсов.

Для обучения нейронной сети было определено два класса матриц отображений. Первый класс – pred объединяет элементы,

представляющие фрагменты сигнала, предшествующие моментам начала каждого из выбранных землетрясений на заданных временных интервалах в 1, 3, 10 и 20 сут (рис. 5). Второй класс – fone объединяет элементы с аналогичной предыдущим элементам длительностью фрагментов сигнала АЭ, выбранных таким образом, чтобы не перекрывать временные интервалы элементов предыдущих последовательностей. Согласно ограничениям при постановке задачи исследований, подмножества элементов классов не пересекаются ($\{upre\} \cap \{ufon\} = \emptyset$). Исходные матрицы отображений имеют размерность 256×256 пиксел. В ходе предобработки отображения функцией сплайн аппроксимации преобразуются к стандарту изображений нейросетевой обработки с архитектурой ResNet – 64×64 , из которых и формируется датасет.

На рис. 6 приведен пример подготовленных отображений классов pred и fone на интервале наблюдений одни сутки. Распределение отобранных фрагментов по классам и сериям представлено в табл. 1.

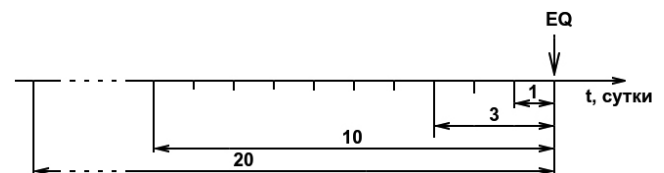


Рис. 5. Иллюстрация выбора временного интервала фрагмента сигнала в окрестности землетрясения для проведения эксперимента.

Fig. 5. Illustration of the selection of the time interval of a signal fragment in the vicinity of an earthquake for conducting an experiment.

Таблица 1. Распределение фрагментов сигнала АЭ по группам

Table 1. Distribution of AE signal fragments by groups

Название класса	Серия, сутки	Количество элементов в серии
pred	1	31
	3	28
	10	31
	20	31
fone	1	1138
	3	305
	10	66
	20	19

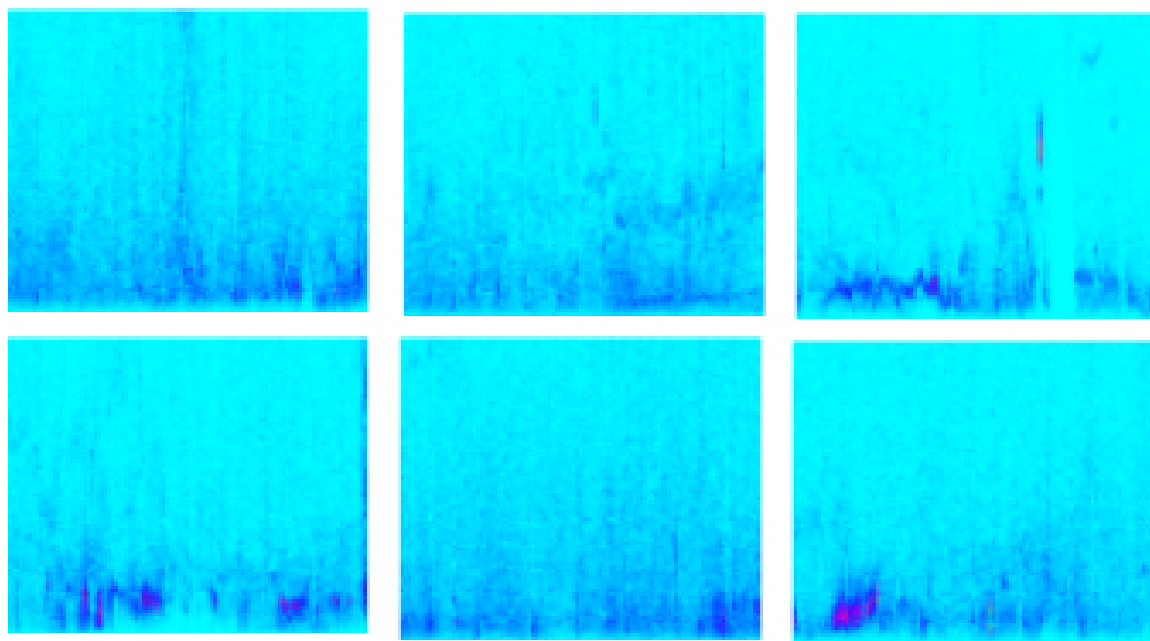


Рис. 6. Примеры отображений класса pred (верхний ряд) и класса fone (нижний ряд).
Fig. 6. Examples of mappings of the “pred” class (top row) and the “fone” class (bottom row).

В табл. 2 представлены результаты проведения экспериментов по приведенной выше методике. В ней по строкам показаны значения долей верно распознанных элементов классов pred и fone, а также ошибочно обнаруженные элементы для каждого из классов соответственно.

Таблица 2. Результаты идентификации элементов классов pred и fone с использованием нейросетевой обработки и классификации для всех серий каждой из групп

Table 2. Results of the identification of elements of the “pred” class and the “fone” class using neural network processing and classification for all series of each group

Индекс	Серия (сутки)	Доля верно распознанных классов (доля ошибочно распознанных классов)	Средняя точность распознавания, %
0	1	0.96 (0.04) 0.97 (0.03)	96
1	3	0.92 (0.08) 0.95 (0.05)	94
2	10	0.00 (1.00) 1.00 (0.00)	51
3	20	0.94 (0.06) 0.97 (0.03)	96

Примечание. Верхняя строка – класс pred, нижняя – класс fone.

Note. Top row is the “pred” class, bottom row is the “fone” class.

Анализ результатов и выводы

При постановке задачи теоретически было показано, что в силу неявного характера изменений характеристик АЭ при выборе лучшего интервала для обнаружения предсейсмических аномалий целесообразно использовать показатель индекса качества классификации, который в нашем случае представлен средней точностью распознавания.

Разработанная методика экспериментов позволила выявить лучшие интервалы для выделения аномалий характеристик АЭ, непосредственно предшествующих сильным землетрясениям, отобранным по значениям показателя радиуса Добровольского. Так, лучший показатель средней точности распознавания классов (96 %) получен в серии с данными на интервалах 1 и 20 сут. В серии с данными на интервале в 10 сут результат распознавания самый низкий – отображения не распознаются и алгоритм относит их полностью к классу fone. Попытки дополнительной очистки классов от возможных выбросов в составе датасетов не привели к улучшению показателей.

На основании полученных результатов можно предположить, что на интервалах наблюдений сигнала АЭ до 20 сут включительно

существуют временные рамки, которые наиболее предпочтительны (1, 3 и 20 сут) для поиска и выделения аномалий АЭ, предшествующих сильным землетрясениям. Согласно поставленному в задаче исследования критерию, эти временные периоды являются оптимальными. В то же время существует период в 10 сут, который дает негативный результат в ходе обнаружения и классификации отображений динамики амплитудных распределений АЭ. Для уточнения вероятностных границ такого интервала следует провести дополнительные исследования. Но уже сейчас можно сказать, что изменение интервала наблюдения от 1 до 20 сут не отвечает закону прямой пропорциональности при распознавании классификатора на базе испытанной архитектуры нейронной сети.

С одной стороны, полученное высокое значение показателя качества классификации, соответствующее интервалу наблюдений в 20 сут, наводит на мысль о возможности поиска информативных фрагментов сигнала АЭ с еще большими значениями интервалов. С другой стороны, полученный «провал» в значении критерия качества классификации на интервале в 10 сут и его повышение на периоде 20 сут может указывать на возможность обнаружения информативных аномалий АЭ, непосредственно не привязанных своей конечной границей к моментам начала землетрясения. Такая гипотеза потребует дополнительных исследований с применением, например, скользящих окон.

В целом в результате проведенного исследования удалось показать существование конечных интервалов наблюдений с лучшими качественными показателями выделения аномальных характеристик сигнала АЭ, которые наблюдаются в периоды, предшествующие началу сильных землетрясений на Камчатке, а также показать работоспособность представленного подхода к изучению сигналов АЭ и эффективность разработанной методики проведения экспериментов.

Список литературы

1. Спивак А.А., Рыбнов Ю.С. **2021**. Акустические эффекты сильных землетрясений. *Физика Земли*, 1: 41–50. doi:10.31857/S0002333721010099; EDN: PPIWNS
2. Сычев В.Н., Богомолов Л.М. **2013**. Потенциал методов нелинейной динамики для анализа геофизических рядов и сейсмичности. В кн.: *VI Международная конференция: Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений, Паратунка, Россия, 9–13 сентября*, с. 77. URL: <https://www.ikir.ru/export/sites/ikir/ru/Events/Conferences/2013-VI-international/thesis-19.08.2013.pdf> (дата обращения: 01.08.2025).
3. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А. **2012**. Развитие приповерхностных зон дилатансии как возможная причина аномалий в параметрах сейсмической эмиссии перед сильными землетрясениями. *Тихоокеанская геология*, 31(1): 96–106. EDN: OXSTWD
4. Segall P. **2010**. *Earthquake and volcano deformation*. Princeton, NJ, Princeton Univ. Press, xxiii+432 p.
5. Чеботарева И.Я., Володин И.А., Дрягин В.В. **2017**. Акустические эффекты при деформировании структурно неоднородных сред. *Акустический журнал*, 63(1): 84–93. doi:10.7868/S0320791916060046; EDN: YVXCUN
6. Соболев Г.А., Пономарев А.В. **2003**. *Физика землетрясений и предвестники*. М.: Наука, 270 с. EDN: RVEBFL
7. Муратов П.В., Руленко О.П., Марапулец Ю.В., Солодчук А.А. **2018**. Электрический и акустический отклик приповерхностных осадочных пород на прохождение сейсмических волн от землетрясений. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 25(5): 62–73. doi:10.18454/2079-6641-2018-25-5-62-73; EDN: YSQAAGL
8. Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М., Ларионов И.А., Мищенко М.А., Щербина А.О., Солодчук А.А. **2012**. Отклик геоакустической эмиссии на активизацию деформационных процессов при подготовке землетрясений. *Тихоокеанская геология*, 31(6): 59–67. EDN: PVYCVV
9. Патент RU 2758582 С1. *Способ обнаружения комплексного предвестника землетрясений*. Авт.: Сенкевич Ю.И., Марапулец Ю.В., Луковенкова О.О., Солодчук А.А., Мищенко М.А., Малкин Е.И., Гапеев М.И. № 2020138668; заявл. 26.11.2020; опубл. 29.10.2021, Бюл. № 31.
10. Сенкевич Ю.И., Мищенко М.А. **2023**. Методика оценки состояния приповерхностных осадочных пород по результатам наблюдений динамических характеристик геоакустической эмиссии. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 45(4): 109–121. doi:10.26117/2079-6641-2023-45-4-109-121; EDN: UMHNFL
11. Сенкевич Ю.И., Марапулец Ю.В., Луковенкова О.О., Солодчук А.А. **2019**. Методика выделения информативных признаков в сигналах геоакустической эмиссии. *Информатика и автоматизация (Труды СПИИРАН)*, 18(5): 1066–1092. doi:10.15622/sp.2019.18.5.1066-1092
12. Сенкевич Ю.И. **2024**. Обработка и подготовка данных наблюдений в интересах выделения особенностей динамики характеристик геоакустической эмиссии. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 47(2):

75–94. doi:10.26117/2079-6641-2024-47-2-75-94; EDN: ETBXVH

13. *Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 г. – наст. вр.)*. Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН. URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (дата обращения: 05.02.25).

References

1. Spivak A.A., Rybnov Y.S. **2021**. Acoustic effects of strong earthquakes. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 57(1): 37–45. doi:10.1134/S1069351321010092; EDN: DIDENF
2. Sychev V.N., Bogomolov L.M. **2013**. Potential of non-linear dynamics methods for analysis of geophysical series and seismicity. In: *VI International conference: Solar-terrestrial relations and physics of earthquakes precursors, Paratunka, Russia, September 9–13*, p. 179. URL: <https://www.ikir.ru/export/sites/ikir/ru/Events/Conferences/2013-VI-international/thesis-19.08.2013.pdf> (accessed 01.08.2025).
3. Saltykov V.A., Kugaenko Y.A. **2012**. Development of near-surface dilatancy zones as a possible cause for seismic emission anomalies before strong earthquakes. *Russian Journal of Pacific Geology*, 6(1): 86–95. doi:10.1134/S1819714012010113; EDN: PDKQFF
4. Segall P. **2010**. *Earthquake and volcano deformation*. Princeton, NJ, Princeton Univ. Press, xxiii+432 p.
5. Chebotareva I.Y., Volodin I.A., Dryagin V.V. **2017**. Acoustic effects in the deformation of structurally inhomogeneous media. *Acoustical Physics*, 63(1): 86–94. doi:10.1134/S106377101606004X; EDN: YVHORL
6. Sobolev G.A., Ponomarev A.V. **2003**. [*Earthquake physics and precursors*]. Moscow: Nauka, 270 p. (In Russ). EDN: RVEBFL
7. Muratov P.V., Rulenko O.P., Marapulets Y.V., Solodchuk A.A. **2018**. Electrical and acoustic response of the near-surface sedimentary rocks to seismic earthquake waves passing. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*, 25(5): 62–73. (In Russ.). doi:10.18454/2079-6641-2018-25-5-62-73; EDN: YSQAGL
8. Marapulets Y.V., Shevtsov B.M., Larionov I.A., Mishchenko M.A., Shcherbina A.O., Solodchuk A.A. **2012**. Geoacoustic emission response to deformation processes activation during earthquake preparation. *Russian Journal of Pacific Geology*, 6(6): 457–464. doi:10.1134/S1819714012060048; EDN: RGJBBZ
9. Patent RU 2758582 C1. [*A method for detecting a complex earthquake precursor*]. **2021**. Authors: Senkevich Yu.I., Marapulets Y.V., Lukovenkova O.O., Solodchuk A.A., Mishchenko M.A., Malkin E.I., Gapeev M.I. No. 2020138668; appl. 26.11.2020; publ. 29.10.2021, Bull. 31. (In Russ.).
10. Senkevich Yu.I., Mishchenko M.A. **2023**. Method for estimation of near-surface sedimentary rock state based on the results of observations of geoacoustic emission dynamic characteristics. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*, 45(4): 109–121. doi:10.26117/2079-6641-2023-45-4-109-121; EDN: UMHNFL
11. Senkevich Yu., Marapulets Yu., Lukovenkova O., Solodchuk A. **2019**. Technique of informative features selection in geoacoustic emission signals. *Informatics and Automation (SPIRAS Proceedings)*, 18(5): 1066–1092. (In Russ). doi:10.15622/sp.2019.18.5.1066-1092
12. Senkevich Yu.I. **2024**. Processing and preparation of observation data in the interests of highlighting the features of the dynamics of the characteristics of geoacoustic emission. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*, 47(2): 75–94. doi:10.26117/2079-6641-2024-47-2-75-94; EDN: ETBXVH
13. *Catalog of earthquakes in Kamchatka and the Commander Islands*. Kamchatka Branch of FRC GS RAS. URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (accessed 05.02.25).

Об авторах

Сотрудники Института космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук, Паратунка Камчатского края, Россия:

Сенкевич Юрий Игоревич (<https://orcid.org/0000-0003-0875-6112>), доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории акустических исследований, senkevich@ikir.ru

Мищенко Михаил Александрович (<https://orcid.org/0000-0003-1958-5830>), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории акустических исследований, micle@ikir.ru

About the Authors

Employees of the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Paratunka, Kamchatka Krai, Russia:

Senkevich, Yury I. (<https://orcid.org/0000-0003-0875-6112>), Doctor in Engineering, Leading Researcher, Laboratory of acoustic research, senkevich@ikir.ru

Mishchenko, Mikhail A. (<https://orcid.org/0000-0003-1958-5830>), Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Laboratory of acoustic research, micle@ikir.ru

Поступила 01.09.2025

Принята к публикации 27.10.2025

Received 1 September 2025

Accepted 27 October 2025

© Авторы, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 004.89:550.34.06:550.348.425

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.420-438>
<https://www.elibrary.ru/alymzd>

Разделение взрывов и землетрясений по информативным характеристикам сейсмического сигнала на основе методов машинного обучения

С. А. Имашев^{@1}, Р. Р. Нигматуллин²

@E-mail: sanzhar.imashev@gmail.com

¹ Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия

² Казанский научно-исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия

Резюме. В статье представлен метод автоматической классификации сейсмических событий, направленный на поиск различий между землетрясениями и техногенными взрывами на основе алгоритма случайного леса. Модель использует только характеристики, извлекаемые из сигнала, записанного одной сейсмической станцией, без привлечения данных о местоположении или глубине источника. Вектор классифицирующих признаков формировался из амплитудных соотношений, а также временных, спектральных и фрактальных параметров сейсмограммы. Для обучения и тестирования был использован сбалансированный набор, включающий более 24 000 сейсмических записей из базы Pacific Northwest Curated Seismic Dataset. Точность обученной модели составила около 94 % на тестовой выборке. Анализ важности признаков показал, что наибольший вклад в распознавание внесли временные, фрактальные и спектральные параметры, что согласуется с особенностями формирования сигналов природного и техногенного происхождения. Полученные результаты показывают, что предложенный метод обеспечивает достоверное и надежное качество классификации и может применяться для автоматической фильтрации техногенных событий при сейсмическом мониторинге.

Ключевые слова: автоматическая классификация, землетрясения, техногенные взрывы, машинное обучение, случайный лес, сейсмический сигнал, признаки волновой формы

Discrimination between explosions and earthquakes based on informative seismic signal features using machine learning methods

Sanjar A. Imashev^{@1}, Raoul R. Nigmatullin²

@E-mail: sanzhar.imashev@gmail.com

¹ Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, Bishkek, Kyrgyzstan

² Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia

Abstract. This study proposes an automatic classification approach for seismic events, designed to discriminate between earthquakes and anthropogenic explosions by employing the Random Forest algorithm. The model operates exclusively on features extracted from the signal recorded at a single seismic station without considering the source location or depth. The feature vector included amplitude ratios, along with temporal, spectral, and fractal parameters of the seismogram. A balanced dataset comprising more than 24000 seismic records from the Pacific Northwest Curated Seismic Dataset was utilized for training and validation. The trained classifier achieved an accuracy of about 94% on the test dataset. Feature importance analysis indicated that temporal, fractal, and spectral parameters contributed most to the classification, which is consistent with the underlying differences in the generation of natural and anthropogenic signals. The obtained results demonstrate that the proposed method ensures reliable and robust classification performance and can be applied for automatic filtering of anthropogenic events in seismic monitoring.

Keywords: automatic classification, earthquakes, man-made explosions, machine learning, Random Forest, seismic signal, waveform features

Для цитирования: Имашев С.А., Нигматуллин Р.Р. Разделение взрывов и землетрясений по информативным характеристикам сейсмического сигнала на основе методов машинного обучения. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 4, с. 420–438. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.420-438>; <https://www.elibrary.ru/alymzd>

For citation: Imashev S.A., Nigmatullin R.R. Discrimination between explosions and earthquakes based on informative seismic signal features using machine learning methods. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 4, pp. 420–438. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.420-438>; <https://www.elibrary.ru/alymzd>

Финансирование и благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке по теме: «Изучение геофизических полей и процессов как основы прогноза землетрясений на базе мониторинга и моделирования неупругих процессов в сейсмогенерирующих средах» (№ 1021052806454-2-1.5.1).

Авторы признательны сотрудникам сейсмической сети PNSN (Pacific Northwest Seismic Network) за предоставление доступа к базе данных Pacific Northwest Curated Seismic Dataset.

Авторы благодарят уважаемых рецензентов, чьи конструктивные замечания и вопросы помогли прояснить суть статьи для читателя.

Funding and Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the state task of the Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek under the topic: “Study of geophysical fields and processes as a basis for earthquake prediction using monitoring and modeling of inelastic processes in seismogenic media” (No. 1021052806454-2-1.5.1).

The authors express their gratitude to the team of the Pacific Northwest Seismic Network (PNSN) for providing access to the Pacific Northwest Curated Seismic Dataset.

The authors also thank the Reviewers for their constructive comments and questions.

Введение

Проблема разделения (discrimination в международной терминологии) техногенных взрывов и землетрясений является одной из ключевых для сейсмологического мониторинга и обеспечения ядерной безопасности [1–4]. Исторически методы решения этой задачи были оптимизированы под крупномасштабные ядерные испытания, которые были зарегистрированы на телесеизмических дистанциях, тогда как на локальных расстояниях их эффективность обычно снижается [5]. В результате часть техногенных событий может ошибочно попадать в каталоги землетрясений и «загрязнять» их, что, в свою очередь, искажает оценку сейсмической активности в регионе [3]. Как показано в работе [4], даже формально «очищенные» каталоги Турции и Ирана содержат значительное количество событий, которые по совокупности признаков могут быть идентифицированы как техногенные взрывы. Поэтому важным фактором является идентификация таких событий уже на стадии регистрации сигнала, что позволяет отфильтровать взрывы еще до их включения в каталог в качестве землетрясений [3, 6]. Их можно будет выявить, например, за счет внедрения автоматического

разделения на основе анализа регистрируемой волновой формы.

Традиционные методы дискриминации сейсмических событий опираются на физические различия в процессах излучения и распространения волн от разных источников. В качестве признаков широко используются амплитудные соотношения сейсмических фаз, спектральные характеристики сигнала и параметры источника (например, глубина гипоцентра). Классическим примером является отношение амплитуд Р- и S-волн в высокочастотном диапазоне. Показано, что в некоторых регионах (например, на Северном Кавказе и восточной части США) это отношение значительно выше для взрывов, чем для землетрясений [1, 7]. Спектральные характеристики также рекомендовали себя эффективными признаками. В частности, различия в спектрах Р- и S-волн позволили корректно разделить подземные взрывы от естественных сейсмических событий [2]. Это связано с тем, что взрывы, как правило, генерируют относительно более мощные Р-волны при ослабленных S-волнах, тогда как для землетрясений характерно обратное [8, 9]. Кроме того, взрывы, как правило, характеризуются малой глубиной источника, поэтому неглубокий очаг традиционно служит

косвенным индикатором техногенного происхождения события. Тем не менее, применение отдельных критериев может быть недостаточно надежным, поскольку каждый из них имеет собственные ограничения, особенно заметные для слабых (по их регистрируемым амплитудам) событий при их малом количестве [3]. Так, использование глубины эффективно только при надежном ее определении, чего трудно добиться в условиях малого количества приемных сейсмостанций. Амплитудные же соотношения чувствительны к различным эффектам и геологическим условиям среды по пути распространения сейсмического события до приемной станции, что может отражаться в виде значительных вариаций пороговых значений этих признаков [10, 11]. В контексте настоящей работы под термином «классификация» понимается автоматическое разделение сейсмических событий на два класса – землетрясения и промышленные взрывы, что соответствует постановке задачи бинарной классификации в терминах машинного обучения.

В последние два десятилетия для решения задачи классификации взрывов и землетрясений активно привлекаются методы машинного обучения. Эти методы включают в себя как искусственные нейронные сети [8, 12–14], так и алгоритмы классического машинного обучения, например метод опорных векторов, решающие деревья, ансамбли различных моделей, позволяющие учесть комбинацию множества признаков [3, 15]. Так, сверточные нейросети позволяют обучать классификаторы напрямую на исходных волновых формах, минуя этап ручного выбора признаков [16]. В отдельных регионах, где имеется обширная обучающая выборка размеченных событий, такие модели демонстрируют хорошее качество классификации. Так, двухканальная архитектура (одновременно обрабатывающая исходный сигнал и его спектр) достигла ~99 % точности в задаче различения землетрясений и взрывов на карьерах в Северо-Восточной Италии [14].

Однако существенным ограничением нейросетевых подходов является необходимость в больших репрезентативных наборах данных для обучения и связанная с этим проблема переноса моделей на новые регионы. Модель, обученная на событиях одного региона, может

существенно терять в точности при ее применении в другом регионе из-за различий в строении земной коры, уровне случайных шумов и спектральных свойствах источника [14]. Но нужно отметить, что использование более разнообразных данных и методов повышения обобщающей способности позволяет частично смягчить остроту этой важной проблемы [16]. Дополнительная трудность также заключается в «черном ящике» нейросетевых решений, когда сложные модели затрудняют интерпретацию принимаемых решений, особенно в спорных и недостаточно обоснованных случаях, что снижает доверие к ним со стороны экспертов-сейсмологов.

Несмотря на успех современных методов, у существующих решений остаются известные ограничения. Многие подходы опираются на информацию, доступную лишь при наличии плотной сети станций или заранее вычисленных параметров события [11, 14, 17]. Так, исследование в районе вулкана Сент-Хеленс [11] продемонстрировало, что классификация по признаку P/S в диапазоне 10–18 Гц позволяет достичь точности выше 98 % при использовании массива из ≥ 16 станций, однако при снижении количества станций до 4 и менее достоверность модели резко падает. Для условий малой плотности региональных сейсмостанций интерес представляет разработка алгоритмов, основанных исключительно на данных одного сейсмоприемника. Например, в работе [18] предложен метод, использующий непрерывное вейвлет-преобразование и последующую обработку в виде энергограмм и коррелограмм. Такой подход показывает значимость локальных, интерпретируемых признаков, которые можно извлекать из волновой формы без знания координат эпицентра и глубины события, а также других метаданных, которые не всегда оперативно доступны и точны для нового регистрируемого события.

В этой связи актуальным является разработка подхода, не требующего данных с плотной сети сейсмических станций и априорных знаний о событии и при этом обеспечивающего интерпретируемость решения. В этом контексте методы, работающие по данным одиночных станций, представляют собой не замену классических подходов каталогизации, а их дополнение, позволяющее фильтровать

техногенные события уже на стадии регистрации сигналов. Целью нашей работы является разработка интерпретируемой модели разделения землетрясений и взрывов на основе алгоритма случайного леса, использующей только признаки, автоматически извлекаемые из волновой формы, записанной на одиночной станции. Данный подход не опирается на показатели глубины источника или географическое расположение события, вместо этого делается основной упор на информативные характеристики самого сигнала, которые трансформируются в физически осмысленные метрические показатели.

Выбор бинарной классификации обусловлен тем, что он позволяет проверить эффективность предложенных признаков и алгоритма в наиболее общей форме и сопоставить результаты с существующими исследованиями. Вместе с тем предложенный подход потенциально может быть распространен на многоклассовую схему, включающую подтипы событий (например, карьерные и строительные взрывы, тектонические и обвальные землетрясения). Реализация такого расширения требует дополнительной разметки источников и увеличения объема выборки и рассматривается авторами как направление дальнейших исследований.

Данные

В качестве источника данных использована база данных PNW-ML (Pacific Northwest Curated Seismic Dataset) [19], подготовленная на основе наблюдений сети PNSN (Pacific Northwest Seismic Network). Эта сеть охватывает территорию штатов Вашингтон и Орегон, в зоне субдукции с высоким уровнем сейсмической активности. Наличие развитой сети сейсмометров (более 600 станций) и разнообразие сейсмических источников в этом регионе позволяют изучать сигналы как естественного, так и техногенного происхождения.

База данных охватывает период 2002–2022 гг. и включает более 65 000 событий, подавляющее большинство которых являются тектоническими землетрясениями. Важной особенностью набора данных является наличие нескольких тысяч записей техногенных взрывов, а именно антропогенных событий, таких как

карьерные, строительные и инженерные взрывы, зарегистрированные сетью PNSN и размеченные в каталоге PNW-ML как explosions. Природные импульсные явления (ледовые и каменные обвалы, лавины, грозы), представленные в базе как exotic events, а также природные фреатические взрывы в настоящей работе не рассматривались. Каждая запись в базе данных соответствует одной трехкомпонентной сейсмограмме события, зарегистрированного на отдельной станции сети PNSN, и содержит свои метаданные (параметры сейсмического события и станции, например время возникновения, координаты эпицентра, глубину гипоцентра, магнитуду), а также тип сейсмического события (землетрясение или взрыв). Определение типа в исходном каталоге PNSN осуществлялось на основе экспертной оценки: например, взрывы отличались малой глубиной заложения заряда, характерными резкими вступлениями Р-волн, близостью к известным карьерам и часто подтверждались по независимым каналам (например, телефонным звонком на предприятие) [19]. В настоящем исследовании эти метки «землетрясение» и «взрыв» используются как истинные классы для обучения и тестирования модели. Все волновые формы были приведены к единой частоте дискретизации 100 Гц, что обеспечивает сопоставимость записей при анализе. Также для каждого события подобраны временные окна продолжительностью более 150 с, включающие как предысторию, так и моменты времени вступления Р- и S-волн.

Поскольку количество записей техногенных взрывов существенно меньше числа записей землетрясений, для балансировки классов были отобраны все примеры взрывов, в которых присутствовали ненулевые значения по всем трем компонентам (E, N, Z). Общее количество таких записей техногенных взрывов составило 12 347 трехкомпонентных сейсмограмм. Для сопоставимости и сбалансированности данных случайным образом было выбрано такое же количество землетрясений – 12 347 событий. Балансировка в нашем случае необходима для предотвращения смещения модели в сторону преобладающего класса (землетрясения), она обеспечивает равный вклад обоих типов событий в процесс обучения. Это особенно важно при анализе данных с одиночных

станций, где, при сильном дисбалансе, модель могла бы преимущественно классифицировать все записи как землетрясения. Для построения и тестирования модели эти данные были разделены на обучающую и тестовую выборки в соотношении 70/30 % при сохранении сбалансированности классов (рис. 1). Обучающая выборка содержала 8614 землетрясений и 8671 взрыв, тестовая – 3733 и 3676 событий соответственно.

Таким образом, совокупность из 24 694 примеров представляет собой набор пар станция–событие (station–event), а не уникальные события. Также отметим, что модель обучалась и тестировалась на этих данных по принципу одиночных станций, без использования координат эпицентров или гипоцентров, что позволяет имитировать условия работы классификатора в реальном мониторинге при ограниченном числе станций.

Анализ литературных источников показал, что в исследованиях по классификации взрывов и землетрясений анализировались события в широком диапазоне магнитуд – от слабых до умеренных и сильных. Так, для слабых событий типичные интервалы магнитуд составляли 1.3–4 [7], 1–4 [1], >1.5 [10], ≤4 [4], 1.5–3.3 [6], <3 [20]. Учитывая, что для умеренных и силь-

ных землетрясений физически обоснованные признаки давно доказали свою эффективность, интерес представляет анализ именно слабых событий, магнитуда которых соизмерима или даже ниже сейсмической энергии (эквивалентной магнитуде) техногенных взрывов. Для этой цели из нескольких случайных реализаций отбора землетрясений была выбрана та, где средняя магнитуда составила величину около 1.0, тогда как средняя магнитуда взрывов была равна ~1.5 (рис. 2 а).

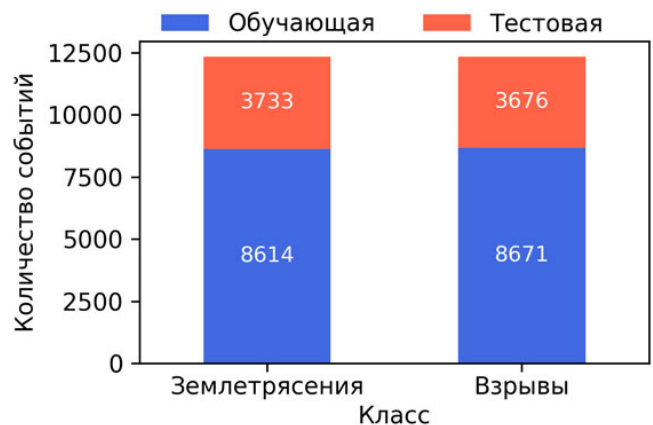


Рис. 1. Распределение событий по обучающей (70 %) и тестовой (30 %) выборкам для двух классов: землетрясения и техногенные взрывы.

Fig. 1. Distribution of events by training (70 %) and test (30 %) datasets for two classes: earthquakes and anthropogenic explosions.

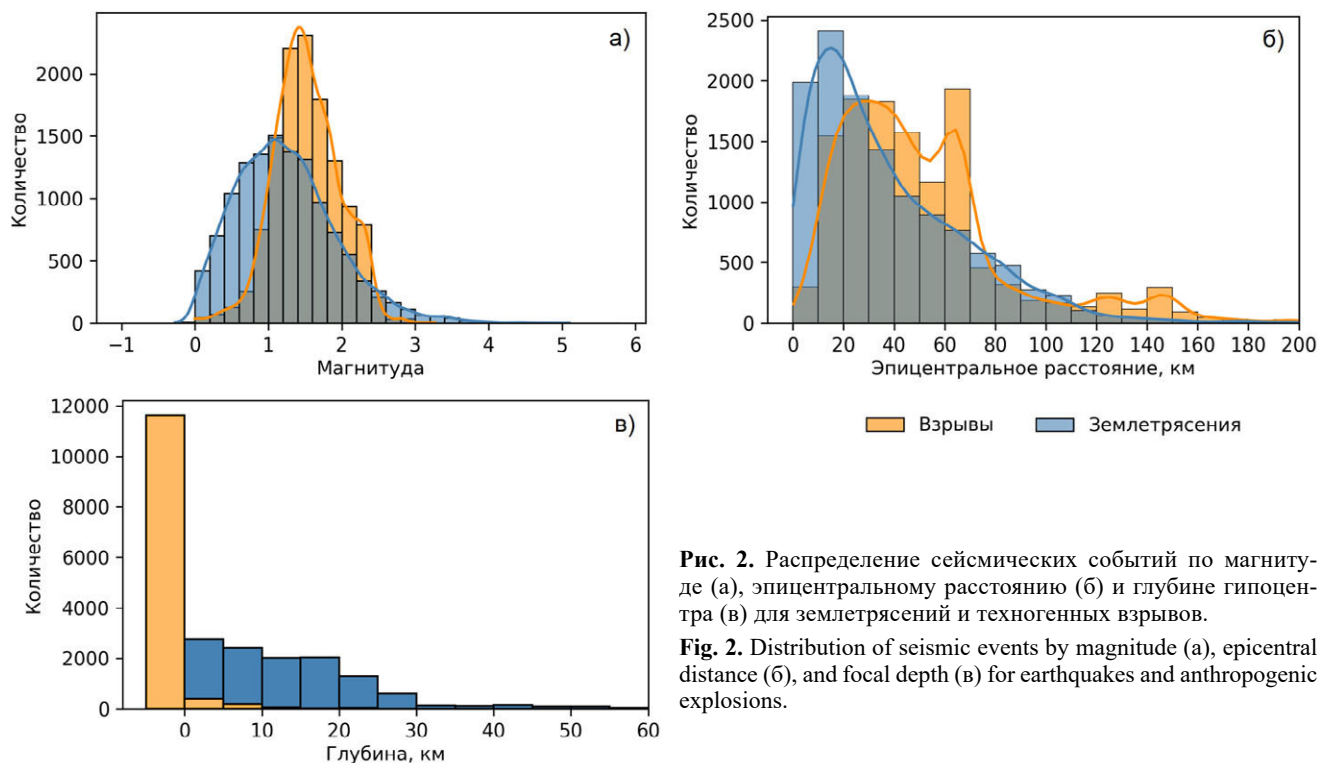


Рис. 2. Распределение сейсмических событий по магнитуде (а), эпицентральному расстоянию (б) и глубине гипоцентра (в) для землетрясений и техногенных взрывов.

Fig. 2. Distribution of seismic events by magnitude (a), epicentral distance (б), and focal depth (в) for earthquakes and anthropogenic explosions.

Для оценки репрезентативности выборки были дополнительно проанализированы распределения событий по эпицентральному расстоянию и глубине гипоцентра (рис. 2 б, в). Видно, что землетрясения преимущественно фиксировались на близких эпицентральных расстояниях (до 20 км), что объясняется геометрией сети и характером локальной сейсмичности, тогда как взрывы чаще наблюдаются на относительно больших расстояниях, что связано с расположением карьеров и условиями их регистрации (рис. 2 б).

На распределении по глубинам (рис. 2 в) отчетливо проявляется различие между двумя типами событий. Практически все техногенные взрывы локализованы вблизи поверхности (глубина меньше 1 км), что соответствует их техногенному происхождению. В то же время землетрясения характеризуются существенно более широким диапазоном глубин, достигающим 50 км, что связано с особенностями тектонической структуры региона.

Такого рода различия в глубинах делают этот признак достаточно информативным для разделения землетрясений и взрывов [4, 21]. Однако в настоящей работе при обучении мо-

дели не использовались признаки, указанные на рис. 2, так как все они представляют собой результаты последующей обработки с привлечением данных с нескольких станций. Как уже отмечалось выше, целью данного исследования является разработка подхода, основанного исключительно на волновых формах, регистрируемых одним сейсмоприемником, что ближе к реальной задаче автоматической классификации событий в условиях ограниченной сети наблюдений. Хотя основное внимание в работе уделено условиям ограниченного мониторинга, предложенный метод может использоваться и в регионах с более плотными сетями для обеспечения независимой автоматической фильтрации техногенных взрывов на стадии первичной обработки данных.

Вместе с тем временные характеристики событий, такие как локальный час возникновения (порядковый час начала события (UTC), приведенный к локальному времени региона) и день недели, могут быть напрямую извлечены из начала записи волновой формы без привлечения данных с соседних станций. Анализ этих распределений (рис. 3) показал ключевые временные различия между техногенными и природными событиями.

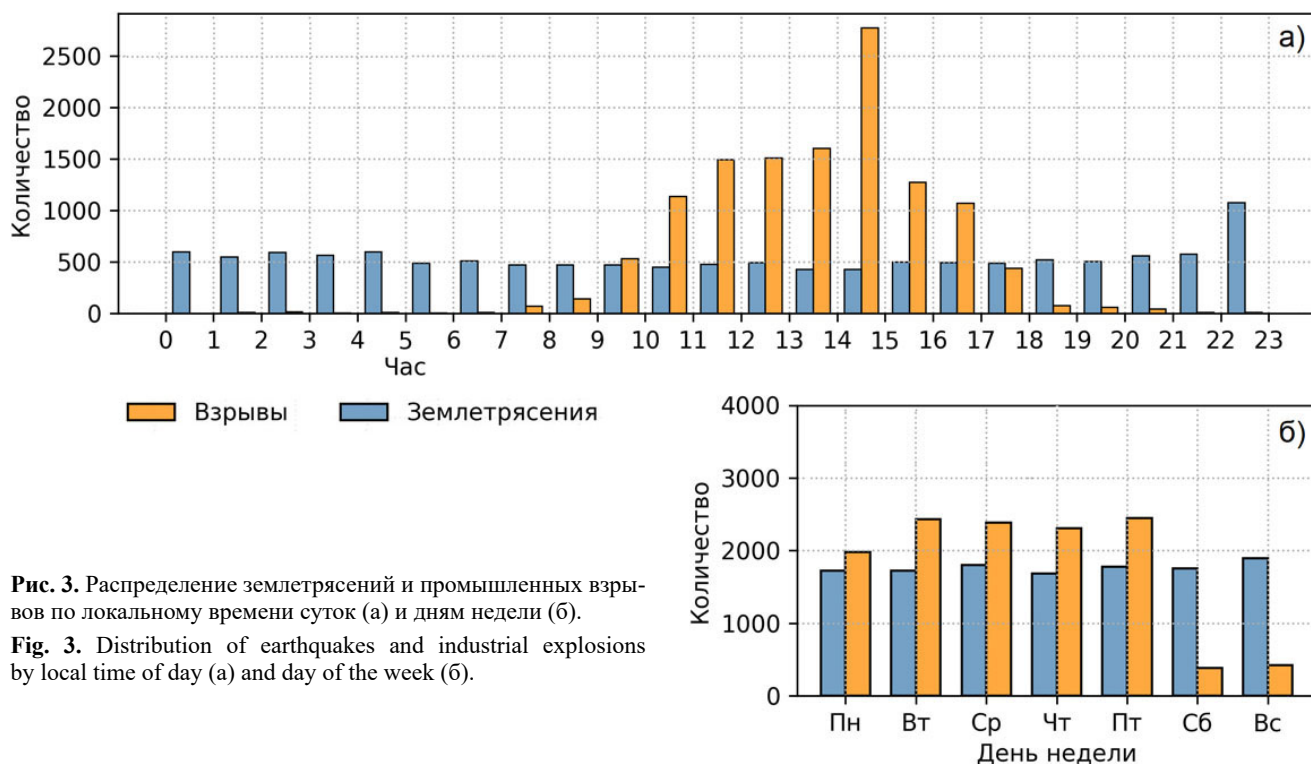


Рис. 3. Распределение землетрясений и промышленных взрывов по локальному времени суток (а) и дням недели (б).

Fig. 3. Distribution of earthquakes and industrial explosions by local time of day (a) and day of the week (b).

Так, взрывы происходят преимущественно в дневное время рабочего дня (с 10:00 до 18:00) и гораздо реже в выходные дни, что связано с графиком работы карьеров и строительных объектов. Землетрясения, напротив, распределены более равномерно как в течение суток, так и по дням недели, что отражает их природный характер.

Эти временные признаки были использованы в классификаторе наряду с характеристиками самих сигналов, в то время как метаданные (глубина, магнитуда, эпицентральное расстояние) применялись лишь для анализа выборки и оценки сложности задачи.

Методика

Для построения классификатора каждому событию из обучающего набора был сопоставлен вектор признаков, отражающий физические и контекстные различия между землетрясениями и взрывами. После анализа литературы и апробации различных метрик из категорий спектральных, статистических и фрактальных характеристик было выбрано семь ключевых признаков. Их расчет и подбор гиперпараметров (размер окна, выбор компонент сейсмограммы и т.п.) осуществлялись в рамках итеративного процесса, направленного на максимизацию качества бинарной классификации событий по двум классам – землетрясения и взрывы.

Классифицирующие признаки

Временные признаки (T и W). К первым двум признакам относятся локальный час возникновения события (T) и день недели (W), которые извлекаются из метки начала волновой формы. Как отмечалось ранее, взрывы в каталоге смещены на дневное время и рабочие дни, тогда как землетрясения происходят равновероятно в любое время суток и недели, поэтому предлагаемая авторами модель может использовать этот признак как вспомогательный для повышения чувствительности к взрывам. В работе [4] показано, что даже в каталогах, которые были формально очищены

от взрывов, сохраняется значительное их количество, и проявляется это именно в суточной и недельной периодичности событий. Так, наблюдался четкий максимум количества событий между 10:00 и 17:00 местного времени, сопровождаемый снижением средней магнитуды, что характерно для техногенных взрывов. Также в каталогах фиксировалось снижение активности в субботу и воскресенье (для Турции) и в пятницу (для Ирана), что соответствует графикам работы промышленных предприятий в этих странах.

Амплитудное отношение $\log(A_p/A_s)$. Следующим ключевым признаком является логарифм отношения амплитуд продольных (P) и поперечных (S) волн, измеренных как спектральные максимумы после прихода соответствующих фаз на станцию. Данный признак и различные его модификации часто используются в задачах классификации взрывов и землетрясений по всему миру [1, 7, 11, 13, 17, 22]. Его эффективность основана на различиях в природе источника. В частности, взрывы, представляя собой изотропное расширение, генерируют более сильную P-волну и относительно слабую S-волну, тогда как в землетрясениях значительное количество энергии сосредоточено в механических сдвигах [8, 9]. Хотя в записях взрывов S-волны могут присутствовать из-за выброса пород, рассеяния или вторичных источников [9, 23], ожидается, что для них $\log(A_p/A_s)$ будет положительным, а для землетрясений отрицательным или близким к нулю.

Следует также отметить, что на близких расстояниях фильтрация высоких частот может снижать эффективность P/S-метода, поэтому этот признак используется в сочетании с другими признаками [5]. Например, в комбинированных подходах глубокого обучения P/S-отношения могут быть объединены с признаками, извлеченными нейросетью, для повышения обобщающей способности моделей при их применении в других регионах [11].

При этом существенное значение имеет выбранный частотный диапазон, в котором рассчитывается отношение энергий различных фаз, так как он отражает региональные особенности среды распространения. Напри-

мер, в восточной части США отношение P/Lg (Lg – региональная волна, аналогичная S -волне в ближней зоне с точки зрения дискриминационной функции), в полосе 1–25 Гц составляло ~ 0.5 для землетрясений и ~ 1.25 для взрывов [7]. Для Северного Кавказа отношение P/Lg в диапазоне 10–20 Гц составляло ~ 3 для взрывов и ~ 1 для землетрясений, обеспечивая точность классификации порядка 93 % [1]. В Архангельской области различия между взрывами и землетрясениями фиксировались по отношению A_p/A_s в диапазоне 8–16 Гц [22]. Следует отметить, что соотношения P/Lg и A_p/A_s применяются для различения техногенных взрывов и землетрясений на разных эпицентральных расстояниях, а именно, P/Lg – для региональных событий, а A_p/A_s – для ближней зоны. Согласно [9], на низких частотах (~ 1 Гц) эффективность метода падает, тогда как на частотах выше 3 Гц она значительно возрастает. Учитывая результаты исследователей из разных регионов и проведенные авторами тестовые расчеты для нескольких частотных полос, для настоящего исследования было выбрано отношение спектральных максимумов A_p/A_s в диапазоне 10–16 Гц, показавшее наилучшее разделение между классами «землетрясения» и «взрывы» на данных PNW-ML. Отношение A_p/A_s рассчитывалось отдельно для каждой из компонент сейсмограммы с последующим усреднением по ним для получения итогового значения признака.

Признак T_{sp} . Для косвенного учета эпицентрального расстояния введен признак T_{sp} , который рассчитывается как разность между временами вступлений P - и S -волн в секундах. Самостоятельно данный признак не обладает высокой дискриминирующей способностью, однако в комбинации с другими признаками уточняет правила классификации.

Медианная частота спектра (M_z). Медианная частота вычислялась по амплитудно-частотному спектру S -волны для вертикального канала сейсмограммы. Исследование [5] показало, что спектры землетрясений содержат больше высокочастотной энергии по сравнению со взрывами и сейсмичностью, вызванной обвалами. Это объясняется большей глубиной очага и более высокими значениями модуля упругости проводящих пород, а также услови-

ями распространения в природной среде, способствующими меньшему затуханию высоких частот. Взрывы же формируются на малых глубинах, что приводит к «обеднению» спектра высокочастотных компонент в распределении энергий и преобладанию длиннопериодических составляющих. Соответственно, ожидается, что для землетрясений будут характерны более высокие значения медианной частоты, чем для взрывов.

Число корней (R_h). Признак R_h определяется как число нулевых пересечений для участка сигнала, соответствующего S -волне, вычисленное по горизонтальным компонентам (усреднение по каналам E и N) в окне размером 4 с. В исследовании [20] число корней (zero crossing rate) оказалось одним из наиболее информативных при классификации ледотрясений и землетрясений. По своей сути, этот признак показывает частотный состав S -волны. В частности, чем больше в этом участке сейсмограммы доминируют высокочастотные компоненты, тем выше значение этого признака и, соответственно, для землетрясений ожидаются более высокие значения R_h по сравнению со взрывами. По своему смыслу данный показатель близок к медианной частоте, однако подтверждение его устойчивости требует проверки на тестовых данных.

Показатель Херста (H_h). Фрактальные свойства сейсмического сигнала оценивались с использованием показателя Херста, рассчитанного методом DFA для горизонтальных компонент S -волны [24, 25]. Этот параметр характеризует меру шероховатости временного ряда. В частности, для гладких сигналов его значение стремится к 1 (фрактальная размерность ($D = 2 - H_h$) при этом будет равна топологической, т.е. 1), а для шумоподобных – ниже [24]. В связи с тем что спектры взрывов обеднены высокочастотными составляющими [5, 20], для них ожидаются более высокие значения показателя Херста, чем для землетрясений.

На рис. 4 представлены гистограммы распределений ключевых признаков, используемых для классификации взрывов и землетрясений. Видно, что для взрывов характерны более высокие значения $\log(A_p/A_s)$, более низкие значения медианной частоты спектра M_z , более

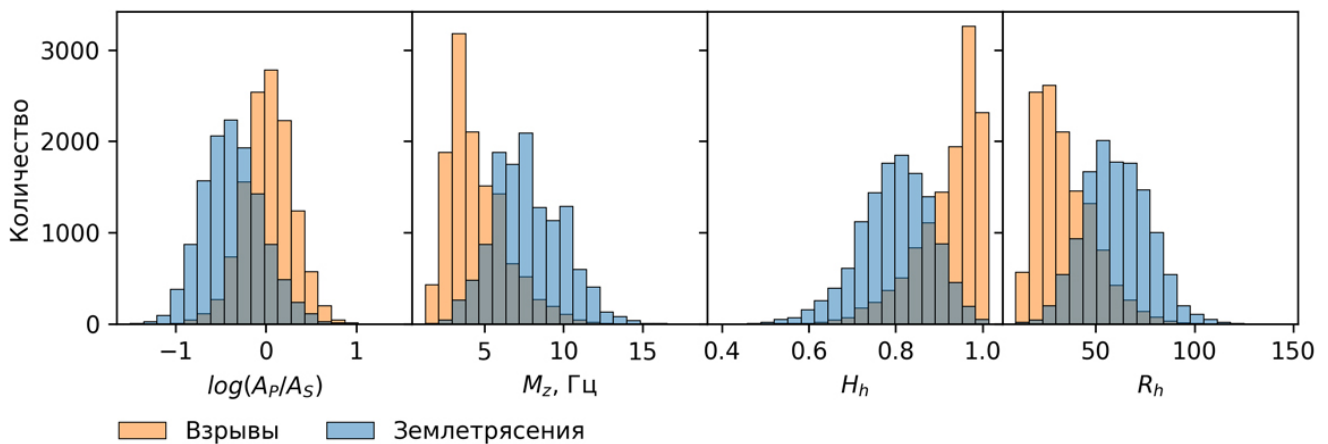


Рис. 4. Распределения значений признаков $\log(A_p/A_s)$, M_z , H_h и R_h для выборок взрывов и землетрясений.

Fig. 4. Distributions of the values of $\log(A_p/A_s)$, M_z , H_h , and R_h for the datasets of explosions and earthquakes.

высокие значения показателя Херста H_h , сосредоточенные вблизи единицы, а также меньшие значения числа корней R_h . В то же время землетрясения демонстрируют отрицательные значения $\log(A_p/A_s)$, более высокие величины медианной частоты, меньшие значения показателя Херста и большее число корней, что отражает более широкий спектральный состав и сложную временную структуру сигнала.

При анализе важности признаков и величин взаимокорреляций было выявлено, что признак R_h хорошо коррелирует с признаками M_z , H_h . Поэтому для уменьшения количества дублирующей информации, а также для повышения классифицирующей способности модели было решено сгенерировать новый признак, который учитывал бы изменение частотного состава S-волны с увеличением эпицентрального расстояния. Для этих целей признак R_h был заменен на отношение R_h/T_{SP} .

Также следует отметить, что, согласно описанию базы PNW-ML [19], фазы P и S размечаются только по одной компоненте на каждую станцию: P-волны преимущественно на вертикальном канале (Z-компоненте), а S-волны – на горизонтальных (E/N). При этом полярность P-фазы (сжатие или растяжение) указывается в метаданных волновой формы только в тех случаях, когда она отчетливо видна. Хотя использование знака первого вступления P-волны по горизонтальным компонентам может дополнительно отражать различия в механизме источника, его автома-

тическое определение на больших выборках с различным качеством записи сопряжено с возможными ошибками на этапе разметки и поэтому не рассматривалось в рамках данного исследования.

Таким образом, итоговый список включает в себя 7 признаков, на основе которых была обучена модель: T , W , $\log(A_p/A_s)$, T_{SP} , M_z , H_h и R_h/T_{SP} .

Модель

Для построения классификатора в настоящей работе использован алгоритм случайного леса (Random Forest). Данный метод относится к ансамблевым, так как объединяет множество деревьев решений, обученных на случайных подвыборках данных и подмножестве признаков [26]. Такое построение позволяет существенно снизить риск переобучения по сравнению с одиночными деревьями и обеспечивает устойчивость результатов при работе с неоднородными и зашумленными данными. Также «случайный лес» не требует строгой нормализации входных признаков, что позволяет авторам при интерпретации результатов классификации использовать исходный масштаб входных данных, а не видоизмененный. Отметим также, что ансамблевые методы имеют возможность оценки информативности признаков, что позволяет провести дополнительный анализ и скорректировать их список, оставив наиболее информативные [6].

В некоторых исследованиях активно использован алгоритм случайного леса или похожие алгоритмы, построенные на деревьях решений, для классификации сейсмических событий. Так, в работе [21] авторы применили широкий спектр линейных и нелинейных методов машинного обучения, среди которых алгоритм Extreme Gradient Boosting (XGBoost) показал наилучшую точность, достигнув 98 % по точности классификации. В работе [6] одна из модификаций алгоритма случайного леса – Extremely Randomized Trees (ERT) была успешно использована для классификации сейсмических событий применительно к природным землетрясениям и карьерным взрывам с упором на выявление наиболее значимых признаков. Дискриминация ледотрясений и тектонических землетрясений в южной части Аляски с помощью алгоритма случайного леса показала точность выше 95 % [20]. В работе [27] использовали этот алгоритм для автоматического различения подземных ядерных взрывов и крупных землетрясений, с предельной точностью классификации в 100 %.

Таким образом, алгоритмы, построенные на деревьях решений, показали эффективность в задачах классификации сейсмических событий, нередко обеспечивая очень высокую точность при правильном и обоснованном подборе признаков. Широкое использование алгоритма объясняется не только интерпретируемостью, но и вычислительной эффективностью и качеством получаемой классификации. В данной работе «случайный лес» был обучен на информативных признаках, описанных выше, что позволило оценить их способность в разделении землетрясений и взрывов.

Модель содержала 400 деревьев, при этом максимальная глубина каждого дерева ограничивалась значением 35. В качестве критерия разбиения узлов использовалось значение минимального числа объектов в подвыборке, равное 2. Также для выбора числа признаков при разбиении применялся логарифмический масштаб, что обеспечивает баланс между разнообразием деревьев и скоростью обучения. Следует упомянуть, что подбор оптимальных гиперпараметров осуществлялся методом перебора по сетке (GridSearch) [28], что позволи-

ло выбрать значения, обеспечивающие оптимальное качество классификации.

Результаты и обсуждение

Важность признаков

Для оценки вклада каждого признака в итоговое решение модели использовалась встроенная в алгоритм случайного леса мера важности признаков (feature importance). Она рассчитывается как усредненное снижение критерия неоднородности (индекса Джини) при каждом разбиении, где данный признак использовался в деревьях ансамбля [26]. Более высокое значение важности указывает на то, что признак чаще применялся для информативных разбиений выборки и вносил больший вклад в точность классификации. Анализ важности признаков (рис. 5), рассчитанных моделью случайного леса, показал, что наибольший вклад в классификацию вносит локальное время возникновения события (T), что согласуется с производственной природой взрывов, сосредоточенных в дневные часы. Вторым по значимости оказался показатель Херста (H_h), отражающий фрактальные свойства сейсмических сигналов, когда для взрывов характерны более низкочастотные («гладкие») временные ряды, тогда как землетрясения демонстрируют

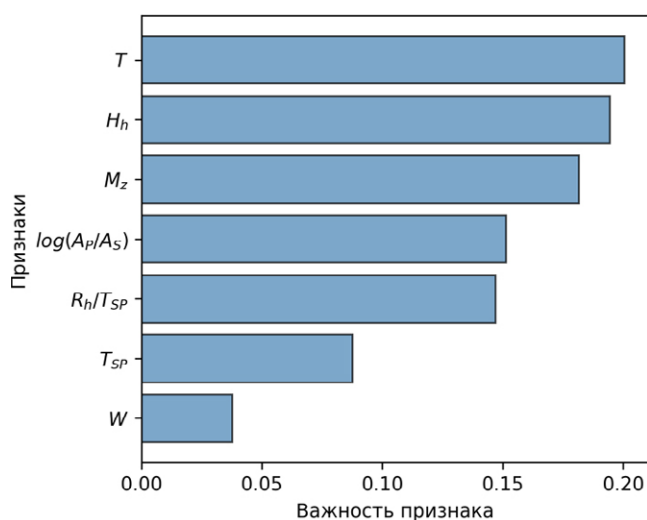


Рис. 5. Важность признаков в модели случайного леса, обученной на выборке взрывов и землетрясений.

Fig. 5. Feature importance values in the Random Forest model trained on the dataset of explosions and earthquakes.

более сложную структуру. На третьем месте по значимости оказалась медианная частота спектра (M_z), которая отражает смещение спектра в сторону высоких частот для землетрясений, как это показано, например, в работе [5]. Классический признак $\log(A_p/A_s)$ и число корней S-волны, рассчитанное по горизонтальным компонентам (R_h), нормированное на разность между временами вступлений P- и S-волн T_{sp} , показали сопоставимую значимость. Как и ожидалось, признак T_{sp} имел меньшую информативность по сравнению с предыдущими, так как зависит в большей степени от эпицентрального расстояния, чем от природы источника. И наконец, наименьший вклад внес признак дня недели (W), что подтверждает его вспомогательную роль, связанную преимущественно с ритмом работы промышленных предприятий.

Анализ корреляций между признаками (рис. 6) показал, что большинство из них обладают низкой взаимной зависимостью, что подтверждает их дополняющий характер. Наиболее сильная отрицательная корреляция наблюдается между медианной частотой спектра (M_z) и показателем Херста (H_h) (-0.8), что отражает тесную связь между частотным составом и фрактальными свойствами сигнала, а именно тем фактом, что более низкие частоты сопровождаются высокими значениями показателя Херста и наоборот. Умеренные

корреляции выявлены также между $\log(A_p/A_s)$ и H_h (0.5), а также между $\log(A_p/A_s)$ и M_z (-0.5). В то же время признаки, связанные с временными характеристиками (T , W , T_{sp}), практически не коррелируют с остальными, что показывает их независимость. Несмотря на их меньшую значимость, они вносят свой вспомогательный вклад для корректной итоговой классификации.

Несмотря на сильную корреляцию между медианной частотой спектра (M_z) и показателем Херста (H_h), оба признака сохранили высокую важность в модели случайного леса. Это объясняется тем, что алгоритм использует разные аспекты их информативности: в частности, величина M_z напрямую отражает положение спектрального центра, тогда как параметр H_h характеризует степень регулярности временной структуры сигнала. Таким образом, даже частично взаимосвязанные признаки могут дополнять друг друга и усиливать классифицирующую способность модели.

Оценка качества классификации

Распределение вероятностей принадлежности событий к классу «взрыв» (рис. 7) демонстрирует бимодальную структуру. Большинство примеров классификатор относит к одному из классов с высокой надежностью (вероятность близка к 0 или 1). Лишь незначительная

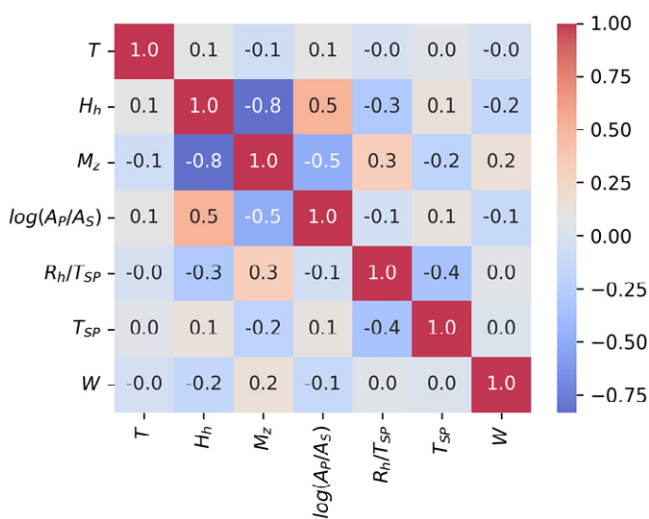


Рис. 6. Матрица корреляций между признаками, используемыми для классификации взрывов и землетрясений.

Fig. 6. Correlation matrix between the features used for classification of explosions and earthquakes.

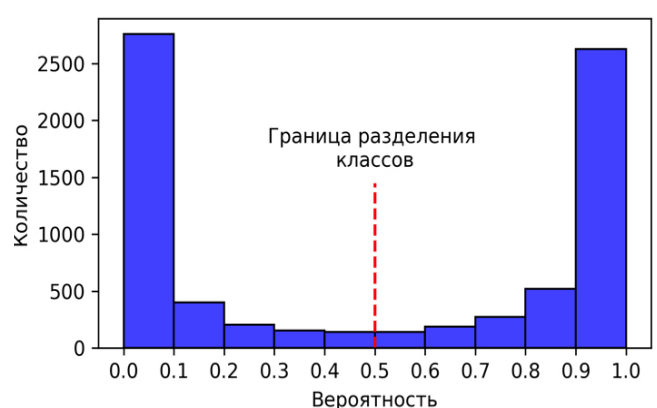


Рис. 7. Распределение вероятностей принадлежности событий к классу «взрыв», рассчитанных по модели случайного леса (0 – землетрясение, 1 – взрыв, ~0.5 – пограничные события в области неопределенности).

Fig. 7. Probability distribution of events belonging to the “explosion” class, as estimated by the Random Forest model (0, earthquake; 1, explosion; ~0.5, borderline events within the uncertainty zone).

доля событий находится в промежуточной зоне вблизи порогового значения 0.5, что указывает на случаи, когда результаты классификации неоднозначны. Распределение такого вида свидетельствует, что модель обладает хорошей разделяющей способностью и четко формирует выраженную границу между взрывами и землетрясениями.

Исходя из границы разделения классов, равной 0.5, была рассчитана матрица ошибок для бинарной классификации (рис. 8). Она показала, что модель случайного леса корректно классифицировала подавляющее большинство событий, а именно 94 % всех примеров были отнесены к своему классу (3489 случаев взрывов (TP-true positive) и 3480 случаев землетрясений (TN-true negative)). При этом ошибки распределены немного асимметрично: в частности, землетрясения несколько чаще ошибочно классифицировались как взрывы (253 случая, FP-false positive), тогда как взрывы реже принимались за землетрясения (187 случаев, FN-false negative). Такой характер ошибок

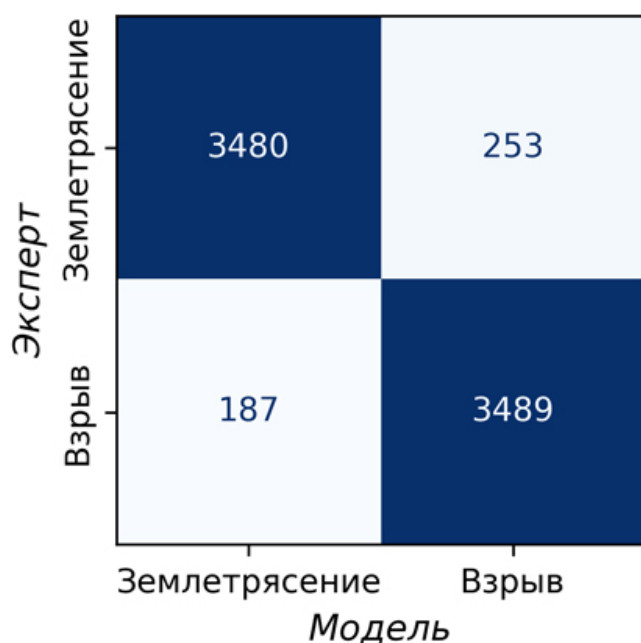


Рис. 8. Матрица ошибок классификации землетрясений и взрывов, полученная с использованием модели случайного леса для границы разделения класса 0.5. Ячейки на главной диагонали отражают количество правильно классифицированных событий, на побочной – ошибки модели.

Fig. 8. Confusion matrix for earthquake and explosion classification obtained using the Random Forest model with a decision threshold of 0.5. Cells along the main diagonal show correctly classified events, whereas the off-diagonal cells correspond to misclassifications.

можно объяснить тем, что часть слабых землетрясений обладает спектральными характеристиками, близкими к техногенным взрывам, что затрудняет их разделение.

Для количественной оценки работы модели использовались стандартные метрики: точность (precision) и полнота (recall). Точность отражает долю правильно классифицированных событий данного класса среди всех событий, которые модель отнесла к этому классу. Иными словами, это вероятность того, что событие, распознанное моделью как «взрыв», действительно является взрывом. Полнота же показывает долю корректно классифицированных событий данного класса среди всех событий этого класса в тестовой выборке, т.е. вероятность того, что реальный взрыв будет правильно идентифицирован. На основе матрицы ошибок значения метрик для класса «взрывы» были следующими: precision – 0.93 и recall – 0.95, а для класса «землетрясения»: precision – 0.95 и recall – 0.93. Таким образом, можно утверждать, что модель демонстрирует сбалансированные показатели качества для обоих классов, а именно, что высокие значения полноты для взрывов указывают на низкую вероятность пропуска событий данного типа, а высокая точность для землетрясений свидетельствует о редком возникновении ложных срабатываний. В качестве сводного показателя была рассчитана F1-мера, представляющая собой гармоническое среднее точности и полноты, ее значения составили около 0.94 для обоих классов.

В базовом варианте граница разделения классов в «случайном лесе» выбирается по умолчанию, т.е. событие относят к «взрывам», если более половины деревьев «проголосовали» за этот класс. Такой подход эквивалентен выбору порогового значения вероятности 0.5, который и был выбран по умолчанию. Для более строгой оптимизации метрик качества был построен график Precision-Recall (PR-кривая), на основе которого рассчитывался оптимальный порог классификации, максимизирующий F1-меру [28] (рис. 9).

В результате оптимальное значение оказалось равным 0.505, что практически совпадает с выбором по умолчанию и свидетельствует

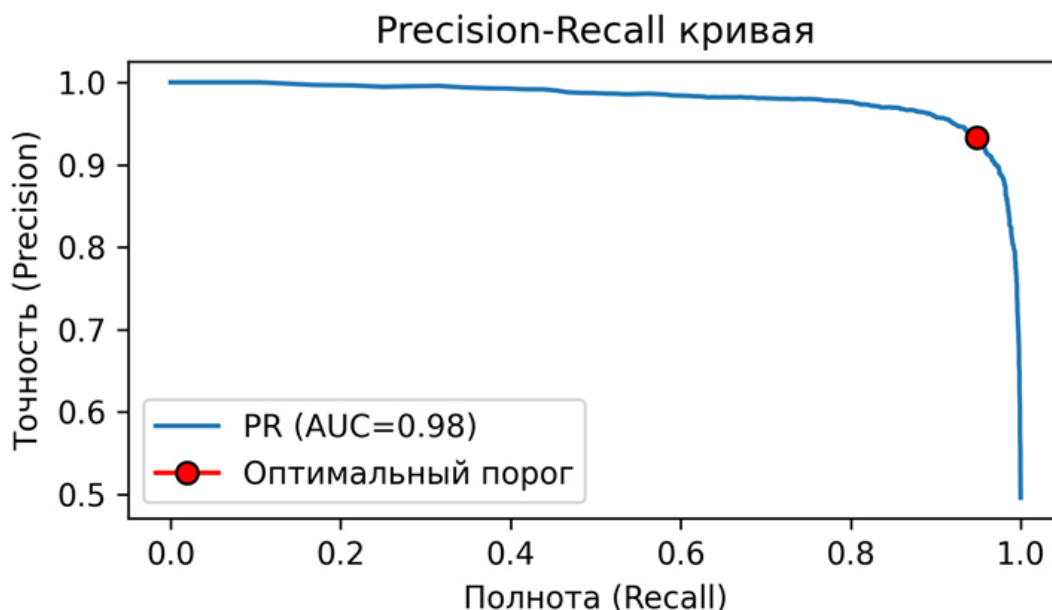


Рис. 9. Precision-Recall кривая для классификации землетрясений и взрывов. Красная точка соответствует оптимальному порогу (0.505), максимизирующему F1-меру.

Fig. 9. Precision-Recall curve for distinguishing between earthquakes and explosions. The red dot denotes the optimal threshold (0.505) that maximizes the F1-score.

о сбалансированной работе классификатора при стандартном разделении. При этом площадь под PR-кривой (AUC – area under the curve) составила 0.98, что подтверждает высокую классифицирующую способность модели и ее устойчивость к ложным срабатываниям.

Анализ ложных классификаций

Несмотря на высокие значения точности и полноты, предложенная модель допускает некоторые ошибки классификации. Анализ матрицы ошибок показал, что землетрясения чаще ошибочно определяются как взрывы, чем наоборот. Это связано с тем, что часть слабых тектонических событий имеет спектральные характеристики, близкие к техногенным взрывам. Особенно это проявляется в случаях, когда отношение $\log(A_p/A_s)$ принимает положительные значения, а медианная частота спектра M_z смещена в область низких значений, что затрудняет их разделение. В обратных ситуациях – когда взрывы классифицируются как землетрясения, причиной ошибок, по нашему мнению, чаще всего является присутствие выраженной S-фазы. Это может быть связано как с особенностями генерации источника (например, взрыв с обрушением пород), так и с эф-

фектами среды распространения, усиливающими долю сдвиговой энергии.

Дополнительный анализ распределений ложных классификаций по глубине, эпицентральному расстоянию и магнитуде (рис. 10) выявил ряд закономерностей. Распределение ложных классификаций по глубине (рис. 10 а) показывает, что сами по себе значения глубины для FN-событий (взрывы, ошибочно классифицированные как землетрясения) не несут дополнительной информации, а именно, как и все остальные взрывы, они приурочены к малым глубинам. Так как при составлении признаков глубина умышленно не использовалась по причинам опоры только на волновые формы, эта особенность сыграла свою роль.

Более существенным, на наш взгляд, является тот факт, что ошибки классификации концентрируются в областях, где наблюдается сильное перекрытие характеристик землетрясений и взрывов. По эпицентральному расстоянию (рис. 10 б) это прежде всего ближняя зона (до 50 км), где спектральные признаки и временные характеристики событий наиболее схожи. По магнитуде (рис. 10 в) наибольшее число ошибок приходится на интервал $M = 1-2$, где распределения двух классов существенно пересекаются. Таким образом, можно

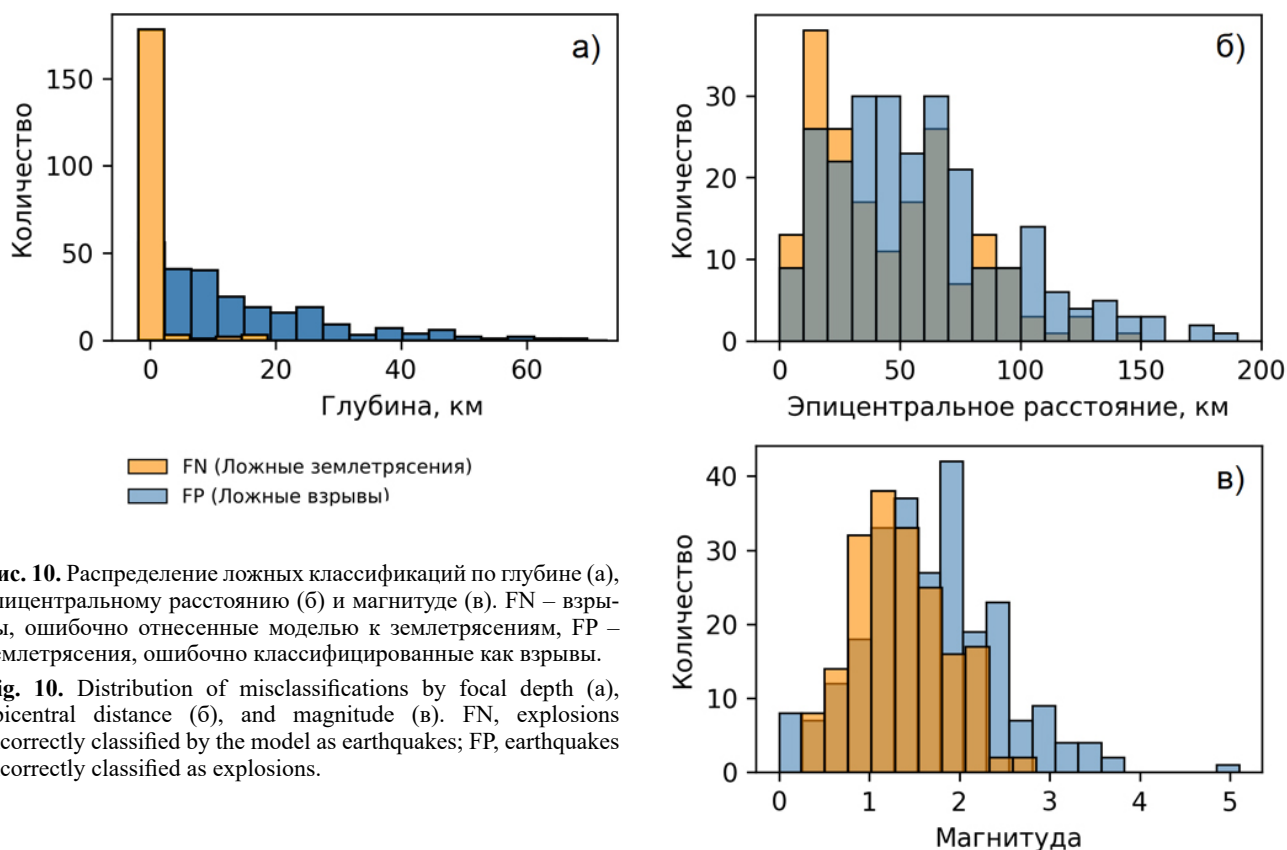


Рис. 10. Распределение ложных классификаций по глубине (а), эпицентральному расстоянию (б) и магнитуде (в). FN – взрывы, ошибочно отнесенные моделью к землетрясениям, FP – землетрясения, ошибочно классифицированные как взрывы.

Fig. 10. Distribution of misclassifications by focal depth (а), epicentral distance (б), and magnitude (в). FN, explosions incorrectly classified by the model as earthquakes; FP, earthquakes incorrectly classified as explosions.

утверждать, что ложные классификации связаны не с аномальными параметрами отдельных событий, а с зонами параметрического перекрытия между классами, что отражает физическую близость их волновых форм в этих условиях.

Для наглядного представления кластеризации землетрясений и взрывов по значениям ключевых признаков можно построить их совместные распределения для правильно (TP, TN) и ошибочно (FP, FN) классифицированных примеров (рис. 11).

На рис. 11 А представлены распределения показателя Херста H_h в зависимости от локального времени события. Видно, что правильно классифицированные события формируют относительно отдельные скопления, тогда как ложные классификации концентрируются в переходных зонах. Ошибки чаще всего возникают в диапазоне $H_h \approx 0.8-0.9$, где распределения землетрясений и взрывов пересекаются, а разделяющая способность признака снижается.

На рис. 11 Б показано совместное распределение медианной частоты спектра M_z и отно-

шения амплитуд $\log(A_p/A_s)$. Правильные классификации (TP, TN) формируют два отчетливых скопления – землетрясения с более высокими значениями M_z и отрицательными $\log(A_p/A_s)$ и взрывы с меньшими значениями M_z и положительными $\log(A_p/A_s)$. Однако ложные классификации (FP, FN) возникают не случайно, а в переходной зоне ($M_z \approx 5-8$ Гц и $\log(A_p/A_s) \approx 0$), где физические характеристики сигналов обоих классов становятся схожими.

На рис. 11 В представлено совместное распределение признаков R_h/T_{sp} и $\log(A_p/A_s)$. Для правильно классифицированных событий (TP, TN) видно характерное разделение: землетрясения группируются в области больших значений R_h/T_{sp} и отрицательных $\log(A_p/A_s)$, тогда как взрывы тяготеют к малым значениям R_h/T_{sp} и положительным $\log(A_p/A_s)$. Аналогично предыдущему случаю, ошибки классификации (FP, FN) концентрируются в узкой промежуточной зоне, где значения обоих признаков перекрываются.

Совокупность рассмотренных распределений показывает, что ошибки модели не являются случайными, а закономерно концентрируются

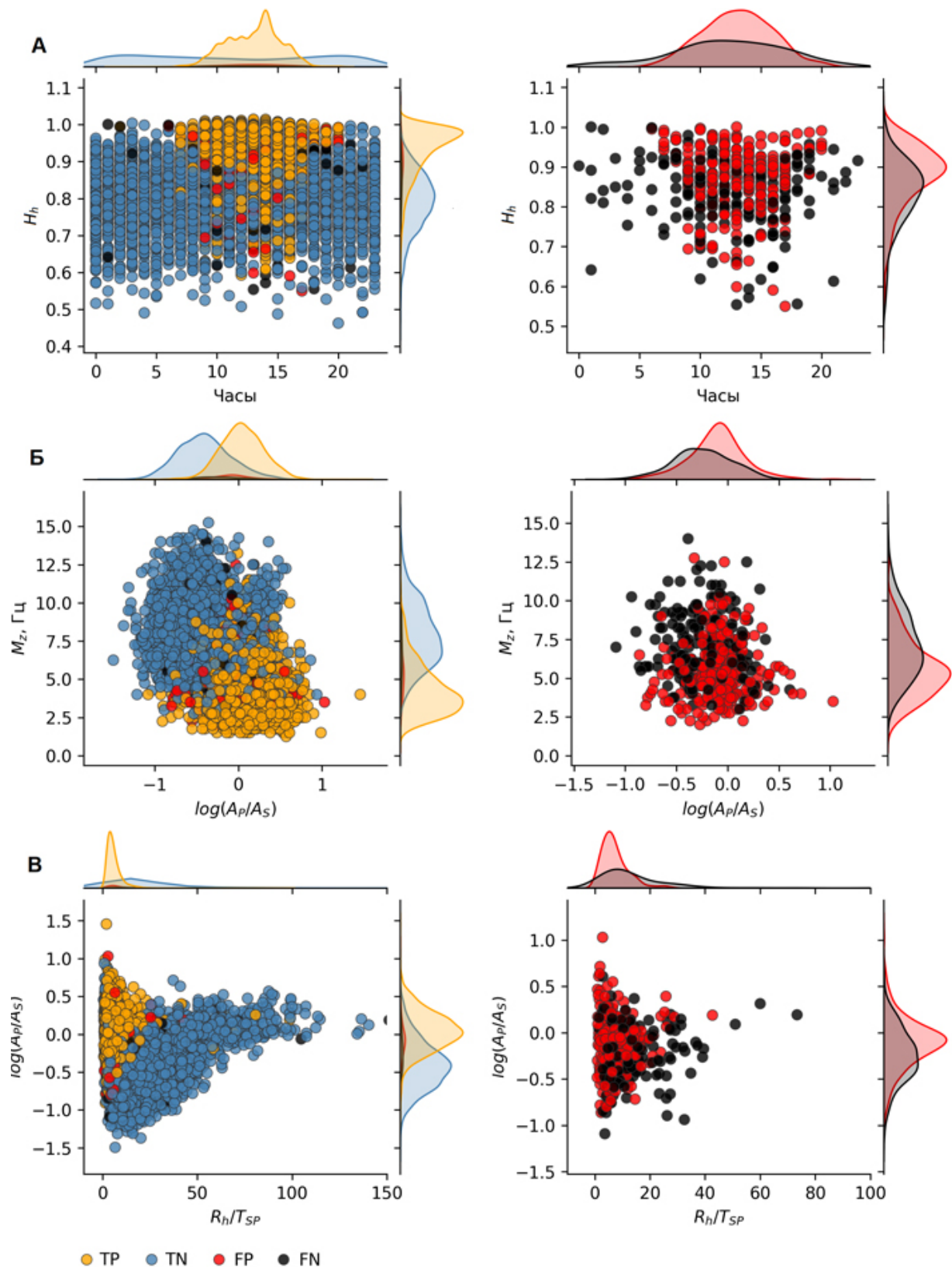


Рис. 11. Распределение признака H_h в зависимости от локального времени события (А); медианной частоты спектра M_z и отношения амплитуд $\log(A_p/A_s)$ (Б); числа корней, нормированного на разность времен прихода фаз R_h/T_{SP} и отношения амплитуд $\log(A_p/A_s)$ (В). Слева показаны все подгруппы (TP, TN, FP, FN), справа – ложные классификации (FP, FN).

Fig. 11. Distribution of H_h versus local time of the event (А); median spectral frequency M_z versus amplitude ratio $\log(A_p/A_s)$ (Б); number of zero crossings normalized by the S-P arrival time difference R_h/T_{SP} versus $\log(A_p/A_s)$ (В). Left panels show all subgroups (TP, TN, FP, and FN), whereas right panels highlight only the misclassified cases (FP and FN).

в переходных зонах параметрического пространства, где признаки землетрясений и взрывов перекрываются. Это справедливо как для спектральных и фрактальных характеристик (M_z , H_h), так и для классических дискриминантов $\log(A_p/A_s)$ и R_h/T_{sp} . Это подтверждает, что ложные классификации обусловлены не «шумовыми» факторами или недостатком обучающей выборки, а фундаментальной близостью волновых форм в условиях слабой энергии, малых эпицентральных расстояний и частичного совпадения спектральных характеристик. Таким образом, указанные ошибки модели отражают физические ограничения в разделении классов и подчеркивают, что для повышения качества классификации необходимо сочетать классические признаки с дополнительными источниками информации – либо геофизическими параметрами (например, локальными условиями регистрации), либо комплексными признаками, извлекаемыми методами глубокого обучения, как, например, в работе [13].

Заключение

В данной работе рассмотрена задача автоматической классификации сейсмических событий по записям на одиночных станциях, направленная на разделение землетрясений и техногенных взрывов. Для решения задачи был сформирован набор из семи информативных признаков, включающих как классические дискриминанты ($\log(A_p/A_s)$, T_{sp}), так и спектральные и фрактальные характеристики сигналов (M_z , R_h , показатель Херста). Обучение классификатора на основе алгоритма случайного леса показало высокое качество классификации: общая точность составила примерно 94 %, при этом значение F1-меры для обоих классов равно 0.94.

Анализ значимости признаков подтвердил роль как физических характеристик источника, так и контекстных параметров (дня недели и локального времени события), что согласуется с производственным характером взрывов. Анализ распределений ложных классификаций показал, что ошибки сосредоточены в зонах перекрытия значений признаков и не являются

случайными, что отражает фундаментальную близость спектральных характеристик слабых землетрясений и взрывов и указывает на физические ограничения делимости этих классов. Использование физически обоснованных признаков совместно с алгоритмом случайного леса, реализующим подход, обеспечивающий баланс между точностью и интерпретируемостью, позволило разработать модель для корректной классификации сейсмических событий с приемлемой точностью без привлечения внешней информации о них.

Полученные результаты дают основание полагать, что предложенный подход может быть эффективно использован для автоматической фильтрации техногенных взрывов и для оперативной классификации событий в режиме реального времени. В дальнейшем планируется расширение набора данных за счет привлечения других регионов, а также интеграция предложенных признаков с методами глубокого обучения для повышения устойчивости и обобщающей способности классификатора.

Список литературы

1. Kim W.Y., Aharonian V., Lerner-Lam A.L., Richards P.G. **1997**. Discrimination of earthquakes and explosions in southern Russia using regional high-frequency three-component data from the IRIS/JSP Caucasus network. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(3): 569–588. <https://doi.org/10.1785/bssa0870030569>
2. Hong T.-K. **2013**. Seismic discrimination of the 2009 North Korean nuclear explosion based on regional source spectra. *Journal of Seismology*, 17(2): 753–769. <https://doi.org/10.1007/s10950-012-9352-1>
3. Kortström J., Uski M., Tiira T. **2016**. Automatic classification of seismic events within a regional seismograph network. *Computers & Geosciences*, 87: 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.11.006>
4. Журавлев В.И., Лукк А.А., Сидорин А.Я. **2021**. О проблемах выявления взрывов в каталогах землетрясений на примере Турции и Ирана. *Сейсмические приборы*, 57(1): 69–82. <https://doi.org/10.21455/si2021.1-5>
5. Koper K.D., Burlacu R., Armstrong A.D., Herrmann R.B. **2024**. Classifying small earthquakes, explosions and collapses in the western United States using physics-based features and machine learning. *Geophysical Journal International*, 239(2): 1257–1270. <https://doi.org/10.1093/gji/ggae316>

6. Habbak E.L., Abdalzaher M.S., Othman A.S., Mansour H. **2024**. Enhancing the classification of seismic events with supervised machine learning and feature importance. *Scientific Reports*, 14(1): 30638. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81113-7>
7. Kim W., Simpson D.W., Richards P.G. **1993**. Discrimination of earthquakes and explosions in the eastern United States using regional high-frequency data. *Geophysical Research Letters*, 20(14): 1507–1510. <https://doi.org/10.1029/93GL01267>
8. Del Pezzo E. **2003**. Discrimination of earthquakes and underwater explosions using neural networks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(1): 215–223. <https://doi.org/10.1785/0120020005>
9. Walter W.R., Matzel E., Pasyanos M.E., Harris D.B., Gok R., Ford S.R. **2007**. Empirical observations of earthquake-explosion discrimination using P/S ratios and implications for the sources of explosion S-waves. In: *Proceedings of the 29th Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*, p. 684–693.
10. Orlic N., Loncaric S. **2010**. Earthquake-explosion discrimination using genetic algorithm-based boosting approach. *Computers & Geosciences*, 36(2): 179–185. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2009.05.006>
11. Wang R., Schmandt B., Kiser E. **2020**. Seismic discrimination of controlled explosions and earthquakes near Mount St. Helens using P/S ratios. *JGR Solid Earth*, 125(10). <https://doi.org/10.1029/2020jb020338>
12. Saad O.M., Inoue K., Shalaby A., Sarny L., Sayed M.S. **2018**. Autoencoder based features extraction for automatic classification of earthquakes and explosions. In: *Proceedings of 17th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*. Singapore, p. 445–450. <https://doi.org/10.1109/icis.2018.8466464>
13. Kong Q., Wang R., Walter W.R., Pyle M., Koper K., Schmandt B. **2022**. Combining deep learning with physics based features in explosion-earthquake discrimination. *Geophysical Research Letters*, 49(13). <https://doi.org/10.1029/2022gl098645>
14. Ertuncay D., Lorenzo A.D., Costa G. **2024**. Seismic signal discrimination of earthquakes and quarry blasts in North-East Italy using deep neural networks. *Pure and Applied Geophysics*, 181(4): 1139–1151. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03440-0>
15. Kim S., Lee K., You K. **2020**. Seismic discrimination between earthquakes and explosions using support vector machine. *Sensors*, 20(7): 1879. <https://doi.org/10.3390/s20071879>
16. Hong M., Zhang H., Wu L., Chen J., Dai L., Wang L. **2025**. Using deep convolutional neural networks for earthquake and explosion classification. *IEEE Access*, 13: 56144–56159. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3552127>
17. Hough S.E. **2017**. Discrimination between natural earthquakes and explosions based on the azimuthal distribution of S/P amplitude ratios. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(1): 218–229. <https://doi.org/10.1785/0120160322>
18. Силкин К.Ю. **2022**. Новые эвристики на основе вейвлет-анализа записи одиночного датчика для распознавания землетрясений и взрывов. *Сейсмические приборы*, 58(3): 5–24. <https://doi.org/10.21455/si2022.3-1>
19. Ni Y., Hutko A., Skene F., Denolle M., Malone S., Bodin P., Hartog R., Wright A. **2023**. Curated Pacific Northwest AI-ready Seismic Dataset. *Seismica*, 2(1). <https://doi.org/10.26443/seismica.v2i1.368>
20. Kharita A., Denolle M.A., West M.E. **2024**. Discrimination between icequakes and earthquakes in southern Alaska: an exploration of waveform features using Random Forest algorithm. *Geophysical Journal International*, 237(2): 1189–1207. <https://doi.org/10.1093/gji/ggae106>
21. Abdalzaher M.S., Moustafa S.S.R., Abd-Elnaby M., Elwekeil M. **2021**. Comparative performance assessments of machine-learning methods for artificial seismic sources discrimination. *IEEE Access*, 9: 65524–65535. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3076119>
22. Морозов А.Н. **2008**. Метод идентификации взрывной сейсмичности на территории Архангельской области. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(11): 177–184.
23. Fisk M.D. **2006**. Source spectral modeling of regional P/S discriminants at Nuclear Test Sites in China and the Former Soviet Union. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(6): 2348–2367. <https://doi.org/10.1785/0120060023>
24. Сычев В.Н., Имашев С.А. **2017**. Оценка параметра Херста сейсмического сигнала. *Геосистемы переходных зон*, 1(2): 50–61. <http://dx.doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.2.050-061>
25. Imashev S., Cheshev M., Mishchenko M. **2019**. Fractal analysis of seismoacoustic signals of near-surface sedimentary rocks in Kamchatka. *Geofizika*, 36(2): 153–169. <https://doi.org/10.15233/gfz.2019.36.15>
26. Breiman L. **2001**. Random Forests. *Machine Learning*, 45(1): 5–32. <https://doi.org/10.1023/a:1010933404324>
27. Elkhoully S.H., Ali G. **2024**. Seismic discrimination between nuclear explosions and natural earthquakes using multi-machine learning techniques. *Pure and Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03463-7>
28. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Louppe G., Prettenhofer P., Weiss R. **2011**. Scikit-learn: machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12: 2825–2830.

References

- Kim W.Y., Aharonian V., Lerner-Lam A.L., Richards P.G. **1997**. Discrimination of earthquakes and explosions in southern Russia using regional high-frequency three-component data from the IRIS/JSP Caucasus network. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(3): 569–588. <https://doi.org/10.1785/bssa0870030569>
- Hong T.-K. **2013**. Seismic discrimination of the 2009 North Korean nuclear explosion based on regional source spectra. *Journal of Seismology*, 17(2): 753–769. <https://doi.org/10.1007/s10950-012-9352-1>
- Kortström J., Uski M., Tiira T. **2016**. Automatic classification of seismic events within a regional seismograph network. *Computers & Geosciences*, 87: 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.11.006>
- Zhuravlev V.I., Lukk A.A., Sidorin A.Ya. **2022**. On problems of detecting blasts in earthquake catalogs: Case study of Turkey and Iran. *Seismic Instruments*, 58: 45–54. <https://doi.org/10.3103/s074792392201011x>
- Koper K.D., Burlacu R., Armstrong A.D., Herrmann R.B. **2024**. Classifying small earthquakes, explosions and collapses in the western United States using physics-based features and machine learning. *Geophysical Journal International*, 239(2): 1257–1270. <https://doi.org/10.1093/gji/ggae316>
- Habbak E.L., Abdalzaher M.S., Othman A.S., Mansour H. **2024**. Enhancing the classification of seismic events with supervised machine learning and feature importance. *Scientific Reports*, 14(1): 30638. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81113-7>
- Kim W., Simpson D.W., Richards P.G. **1993**. Discrimination of earthquakes and explosions in the eastern United States using regional high-frequency data. *Geophysical Research Letters*, 20(14): 1507–1510. <https://doi.org/10.1029/93GL01267>
- Del Pezzo E. **2003**. Discrimination of earthquakes and underwater explosions using neural networks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(1): 215–223. <https://doi.org/10.1785/0120020005>
- Walter W.R., Matzel E., Pasyanos M.E., Harris D.B., Gok R., Ford S.R. **2007**. Empirical observations of earthquake-explosion discrimination using P/S ratios and implications for the sources of explosion S-waves. In: *Proceedings of the 29th Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*, p. 684–693.
- Orlic N., Loncaric S. **2010**. Earthquake-explosion discrimination using genetic algorithm-based boosting approach. *Computers & Geosciences*, 36(2): 179–185. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2009.05.006>
- Wang R., Schmandt B., Kiser E. **2020**. Seismic discrimination of controlled explosions and earthquakes near Mount St. Helens using P/S ratios. *JGR Solid Earth*, 125(10). <https://doi.org/10.1029/2020jb020338>
- Saad O.M., Inoue K., Shalaby A., Sarny L., Sayed M.S. **2018**. Autoencoder based features extraction for automatic classification of earthquakes and explosions. In: *Proceedings of 17th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*. Singapore, p. 445–450. <https://doi.org/10.1109/icis.2018.8466464>
- Kong Q., Wang R., Walter W.R., Pyle M., Koper K., Schmandt B. **2022**. Combining deep learning with physics based features in explosion-earthquake discrimination. *Geophysical Research Letters*, 49(13). <https://doi.org/10.1029/2022gl098645>
- Ertuncay D., Lorenzo A.D., Costa G. **2024**. Seismic signal discrimination of earthquakes and quarry blasts in North-East Italy using deep neural networks. *Pure and Applied Geophysics*, 181(4): 1139–1151. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03440-0>
- Kim S., Lee K., You K. **2020**. Seismic discrimination between earthquakes and explosions using support vector machine. *Sensors*, 20(7): 1879. <https://doi.org/10.3390/s20071879>
- Hong M., Zhang H., Wu L., Chen J., Dai L., Wang L. **2025**. Using deep convolutional neural networks for earthquake and explosion classification. *IEEE Access*, 13: 56144–56159. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3552127>
- Houng S.E. **2017**. Discrimination between natural earthquakes and explosions based on the azimuthal distribution of S/P amplitude ratios. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(1): 218–229. <https://doi.org/10.1785/0120160322>
- Silkin K.Yu. **2022**. New heuristics based on wavelet analysis of a single sensor record for earthquake and explosion detection. *Seismic Instruments*, 58: 552–566. <https://doi.org/10.3103/s0747923922050103>
- Ni Y., Hutko A., Skene F., Denolle M., Malone S., Bodin P., Hartog R., Wright A. **2023**. Curated Pacific Northwest AI-ready Seismic Dataset. *Seismica*, 2(1). <https://doi.org/10.26443/seismica.v2i1.368>
- Kharita A., Denolle M.A., West M.E. **2024**. Discrimination between icequakes and earthquakes in southern Alaska: an exploration of waveform features using Random Forest algorithm. *Geophysical Journal International*, 237(2): 1189–1207. <https://doi.org/10.1093/gji/ggae106>
- Abdalzaher M.S., Moustafa S.S.R., Abd-Elnaby M., Elwekeil M. **2021**. Comparative performance assessments of machine-learning methods for artificial seismic sources discrimination. *IEEE Access*, 9: 65524–65535. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3076119>
- Morozov A.N. **2008**. Method of identification of explosive seismicity on territories of the Arkhangelsk region. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*, 1(11): 177–184. (In Russ.).

23. Fisk M.D. **2006**. Source spectral modeling of regional P/S discriminants at Nuclear Test Sites in China and the Former Soviet Union. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(6): 2348–2367. <https://doi.org/10.1785/0120060023>
24. Sychev V.N., Imashev S.A. **2017**. Estimation of Hurst exponent of seismic signal. *Geosistemy perehodykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 1(2): 50–61. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.2.050-061>
25. Imashev S., Cheshev M., Mishchenko M. **2019**. Fractal analysis of seismoacoustic signals of near-surface sedimentary rocks in Kamchatka. *Geofizika*, 36(2): 153–169. <https://doi.org/10.15233/gfz.2019.36.15>
26. Breiman L. **2001**. Random Forests. *Machine Learning*, 45(1): 5–32. <https://doi.org/10.1023/a:1010933404324>
27. Elkhoully S.H., Ali G. **2024**. Seismic discrimination between nuclear explosions and natural earthquakes using multi-machine learning techniques. *Pure and Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03463-7>
28. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Louppe G., Prettenhofer P., Weiss R. **2011**. Scikit-learn: machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12: 2825–2830.

Об авторах

Имашев Санжар Абылбекович (<https://orcid.org/0000-0003-3293-3764>), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия, sanzhar.imashev@gmail.com

Нигматуллин Равиль Рашидович (<https://orcid.org/0000-0003-2931-4428>), доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и информационно-измерительной техники, Казанский научно-исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), Казань, Россия, renigmat@gmail.com

About the Authors

Imashev, Sanjar A. (<https://orcid.org/0000-0003-3293-3764>), Cand. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher, Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, Bishkek city, Kyrgyzstan, sanzhar.imashev@gmail.com

Nigmatullin, Raoul R. (<https://orcid.org/0000-0003-2931-4428>), Doct. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Department of radioelectronics and information and measurement technology, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia, renigmat@gmail.com

Поступила 10.10.2025

Принята к публикации 26.10.2025

Received 10 October 2025

Accepted 26 October 2025

© Авторы, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 622.253.3;624.139

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.439-451>
<https://www.elibrary.ru/nohjvd>

Экспериментальное исследование закономерностей тепломассопереноса во влажном засоленном песке при осевом замораживании

Л. Ю. Левин¹, М. А. Семин¹, А. Н. Вшивков², И. А. Пантелеев², С. А. Бублик¹,
М. В. Угольников^{@2}, Д. В. Ложкин², О. А. Плехов^{2,3}

@E-mail: ugolnikov.m@icmm.ru

¹ Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия

² Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

³ Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь, Россия

Резюме. В работе изучается процесс замораживания песка средней крупности, насыщенного водным раствором NaCl различной концентрации (0–104 г/л). Целью работы является определение влияния концентрации NaCl на процессы тепло-массопереноса. Замораживание осуществлялось с одного торца образца, температурное поле регистрировалось восемью термопарами, распределение влажности – методом взвешивания с последующей сушкой. Показано, что температура начала замерзания поровой влаги с ростом концентрации NaCl линейно снижается до $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Выявлено, что во всех вариантах испытаний имеет место перераспределение влаги с ее накоплением вблизи фронта замораживания. В незасоленных образцах данный эффект наиболее выражен, что объясняется совокупным действием термодиффузии и различия фазовых давлений на границе «вода–лед». При увеличении концентрации соли эффект ослабевает, а различие влажностей между промерзшей и незамерзшей зонами уменьшается. Полученные временно-пространственные зависимости температуры и влажности могут быть использованы для параметризации математических моделей тепло-массопереноса в замораживаемых средах и служат основой для дальнейших исследований процессов замораживания засоленных грунтов.

Ключевые слова: искусственное замораживание грунтов, засоленный песок, NaCl, тепло-массоперенос, фазовый переход, распределение влажности

Experimental study of heat and mass transfer in moist saline sand under axial freezing

Lev Y. Levin¹, Mikhail A. Semin¹, Aleksei N. Vshivkov², Ivan A. Panteleev²,
Sergey A. Bublik¹, Mikhail V. Ugolnikov^{@2}, Denis V. Lozhkin², Oleg A. Plekhov^{2,3}

@E-mail: ugolnikov.m@icmm.ru

¹ Mining Institute of the Ural Branch of RAS, Perm, Russia

² Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of RAS, Perm, Russia

³ Perm Federal Research Center of the Ural Branch of RAS, Perm, Russia

Abstract. The article involves the study of the freezing process of medium-grained sand saturated with aqueous NaCl solutions of various concentrations (0–104 g/l). The purpose of the study is to determine the influence of NaCl concentration on heat and mass transfer processes. Freezing was initiated from one end of the sample; the temperature field was recorded by eight thermocouples, while the moisture distribution was determined by weighing followed by drying. The results confirmed a linear decrease in the freezing point of pore water with increasing NaCl concentration, down to -7°C . It was found that in all tests, moisture redistribution occurred with its accumulation near the freezing front. In non-saline samples this effect was most pronounced, which can be attributed to the combined influence of thermodiff-

fusion and phase pressure differences at the water–ice interface. With increasing salinity, this effect weakened, and the contrast in moisture content between frozen and unfrozen zones decreased. The obtained time-space distributions of temperature and moisture provide a basis for parameterizing mathematical models of heat and mass transfer in frozen media, as well as serve as a starting point for further studies of freezing processes in saline soils.

Keywords: artificial ground freezing, saline sand, NaCl, heat and mass transfer, phase transition, moisture distribution

Для цитирования: Левин Л.Ю., Семин М.А., Вшивков А.Н., Пантелеев И.А., Бублик С.А., Угольников М.В., Ложкин Д.В., Плехов О.А. Экспериментальное исследование закономерностей тепломассопереноса во влажном засоленном песке при осевом замораживании. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 4, с. 439–451. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.439-451>; <https://www.elibrary.ru/nohjvd>

For citation: Levin L.Y., Semin M.A., Vshivkov A.N., Panteleev I.A., Bublik S.A., Ugolnikov M.V., Lozhkin D.V., Plekhov O.A. Experimental study of heat and mass transfer in moist saline sand under axial freezing. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 4, pp. 439–451. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.439-451>; <https://www.elibrary.ru/nohjvd>

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-77-30008).

Funding

This study was carried out with the financial support of Russian Science Foundation (project No. 19-77-30008).

Введение

Замерзающие и уже замороженные грунты широко применяются в инженерной практике как надежное основание для различных сооружений. Вечномерзлые породы служат фундаментом для зданий и магистральных трубопроводов [1]. В регионах с многолетней мерзлотой грунты подвержены сложным комплексным процессам, вызванным изменением температуры, давления и гидрохимических условий. Именно эти взаимосвязанные процессы обуславливают формирование характерных для мерзлых пород явлений: морозного пучения, осадочных деформаций при оттаивании, миграции влаги, фазовых переходов и образования ледяных линз [2–6].

Предметом исследований инженеров и ученых является не только естественное, но и искусственное замораживание пород и грунтов. Способ искусственного замораживания широко применяется при строительстве шахтных стволов и тоннелей метрополитена в обводненных и неустойчивых грунтах и породах [7, 8]. Его цель заключается в формировании вокруг выработки защитного ледопородного ограждения, выполняющего гидроизоляционные и стабилизирующие функции [9, 10].

Принятие обоснованных решений при строительстве сооружений в зоне заморожен-

ных грунтов и пород (как при естественном, так и при искусственном замораживании) требует глубокого понимания комплекса взаимосвязанных физических процессов, протекающих в них. Это необходимо для корректной оценки рисков и осложняющих факторов.

При строительстве стволов в обводненных грунтах и породах возникает ряд осложняющих факторов, среди которых наличие подземных фильтрационных течений [11], нарушенность массива [12], засоленность пород [13, 14]. Так, при проходке стволов на Верхнекамском месторождении калийных солей, в силу геологических особенностей надсолевой толщи, в ее поровой влаге вблизи контакта с водозащитной толщей часто присутствует значительное количество растворенных солей. По данным [14], при проходке ствола № 2 Первого Соликамского калийного рудника был обнаружен незамерзший рассол со сложным составом растворенных солей NaCl, KCl, MgCl₂, CaCl₂ и CaSO₄, с общей минерализацией более 335 г/л и температурой замерзания около –41 °С. На Западно-Перелюбском участке месторождения калийно-магниевых солей (Перелюбский район Саратовской области) также отмечается сложная гидрогеологическая обстановка: минерализация вод в обводненных слоях пород над водоупорной толщей достигает 185 г/л.

Все это указывает на необходимость детального изучения влияния растворенных солей на процесс искусственного замораживания пород при строительстве подземных сооружений. Соответствующих методик в настоящее время не разработано. Отдельные исследования переноса солей и замораживания засоленных грунтов и пород представлены в зарубежных работах [15, 16], а также в предыдущих исследованиях авторов настоящей статьи [17–19]. Вместе с тем вопрос влияния морозного пучения изучен крайне ограниченно. Исключением является работа [19], где на основе лабораторных экспериментов по морозному пучению засоленных грунтов показано, что при увеличении содержания солей в поровом пространстве влажных замораживаемых грунтов и пород интенсивность морозного пучения в целом снижается, за исключением области низких концентраций растворенной соли (до 0.0035 кг на 1 кг сухого минерала). Однако в этой работе рассмотрен относительно узкий диапазон минерализаций.

В настоящем исследовании предпринята попытка распространить ранее полученные выводы на случай более высоких минерализаций (до 104 г/л, что соответствует понижению температуры начала замерзания порового рассола NaCl до -7°C), а также на другой тип грунта – песок, не содержащий глинистых включений.

Эти исследования необходимы для разработки адекватных моделей тепломассопереноса с учетом напряженно-деформированного состояния замораживаемых геосред, что позволит выработать методические указания для искусственного замораживания засоленных пород. Параметризация и валидация таких моделей невозможны без лабораторных и натурных экспериментов.

Представленные в литературе экспериментальные данные показывают, что перераспределение воды и солей при замораживании существенно изменяет поровую структуру и сжимаемость грунта, определяя характер деформаций после циклов замораживания–оттаивания [20, 21]. Вода перемещается к фронту фазового перехода под действием градиента матричного потенциала [22], а соли переносят-

ся как адвективно вместе с водой, так и диффузионно – по градиенту концентрации [23]. В закрытых системах объем переноса влаги зависит от исходной концентрации солей [24, 25].

Растворенные ионы понижают температуру замерзания поровой влаги, поэтому в промерзающей зоне при отрицательных температурах сохраняется значительная доля незамерзшей воды [26]. После циклов замораживания–оттаивания обычно фиксируется рост влажности в промерзшей зоне и ее снижение в оттаивающей, при одновременном увеличении концентрации ионов к фронту замерзания [27–29].

Кроме того, лабораторные и полевые исследования показывают, что деформации зависят не только от общей минерализации, но и от типа солей, начальной влажности, пористости и внешних нагрузок, а фазовая температура замерзания реальных грунтов может отличаться от температуры равновесного раствора и варьировать с концентрацией [30].

Настоящая работа является продолжением исследований [18, 19] и посвящена лабораторному анализу тепломассопереноса в цилиндрических образцах песка средней крупности, насыщенных водными растворами NaCl различной концентрации (0, 26, 52 и 104 г/л). Замораживание осуществлялось с одного торца образца, а температура регистрировалась восемью термодарами, установленными вдоль его оси. По завершении испытаний пространственное распределение влажности определялось методом взвешивания с последующей сушкой. На основе временных зависимостей температуры и профилей влажности построены температурно-временные кривые и кривые распределения влажности по длине образца, что позволило оценить интенсивность миграции влаги.

Методика измерений и аппаратное обеспечение

Для проведения экспериментов на базе Института механики сплошных сред УрО РАН – филиала ПФИЦ УрО РАН собрана лабораторная установка для осевого замораживания

цилиндрических образцов (рис. 1). Установка включает морозный ларь с охлаждаемой рабочей камерой, теплоизолированную коробку для размещения образцов, автономную систему циркуляции и охлаждения хладагента и замораживающую колонку, обеспечивающую контакт одного торца образца с охладителем. Теплоизолированная камера для проведения экспериментов имела размеры $600 \times 600 \times 600$ мм с толщиной стенок 150 мм. Конструкция выполнена из плит экструдированного пенополистирола, образующих жесткий каркас, а свободное пространство между плитами дополнительно заполнено минеральной ватой. Такое сочетание материалов позволило существенно снизить теплопотери и обеспечить стабильность температурного режима внутри эксперименталь-

ной камеры. Автономная система циркуляции хладагента представляет собой замкнутый контур, включающий расширительный бачок, насос и радиатор охлаждения. В качестве хладагента использовался антифриз с температурой кристаллизации -65 °С, что обеспечивает устойчивую работу системы в условиях охлаждения до -40 °С. Такая конструкция позволила поддерживать стабильный тепловой режим замораживающей колонки.

Температурные характеристики установки следующие:

- Температура морозного ларя -40 °С.
- Температура охлаждающей жидкости -38 °С.
- Температура внутри теплоизоляционного короба 0 °С.

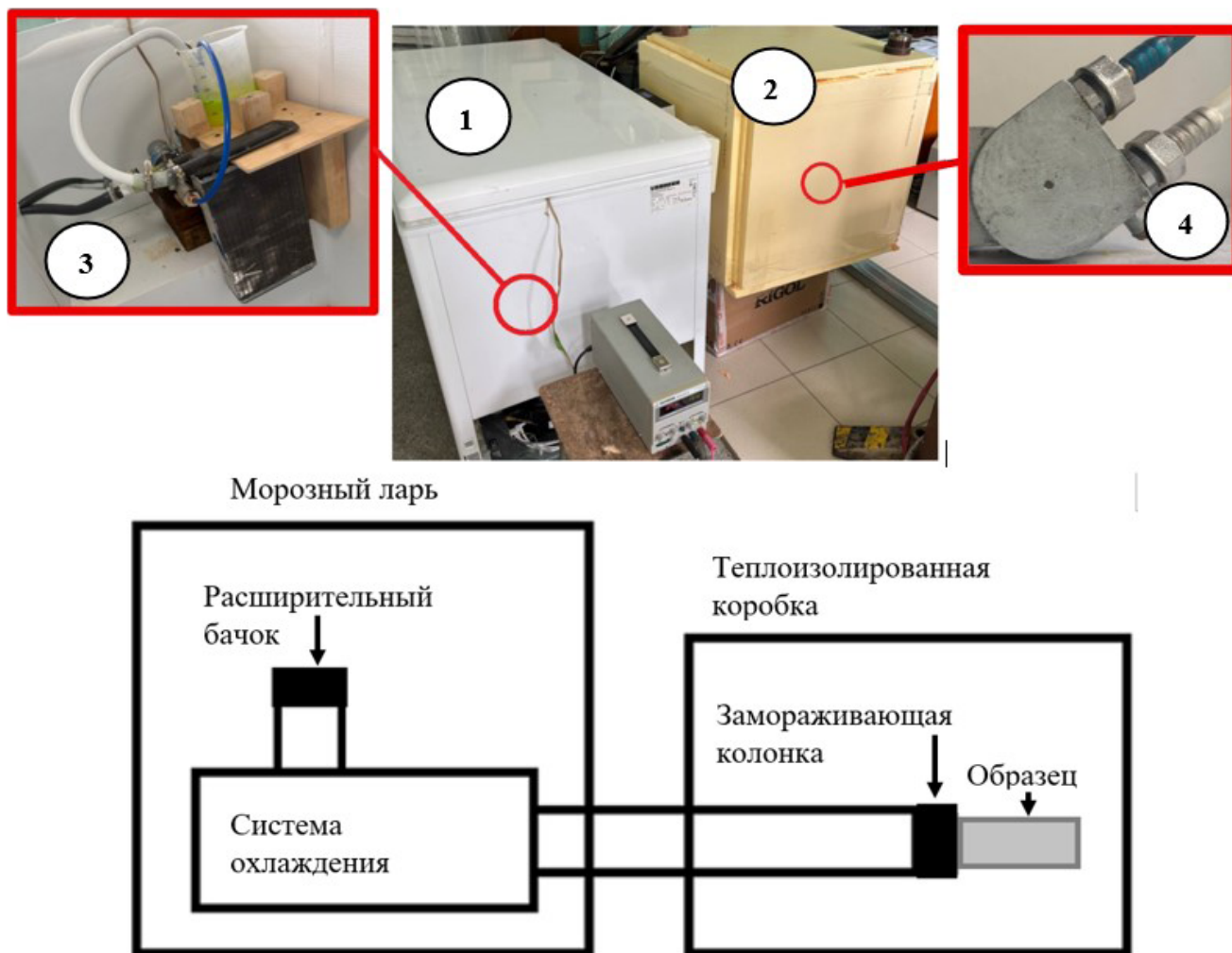


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки: морозный ларь с охлаждаемой рабочей камерой (1), теплоизолированная коробка (2), автономная система циркуляции и охлаждения хладагента (3) и замораживающая колонка (4).

Fig. 1. General view of the experimental setup: freezing chest with a cooled working chamber (1), insulated box (2), autonomous coolant circulation and cooling system (3), and freezing column (4).

- Температура замораживающей колонки -36°C .

Образцы для исследований изготавливались из 80 г песка, в который вводили 56 г раствора хлорида натрия заданной концентрации. В вариантах опытов без засоления в качестве жидкой фазы использовались 56 г дистиллированной воды. Полученная смесь тщательно перемешивалась до достижения гомогенного состояния и затем формовалась в цилиндрические образцы (рис. 2) для последующих экспериментов. Начальная влажность образцов была рассчитана по формуле (1) и составила для всех образцов 70 %.

$$\omega = m_{\text{в}} / m_{\text{п}} \times 100 \%, \quad (1)$$

где ω – начальная влажность; $m_{\text{в}}$ – масса соляного раствора или дистиллированной воды, кг; $m_{\text{п}}$ – масса твердых минеральных частиц песка, кг.

Полученное значение начальной влажности является достаточно высоким и может быть достигнуто в условиях рыхлой структуры песка с угловатыми или сильно несферическими зернами. Такая постановка эксперимента отражает наихудший сценарий (оценку сверху) по степени обводненности песчаных грунтов. При этом важно отметить, что в среднем влагонасыщенные пески имеют массовую влажность в 1.5–2.5 раза ниже.

Распределение температуры контролировали с помощью восьми хромель-константановых термопар, равномерно размещенных вдоль оси каждого цилиндрического образца. Регистрация показаний термопар осуществлялась системой National Instruments в автоматическом режиме с частотой записи 1 Гц. Схема расположения термопар и пример монтажа датчиков представлены на рис. 3. Заморозка осуществлялась со стороны термопары 1.

После завершения замораживания каждый образец разрезали на восемь равных по длине сегментов (рис. 4). Сегменты подвергались сушке в сушильном

шкафу Carbolite Gero GP220 (рис. 5 а) при температуре 70°C в течение 48 ч. Массу каждого сегмента определяли до и после сушки. Далее влажность отдельных сегментов оценивалась по формуле (2) как гравиметрическая влажность по влажной массе. Полученные результаты представлены в табл. 1. На основе этих данных оценивалось распределение влажности вдоль оси образца.



Рис. 2. Образец из смеси песка и солевого раствора после перемешивания до однородного состояния (вид сверху).

Fig. 2. Sample prepared from a mixture of sand and saline solution after mixing to a homogeneous state (top view).

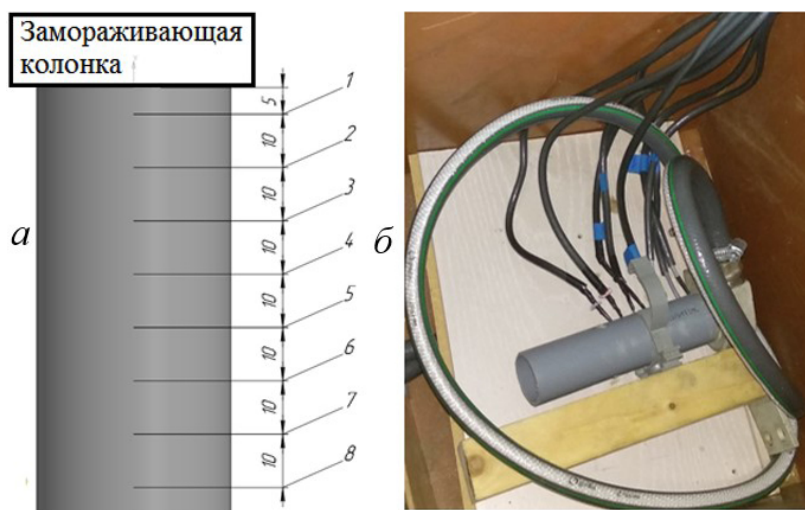


Рис. 3. Установка термопар 1–8 вдоль оси образца: (а) схема, (б) образец.

Fig. 3. Installation of thermocouples (1–8) along the longitudinal axis of the sample: (a) schematic representation; (b) experimental model.

$$\omega_{\text{сег}} = (m_{\text{в-сег}} - m_{\text{с-сег}}) / m_{\text{с-сег}} \times 100 \%, \quad (2)$$

где $\omega_{\text{сег}}$ – гравиметрическая влажность по влажной массе сегмента; $m_{\text{в-сег}}$ – масса влажного сегмента; $m_{\text{с-сег}}$ – масса сегмента после сушки.

Взвешивание проводилось на аналитических весах ЗИЛ (рис. 5 б) с разрешающей способностью до $0.5 \cdot 10^{-4}$ г, что обеспечивало высокую воспроизводимость и чувствительность при определении малых изменений влажности. Для контроля качества измерений исполь-

зовались калибровочные гири и проводилась регулярная проверка нулевой точки весов.

Для приготовления образцов использовался песок с характерным средним размером



Рис. 4. Разрезанный по сегментам образец для последующих измерений влажности.

Fig. 4. Sample divided into segments for further determination of moisture distribution.

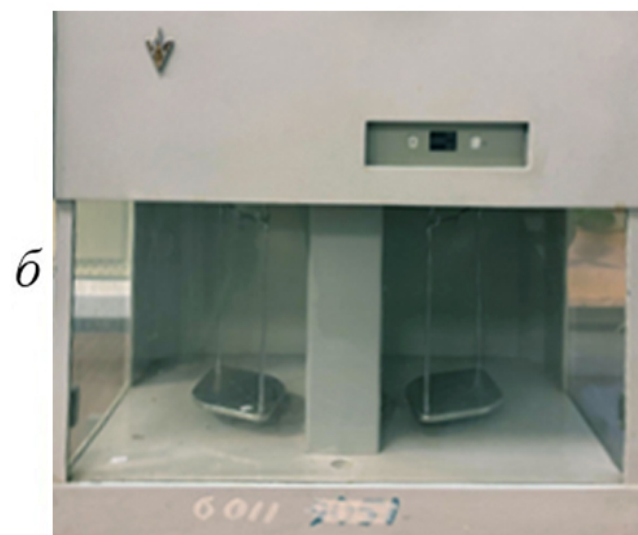


Рис. 5. Оборудование для взвешивания и сушки образцов: (а) сушильный шкаф Carbolite Gero GP220, (б) аналитические весы ЗИЛ.

Fig. 5. Equipment for weighing and drying of samples: (a) Carbolite Gero GP220 drying oven; (b) ZIL analytical balance.

Таблица 1. Экспериментальные данные массы образцов до и после сушки

Table 1. Experimental data of sample mass before and after drying

№	Засоленость, г/л	Сегмент							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	13.0975	15.3183	13.1904	14.5017	14.4617	13.3360	13.2546	14.9169
		7.1277	8.4925	7.3139	8.0352	8.0489	7.4127	7.4757	8.4468
2	26	13.5383	14.0971	14.3135	13.8230	13.7926	13.5841	13.5427	18.1801
		7.62175	11,9793	5,44825	7,14215	9,2585	6,26595	6,29785	7,56065
3	52	16.0463	13.6564	14.3291	14.1358	16.0432	13.9988	11.9430	17.2075
		9.03355	7.8123	8.2203	8.0982	9.1921	8.0266	6.9177	10.0931
4	104	14.0383	13.3512	16.7286	11.1398	15.7784	12.5270	14.6520	17.4429
		8.0997	7.7704	9.7536	6.5350	9.2765	7.3916	8.6999	10.4317

Примечание. Верхняя строка – масса образца до сушки, $m_{\text{в-сег}}$; нижняя строка – масса после сушки, $m_{\text{с-сег}}$.

Note. Top row denotes sample mass before drying, $m_{\text{в-сег}}$; bottom row denotes sample mass after drying, $m_{\text{с-сег}}$.

частиц 338.45 ± 66.2 мкм, что соответствует песку средней крупности по ГОСТ 8736-2014. Средний размер оценивался с помощью массовых замеров частиц на оптическом микроскопе Hirox digital microscope kh-7700 с объективом OI140II. На рис. 6 представлены характерные фотографии отдельных частиц песка с указанием измерительных линий. В табл. 2 приведены результаты измерений размеров шести частиц. Для приготовления солевых растворов применялся химически чистый NaCl, а в качестве растворителя использовалась дистиллированная вода.

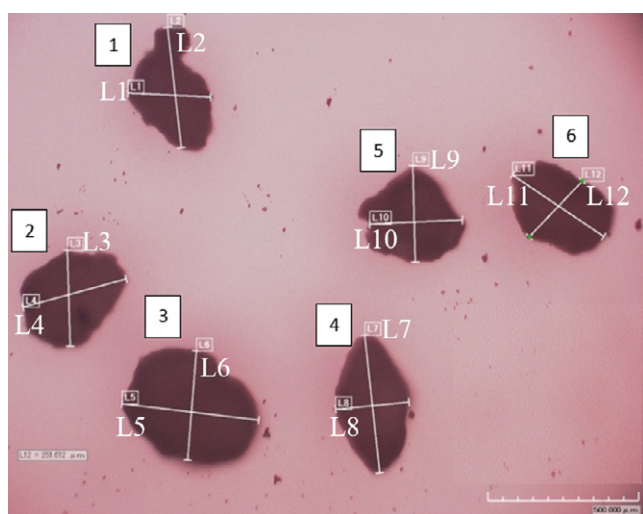


Рис. 6. Фотография отдельных частиц песка, полученная с помощью оптического микроскопа, с указанием измерительных линий.

Fig. 6. Optical micrograph of individual sand particles with measurement lines shown.

Таблица 2. Характерные средние размеры частиц (рис. 6)
Table 2. Characteristic average particle sizes (Fig. 6)

№ частицы	Линейный размер частицы, мкм	
1	L1	274.408
	L2	390.334
2	L3	310.272
	L4	353.961
3	L5	455.768
	L6	352.855
4	L7	447.201
	L8	244.801
5	L9	311.616
	L10	307.605
6	L11	360.954
	L12	251.612

Результаты и обсуждение

Согласно данным, представленным на рис. 7, температура кристаллизации демонстрирует обратную зависимость от концентрации NaCl: с ростом содержания соли в системе наблюдается монотонное понижение температуры фазового перехода. В образцах с пресной водой переход фиксируется при значениях, близких к 0°C , тогда как в засоленных образцах он смещается в область более низких температур. На графике (рис. 7) наблюдается выраженная линейная зависимость между температурой кристаллизации и концентрацией соли, что подтверждается высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0.98$). Вместе с тем следует ожидать, что в области повышенных концентраций хлорида натрия, как отмечено в [16], зависимость утратит линейный характер и процесс будет протекать в нелинейном режиме.

На рис. 8 приведены зависимости температуры, измеренной в точке, максимально удаленной от замораживающей колонки, от концентрации хлорида натрия в образцах. Близкие значения углов наклона кривых указывают на общность закономерностей процесса теплообмена в системе. При этом существенные различия проявляются в зоне фазового перехода: положение и протяженность данного участка зависят от засоленности образца, как отмечалось ранее. На временных участках, удаленных от прохождения точки начала замерзания, тепловая динамика схожа; в окрестности температуры фазового перехода наблюдаются расхождения, обусловленные сдвигом температуры фазового перехода при изменении засоленности и эффектами переохлаждения с последующей рекалесценцией, что проявляется локальными участками повышения температуры. Вместе с тем все кривые выходят на асимптотический уровень температуры, к которому они стремятся независимо от исходной концентрации соли. Это свидетельствует о том, что при достаточно длительном замораживании система достигает квазистационарного состояния, где влияние засоленности на тепловой режим минимизируется, а распределение температуры определяется главным образом граничными условиями охлаждения.

Анализ температурных профилей, зафиксированных в состоянии теплового равновесия (рис. 9 а), показывает, что рост концентрации NaCl коррелирует с повышением средней температуры образца. Это может свидетельствовать о косвенном влиянии соли на тепловую динамику, которое, по-видимому, реализуется через модификацию зависимости содержания незамерзшей влаги от температуры (остаточной влажности). Растворенные ионы понижают температуру начала кристаллизации и обеспечивают значительную долю незамерзшей воды при отрицательных температурах. При прочих равных условиях образец с повышенной концентрацией соли содержит при заданной отрицательной температуре больше жидкой фазы и, соответственно, меньше твердой ледяной фазы. Поскольку теплопроводность льда существенно выше теплопроводности

воды, уменьшение доли льда приводит к снижению эффективной теплопроводности пористой среды. Вследствие этого интенсивность отвода тепла из внутренней части образца уменьшается и температурное поле смещается к более высоким значениям, что проявляется в более пологих температурно-временных кривых и замедленном продвижении фронта заморозания. Этот механизм полностью объясняет наблюдаемые расхождения температур при одинаковых граничных условиях для образцов с разной засоленностью.

Распределение влажности вдоль оси образца, определенное по формуле 2 на основе измерений массы сегментов образцов (табл. 1) после замораживания, демонстрирует характерную картину миграции воды к фронту фазового перехода (рис. 9 б). В образцах с нулевой засоленностью наблюдается выраженное накопление

влаги в той части образцов, которая находилась ближе к торцу, охлаждаемому замораживающей колонкой. Относительный прирост влажности не превышает 10 %, что представляется неочевидным, учитывая, что песок относится к среднedisперсным средам, не склонным к морозному пучению и характеризующимся относительно малой площадью порового пространства и меньшей кривизной пор по сравнению с глинами или алевролитами. Предположительно, данное перераспределение влаги обусловлено тем, что песок содержит некоторое количество пылеватой фракции, а также совокупным действием ряда других факторов: термодиффузии по А.В. Лыкову из-за наличия небольшого объема пор, не заполненных рассолом [33], термодиффузии по Soret [34] вследствие действия градиента температуры, а также кривизны интерфейса «вода–

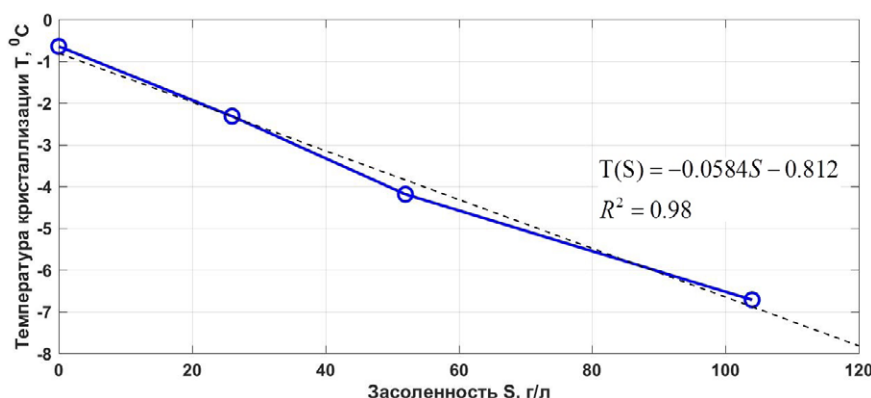


Рис. 7. Зависимость температуры кристаллизации раствора от концентрации NaCl, добавленного в грунт.

Fig. 7. Dependence of solution crystallization temperature on NaCl concentration added to the soil.

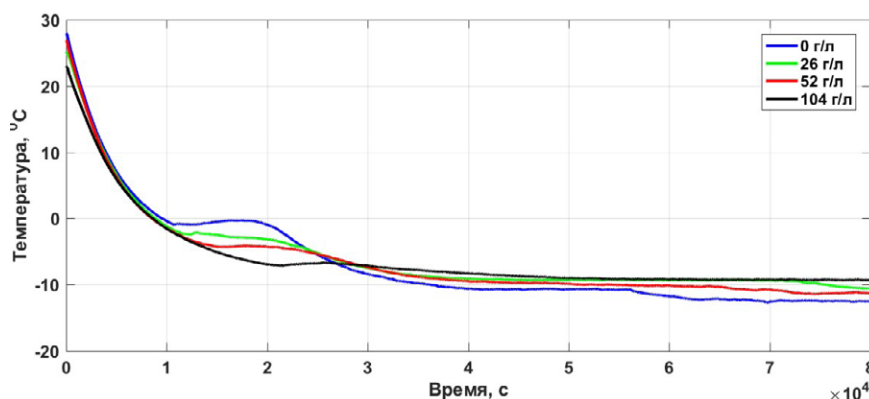


Рис. 8. Зависимость температуры образцов с различной концентрацией NaCl от времени заморозки.

Fig. 8. Dependence of the temperature of samples with varying NaCl concentrations on freezing time.

лед», вызывающей различие фазовых давлений воды и льда [35].

Вода перетекает из незамерзшей части к фронту кристаллизации, где она фиксируется в виде льда, формируя ярко выраженный градиент влажности между промерзшей и незамерзшей зонами. С увеличением концентрации хлорида натрия данный эффект постепенно ослабевает: различие во влажности между замороженной и незамороженной частями образца становится менее выраженным, что указывает на снижение интенсивности миграции влаги вблизи фронта фазового перехода. Вероятной причиной этого является понижение температуры фазового перехода и сохранение значительной доли воды в незамерзшем состоянии при отрицательных температурах. Таким образом, можно заключить, что при рассматриваемых параметрах системы растворенная в поровой влаге соль играет стабилизирующую роль, препятствуя миграции влаги. Вместе с тем в диапазоне малых концентраций соли (до ~10 г/л) может иметь место противоположная ситуация, когда увеличение засоленности может привести к увеличению эффекта морозного пучения [19, 31].

Следует отметить, что средний наклон кривых, представленных на рис. 9 б, убывает с ростом засоленности по линейному закону – это указывает на то, что интенсивность миграции влаги в среднем по образцам пород линейно снижается с ростом засоленности.

На рис. 10 представлены временные зависимости

температуры, зафиксированные термопарами 1–8, равномерно размещенными вдоль оси образца в направлении от замораживающей колонны. Данные показывают, что вблизи замораживаемого торца (термопара 1) характер-

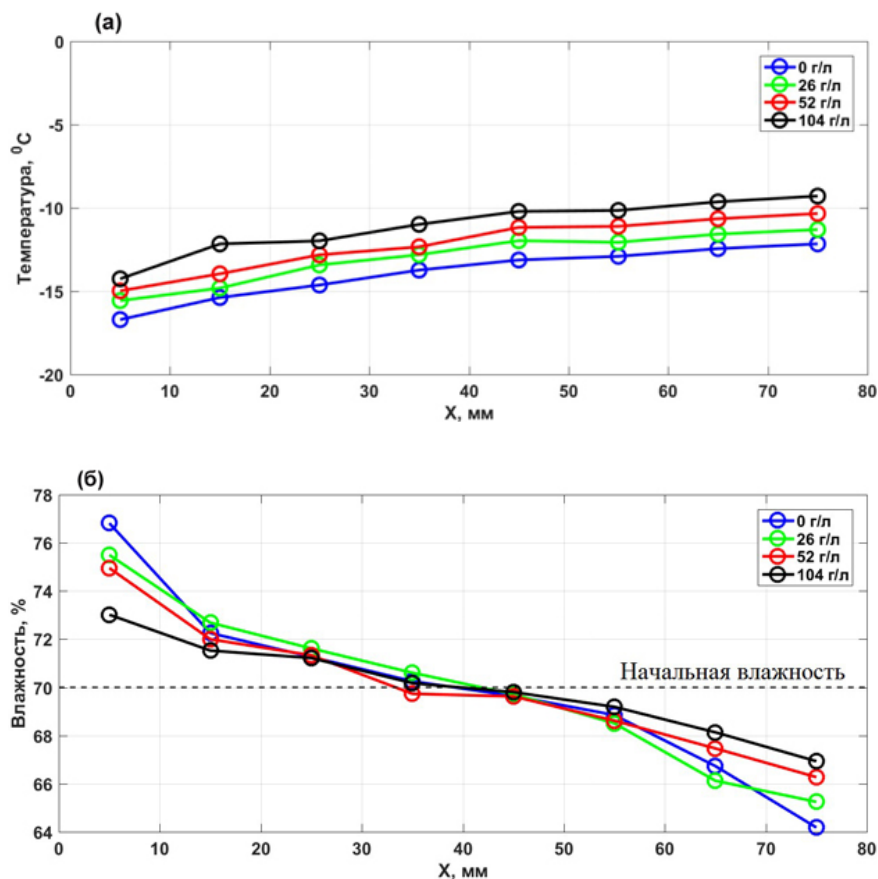


Рис. 9. Распределение температуры (а) и влажности (б) вдоль оси образцов с различной концентрацией NaCl.

Fig. 9. Distribution of temperature (a) and moisture (б) along the longitudinal axis of samples with varying NaCl concentrations.

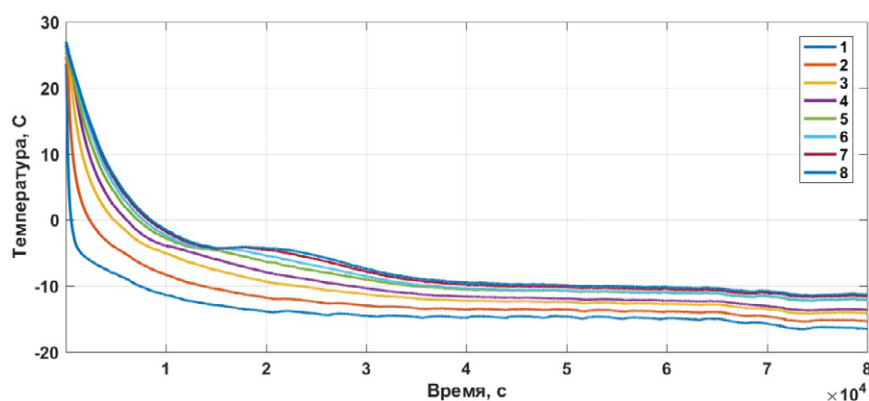


Рис. 10. Характерная временная зависимость температуры образца с концентрацией NaCl 52 г/л по данным термопар 1–8.

Fig. 10. Characteristic temporal temperature profile of the sample with an NaCl concentration of 52 g/L based on data from thermocouples 1–8.

ный участок фазового перехода практически не проявляется. Это может быть обусловлено высокой скоростью замораживания и быстрым формированием ледяной фазы, вследствие чего переход воды в лед происходит за короткий промежуток времени и не сопровождается формированием выраженного температурного плато на кривых. Однако по мере продвижения фронта замораживания вглубь образца скорость процесса заметно снижается. В результате в центральных и дальних сегментах образца процесс кристаллизации выражен более четко: на температурных кривых наблюдаются характерные плато и локальные подъемы, связанные с выделением скрытой теплоты при превращении воды в лед. Таким образом, пространственное проявление фазового перехода отражает неравномерность теплового потока в образце и подтверждает, что динамика кристаллизации существенно зависит от расстояния до замораживающего торца.

Заключение

Лабораторные исследования замораживания цилиндрических образцов песка с односторонним охлаждением показали, что засоленность оказывает существенное влияние на процессы тепломассопереноса. Подтверждена линейная зависимость понижения температуры начала замерзания поровой влаги от концентрации NaCl в диапазоне от 0 до -7°C .

Использование установки с теплоизолированными стенками позволило для всех исследованных концентраций соли достичь квазистационарного теплового состояния, на основе которого был проведен анализ перераспределения влажности. Установлено, что во всех случаях наблюдается миграция влаги с ее накоплением в зоне промерзания. В незасоленных образцах эффект выражен наиболее отчетливо, что, по-видимому, объясняется наличием некоторого количества пылеватой фракции в песке, а также совокупным влиянием термодиффузии и различия фазовых давлений на границе «вода–лед». С увеличением концентрации соли данный эффект ослабевает: различия во влажности между промерзшей и незамерзшей

зонами уменьшаются, что согласуется с предыдущими исследованиями авторов. При этом ранее выявленный эффект локального усиления миграции влаги в области малых концентраций [19] в данных экспериментах не проявился, что объясняется крупным шагом по концентрациям и акцентом на область высоких минерализаций.

Полученные результаты подтверждают, что при инженерном применении технологии искусственного замораживания необходимо учитывать перераспределение влаги и солей в засоленных грунтах и породах, поскольку они существенно влияют на эволюцию тепловых полей в замораживаемых геосредах. Зарегистрированные временно-пространственные распределения температуры и влажности могут быть использованы для калибровки математических моделей тепломассопереноса в замораживаемых средах и послужат основой для дальнейших, более комплексных экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Балобаев В.Т., Баулин В.В., Гарагуля Л.С. и др. **1999.** *Основы геокриологии*. Ч. 5. *Инженерная геокриология*. М.: Изд-во МГУ, 526 с.
2. Chen Q.M., Ghimire B., Su L.B., Liu Y. **2024.** Micro-scale investigations on the mechanical properties of expansive soil subjected to freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 219, Article 104128. doi:10.1016/j.coldregions.2024.104128
3. Lai Y., You Z., Zhang J. **2021.** Constitutive models and salt migration mechanisms of saline frozen soil and the-state-of-the-practice countermeasures in cold regions. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 13(1): 1–17. doi:10.3724/SP.J.1226.2021.00001
4. Li K.Q., Yin Z.Y., Zhang N., Liu Y. **2023.** A data-driven method to model stress-strain behaviour of frozen soil considering uncertainty. *Cold Regions Science and Technology*, 213, Article 103906. doi:10.1016/j.coldregions.2023.103906
5. Li S., Zhang M., Pei W., Lai Y. **2018.** Experimental and numerical simulations on heat-water-mechanics interaction mechanism in a freezing soil. *Applied Thermal Engineering*, 132: 209–220. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.12.061
6. Вялов С.С., Гмошинский В.Г., Городецкий С.Э. и др. **1962.** *Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледогрунтовых ограждений*. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 254 с.

7. Zhou M.B. **2025**. Structure model and design of iced cylindrical shell for large-diameter ground freezing shaft sinking. In: *Tunnelling into a sustainable future: methods and technologies*. CRC Press, p. 1930–1937.
8. Zhou X. et al. **2022**. Comprehensive review of artificial ground freezing applications to urban tunnel and underground space engineering in China in the last 20 years. *Journal of Cold Regions Engineering*, 36(3), Article 04022002. doi:10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000273
9. Kostina A., Zhelnin M., Plekhov O., Panteleev I., Levin L. **2018**. Creep behavior of ice-soil retaining structure during shaft sinking. *Procedia Structural Integrity*, 13: 1273–1278. doi:10.1016/j.prostr.2018.12.260
10. Трупак Н.Г. **1974**. *Замораживание грунтов в подземном строительстве*. М.: Недра, 280 с.
11. Pilecki Z. et al. **2025**. Temperature anomaly as an indicator of groundwater flow prior to the shaft sinking with the use of artificial ground freezing. *Engineering Geology*, 347, Article 107916. doi:10.1016/j.enggeo.2025.107916
12. Semin M. et al. **2024**. Enhancing efficiency in the control of artificial ground freezing for shaft construction: A case study of the Darasinsky potash mine. *Cleaner Engineering and Technology*, 18, Article 100710. doi:10.1016/j.clet.2023.100710
13. Phillips M. et al. **2021**. Use of artificial ground freezing in construction of cross passages under Suez Canal. *Geomechanics and Tunnelling*, 14(3): 298–307. doi:10.1002/geot.202000045
14. Ольховиков Ю.П. *Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников*. М.: Недра, 1984, 238 с.
15. Qin B. et al. **2022**. Research on influences of groundwater salinity and flow velocity on artificial frozen wall. *Transportation Geotechnics*, 34, Article 100739. doi:10.1016/j.trgeo.2022.100739
16. Tounsi H. et al. **2024**. Thermo-hydro-mechanical modeling of brine migration in a heated borehole test in bedded salt. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57(8): 5505–5518. doi:10.1007/s00603-023-03632-5
17. Bublik S. et al. **2023**. Experimental and theoretical study of the influence of saline soils on frozen wall formation. *Applied Sciences*, 13(18), Article 10016. doi:10.3390/app131810016
18. Semin M. et al. **2024**. Influence of soil salinity on the bearing capacity of the frozen wall. *Fracture and Structural Integrity*, 18(69): 106–114. doi:10.3221/IGF-ES-IS.69.08
19. Семин М.А., Левин Л.Ю., Бублик С.А., Бровка Г.П. **2025**. Влияние концентрации растворенной соли на миграцию влаги в искусственно замораживаемых грунтах. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, 2: 111–122. doi:10.15372/FTPRI20250211
20. Fan W.H., Yang P. **2019**. Ground temperature characteristics during artificial freezing around a subway cross passage. *Transportation Geotechnics*, 20, Article 100250. doi:10.1016/j.trgeo.2019.100250
21. Fan W.H., Yang P., Yang Z.H. **2019**. Impact of freeze-thaw on the physical properties and compressibility of saturated clay. *Cold Regions Science and Technology*, 168, Article 102873. doi:10.1016/j.coldregions.2019.102873
22. Wen Z., Ma W., Feng W.J., et al. **2011**. Experimental study on unfrozen water content and soil matric potential of Qinghai-Tibetan silty clay. *Environmental Earth Sciences*, 66: 1467–1476. doi:10.1007/s12665-011-1386-0
23. Stähli M., Stadler D. **1997**. Measurement of water and solute dynamics in freezing soil columns with time domain reflectometry. *Journal of Hydrology*, 195: 352–369.
24. Watanabe K., Muto Y., Mizoguchi M. **2001**. Water and solute distribution near an ice lens in a glass-powder medium saturated with sodium chloride solution under unidirectional freezing. *Crystal Growth & Design*, 1(3): 207–211. doi:10.1021/cg005535i
25. Rui D.H., Guo C., Lu M., et al. **2019**. Experimental study on water and salt migrations in clay under freezing effect. *Journal of Glaciology Geocryology*, 41(1): 109–115. doi:10.3390/app14198970
26. Xu X.Z., Wang J.C., Zhang L.X., et al. **1995**. *Mechanisms of frost heave and soil expansion of soils*. Beijing: Science Press. (In Chinese). (Google Scholar)
27. Bing H., He P. **2008**. Experimental study of water and salt redistribution of clay soil in an opening system with constant temperature. *Environmental Geology*, 55: 717–721. doi:10.1007/s00254-007-1023-0
28. Bing H., He P., Zhang Y. **2015**. Cyclic freeze-thaw as a mechanism for water and salt migration in soil. *Environmental Earth Sciences*, 74: 675–681. doi:10.1007/s12665-015-4072-9
29. Xiao Z.A., Lai Y.M., You Z.M. **2017**. Water and salt migration and deformation mechanism of sodium chloride soil during unidirectional freezing process. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(11): 1992–2001. doi:10.11779/CJGE201711006
30. Xiao Z., Hou Z., Zhu L., Dong X. **2021**. Experimental investigation of the influence of salt on the phase transition temperature in saline soil. *Cold Regions Science and Technology*, 183, Article 103229. doi:10.1016/j.coldregions.2021.103229
31. Чеверев В.Г., Брушков А.В., Половков С.А., Покровская Е.А., Сафронов Е.В. **2021**. Анализ представлений о механизме криогенной миграции воды в промерзающих грунтах. *Криосфера Земли*, 25(5): 3–12. doi:10.15372/KZ20210501
32. Павлов М.В., Карпов Д.Ф. **2023**. Решение краевой задачи тепломассопереноса методом источников для условий лучистого обогрева почвы. *Природо-обустройство*, 4: 15–20. doi:10.26897/1997-6011-2023-4-15-20
33. Lucas T. et al. **2001**. Freezing of a porous medium in contact with a concentrated aqueous freezant: numeri-

cal modelling of coupled heat and mass transport. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(11): 2093–2106. doi:10.1016/S0017-9310(00)00238-6

34. Xiao Z. et al. **2024**. Study on the multi-field-coupling model of saline frozen soil considering ice and salt crystallization. *Computers and Geotechnics*, 169, Article 106209. doi:10.1016/j.compgeo.2024.106209

References

1. Balobaev V.T., Baulin V.V., Garagulya L.S., et al. **1999**. *Fundamentals of geocryology*. Ch. 5. *Engineering geocryology*. Moscow: MGU, 526 p. (In Russ.).
2. Chen Q.M., Ghimire B., Su L.B., Liu Y. **2024**. Micro-scale investigations on the mechanical properties of expansive soil subjected to freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 219, Article 104128. doi:10.1016/j.coldregions.2024.104128
3. Lai Y., You Z., Zhang J. **2021**. Constitutive models and salt migration mechanisms of saline frozen soil and the state-of-the-practice countermeasures in cold regions. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 13(1): 1–17. doi:10.3724/SP.J.1226.2021.00001
4. Li K.Q., Yin Z.Y., Zhang N., Liu Y. **2023**. A data-driven method to model stress–strain behaviour of frozen soil considering uncertainty. *Cold Regions Science and Technology*, 213, Article 103906. doi:10.1016/j.coldregions.2023.103906
5. Li S., Zhang M., Pei W., Lai Y. **2018**. Experimental and numerical simulations on heat-water-mechanics interaction mechanism in a freezing soil. *Applied Thermal Engineering*, 132: 209–220. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.12.061
6. Vyalov S.S., Gmoshinsky V.G., Gorodetskiy S.E., et al. **1962**. [*Strength and creep of frozen soils and calculations of ice-soil retaining structures*]. Moscow: Academy of Sciences of the USSR Press, 254 p. (In Russ.).
7. Zhou M.B. **2025**. Structure model and design of iced cylindrical shell for large-diameter ground freezing shaft sinking. In: *Tunnelling into a sustainable future – methods and technologies*. CRC Press, p. 1930–1937.
8. Zhou X. et al. **2022**. Comprehensive review of artificial ground freezing applications to urban tunnel and underground space engineering in China in the last 20 years. *Journal of Cold Regions Engineering*, 36(3), Article 04022002. doi:10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000273
9. Kostina A., Zhelnin M., Plekhov O., Panteleev I., Levin L. **2018**. Creep behavior of ice-soil retaining structure during shaft sinking. *Procedia Structural Integrity*, 13: 1273–1278. doi:10.1016/j.prostr.2018.12.260
10. Trupak N.G. **1974**. [*Freezing of soils in underground construction*]. Moscow: Nedra, 280 p. (In Russ.).
11. Pilecki Z. et al. **2025**. Temperature anomaly as an indicator of groundwater flow prior to the shaft sinking with the use of artificial ground freezing. *Engineering Geology*, 347, Article 107916. doi:10.1016/j.enggeo.2025.107916
12. Semin M. et al. **2024**. Enhancing efficiency in the control of artificial ground freezing for shaft construction: A case study of the Darasinsky potash mine. *Cleaner Engineering and Technology*, 18, Article 100710. doi:10.1016/j.clet.2023.100710
13. Phillips M. et al. **2021**. Use of artificial ground freezing in construction of cross passages under Suez Canal. *Geomechanics and Tunneling*, 14(3): 298–307. doi:10.1002/geot.202000045
14. Olkhovikov Y.P. **1984**. [*Support of capital workings in potash and salt mines*]. Moscow: Nedra, 238 p. (In Russ.).
15. Qin B. et al. **2022**. Research on influences of groundwater salinity and flow velocity on artificial frozen wall. *Transportation Geotechnics*, 34, Article 100739. doi:10.1016/j.trgeo.2022.100739
16. Tounsi H. et al. **2024**. Thermo-hydro-mechanical modeling of brine migration in a heated borehole test in bedded salt. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57(8): 5505–5518. doi:10.1007/s00603-023-03632-5
17. Bublik S. et al. **2023**. Experimental and theoretical study of the influence of saline soils on frozen wall formation. *Applied Sciences*, 13(18), Article 10016. doi:10.3390/app131810016
18. Semin M. et al. **2024**. Influence of soil salinity on the bearing capacity of the frozen wall. *Fracture and Structural Integrity*, 18(69): 106–114. doi:10.3221/IGF-ESIS.69.08
19. Semin M.A., Levin L.Yu., Bublik S.A., Brovka G.P. **2025**. Effect of salinity on moisture migration in artificially frozen ground. *Journal of Mining Science*, 61(2): 267–277. doi:10.1134/S1062739125020115
20. Fan W.H., Yang P. **2019**. Ground temperature characteristics during artificial freezing around a subway cross passage. *Transportation Geotechnics*, 20, Article 100250. doi:10.1016/j.trgeo.2019.100250
21. Fan W.H., Yang P., Yang Z.H. **2019**. Impact of freeze-thaw on the physical properties and compressibility of saturated clay. *Cold Regions Science and Technology*, 168, Article 102873. doi:10.1016/j.coldregions.2019.102873
22. Wen Z., Ma W., Feng W.J., et al. **2011**. Experimental study on unfrozen water content and soil matric potential of Qinghai-Tibetan silty clay. *Environmental Earth Sciences*, 66: 1467–1476. doi:10.1007/s12665-011-1386-0
23. Stähli M., Stadler D. **1997**. Measurement of water and solute dynamics in freezing soil columns with time domain reflectometry. *Journal of Hydrology*, 195: 352–369.
24. Watanabe K., Muto Y., Mizoguchi M. **2001**. Water and solute distribution near an ice lens in a glass-powder medium saturated with sodium chloride solution under unidirectional freezing. *Crystal Growth & Design*, 1(3): 207–211. doi:10.1021/cg005535i

25. Rui D.H., Guo C., Lu M., et al. **2019**. Experimental study on water and salt migrations in clay under freezing effect. *Journal of Glaciology Geocryology*, 41(1): 109–115. doi:10.3390/app14198970
26. Xu X.Z., Wang J.C., Zhang L.X., et al. **1995**. *Mechanisms of frost heave and soil expansion of soils*. Beijing: Science Press. (In Chinese). (Google Scholar)
27. Bing H., He P. **2008**. Experimental study of water and salt redistribution of clay soil in an opening system with constant temperature. *Environmental Geology*, 55: 717–721. doi:10.1007/s00254-007-1023-0
28. Bing H., He P., Zhang Y. **2015**. Cyclic freeze-thaw as a mechanism for water and salt migration in soil. *Environmental Earth Sciences*, 74: 675–681. doi:10.1007/s12665-015-4072-9
29. Xiao Z.A., Lai Y.M., You Z.M. **2017**. Water and salt migration and deformation mechanism of sodium chloride soil during unidirectional freezing process. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(11): 1992–2001. doi:10.11779/CJGE201711006
30. Xiao Z., Hou Z., Zhu L., Dong X. **2021**. Experimental investigation of the influence of salt on the phase transition temperature in saline soil. *Cold Regions Science and Technology*, 183, Article 103229. doi:10.1016/j.coldregions.2021.103229
31. Cheverev V.G., Brushkov A.V., Polovkov S.A., Pokrovskaya E.A., Safronov E.V. **2021**. Analysis of concepts on the mechanism of cryogenic water migration in freezing soils. *Earth's Cryosphere*, 25(5): 3–12. (In Russ.). doi:10.15372/KZ20210501
32. Pavlov M.V., Karpov D.F. **2023**. Solution of heat and mass transfer boundary problem using the method of sources for soil radiant heating conditions. *Prirodobustroystvo*, 4: 15–20. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-4-15-20
33. Lucas T. et al. **2001**. Freezing of a porous medium in contact with a concentrated aqueous freezant: numerical modelling of coupled heat and mass transport. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(11): 2093–2106. doi:10.1016/S0017-9310(00)00238-6
34. Xiao Z. et al. **2024**. Study on the multi-field-coupling model of saline frozen soil considering ice and salt crystallization. *Computers and Geotechnics*, 169, Article 106209. doi:10.1016/j.compgeo.2024.106209

Об авторах

Сотрудники Горного института Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия:

Левин Лев Юрьевич (<https://orcid.org/0000-0003-0767-9207>), член-корреспондент РАН, доктор технических наук, директор Горного института УрО РАН, aerolog_lev@mail.ru

Семин Михаил Александрович (<https://orcid.org/0000-0001-5200-7931>), доктор технических наук, заведующий лабораторией математического моделирования геотехнических систем, seminma@inbox.ru

Бублик Сергей Анатольевич, младший научный сотрудник лаборатории математического моделирования геотехнических систем, serega_bublik@mail.ru

Сотрудники Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия:

Пантелеев Иван Алексеевич (<https://orcid.org/0000-0002-7430-3667>), доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией цифровизации горнотехнических процессов, pia@icmm.ru

Вшивков Алексей Николаевич (<https://orcid.org/0000-0002-7667-455X>), младший научный сотрудник лаборатории термомеханики твердых тел, vshivkov.a@icmm.ru

Угольников Михаил Васильевич (<https://orcid.org/0009-0003-9997-1615>), инженер-исследователь лаборатории термомеханики твердых тел, ugolnikov.m@icmm.ru

Ложкин Денис Витальевич (<https://orcid.org/0000-0003-3302-8408>), младший научный сотрудник лаборатории термомеханики твердых тел, lozhkin.d@icmm.ru

Плехов Олег Анатольевич (<https://orcid.org/0000-0002-0378-8249>), член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, директор Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, e-mail: pia@icmm.ru

About the Authors

Employees of the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia:

Levin, Lev Y. (<https://orcid.org/0000-0003-0767-9207>), Corr. Member of RAS, Dc. Sci. (Eng.), Director of the Mining Institute, aerolog_lev@mail.ru

Semin, Mikhail A. (<https://orcid.org/0000-0001-5200-7931>), Dc. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of mathematical modeling of geotechnical processes, seminma@inbox.ru

Bublik, Sergey A. Junior Researcher of the Laboratory of mathematical modeling of geotechnical systems, serega_bublik@mail.ru

Employees of the Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia:

Panteleev, Ivan A. (<https://orcid.org/0000-0002-7430-3667>), Dc. Sci. (Phys. and Math.), Head of the Laboratory of digitalization of mining processes, pia@icmm.ru

Vshivkov, Aleksei N. (<https://orcid.org/0000-0002-7667-455X>), Junior Researcher of the Laboratory of thermomechanics of Solids, vshivkov.a@icmm.ru

Ugolnikov, Mikhail V. (<https://orcid.org/0009-0003-9997-1615>), Research Engineer of the Laboratory of thermomechanics of Solids, ugolnikov.m@icmm.ru

Lozhkin, Denis V. (<https://orcid.org/0000-0003-3302-8408>), Junior Researcher of the Laboratory of thermomechanics of solids, lozhkin.d@icmm.ru

Plekhev, Oleg A. (<https://orcid.org/0000-0002-0378-8249>), Corr. Member of RAS, Dc. Sci. (Phys. and Math), Director of the Perm Federal Research Center Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, e-mail: pia@icmm.ru

Поступила 01.10.2025

Принята к публикации 24.10.2025

Received 1 October 2025

Accepted 24 October 2025

© Авторы, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.21

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.452-477>
<https://www.elibrary.ru/zblqvw>

Водно-осажденная сера вулканов Головнина и Менделеева (остров Кунашир, Южные Курильские острова, Россия)*

А. И. Малышев[@], Л. К. Малышева

[@]E-mail: malyshev@igg.uran.ru

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

Резюме. Принято считать, что сера вулканических озер имеет экзогенное происхождение и образуется в результате взаимодействия вулканических газов друг с другом и с атмосферным кислородом в водной среде. Данная работа содержит описание отложений водно-осажденной серы, выяснение условий и причин их образования, оценку значения этих отложений в общем генезисе серы вулканических озер. Выполненные полевые, лабораторные и теоретические исследования с учетом ранее полученных результатов не подтверждают экзогенное происхождение серы вулканических озер. Сера гидротермальных источников на поверхности, на дне вулканических озер, морей и океанов имеет исключительно эндогенное (конденсатное) происхождение. Коллоидная сера также имеет эндогенное (конденсатное) происхождение и не осаждается в турбулентных и конвективных водных потоках, постепенно разрушаясь в реакциях диспропорционирования серы. Водные отложения мелкокристаллической серы возникают в специфических условиях пресыщенной концентрации серной суспензии и являются таким же локальным явлением, как и образование игольчатой кристаллической серы вокруг газовых выходов на наземных термальных полях.

Ключевые слова: самородная сера, конденсация, коллоид, вулкан Головнина, вулкан Менделеева

Water-deposited sulfur of Golovnin and Mendeleev volcanoes (Kunashir Island, Southern Kuril Islands, Russia)

Aleksandr I. Malyshev[@], Lidiia K. Malysheva

[@]E-mail: malyshev@igg.uran.ru

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

Abstract. It is generally believed that the sulfur of volcanic lakes is of exogenous origin and is formed as a result of the interaction of volcanic gases with each other and with atmospheric oxygen in the aquatic environment. This work contains descriptions the deposits of water-deposited sulfur, at clarifying the conditions and causes of their formation, and at assessing the importance of these deposits in the general genesis of sulfur in volcanic lakes. The conducted field, laboratory, and theoretical studies, taking into account the previously obtained results, do not confirm the exogenous origin of sulfur in volcanic lakes. Sulfur from hydrothermal springs on the surface and at the bottom of volcanic lakes, seas, and oceans is exclusively of endogenous (condensate) origin. Colloidal sulfur also has an endogenous (condensate) origin and does not precipitate in turbulent and convective water flows, gradually collapsing in sulfur disproportionation reactions. Aqueous deposits of fine crystalline sulfur occur under specific conditions of a saturated concentration of sulfur suspension. These deposits are the same local phenomenon as the formation of needle-shaped crystalline sulfur around gas outlets in terrestrial thermal fields.

Keywords: native sulfur, condensation, colloid, Golovnin volcano, Mendeleev volcano

* Полный текст данной статьи на английском языке размещен на сайте журнала: <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2025-4-9.pdf>

The full text of this article in English can be found on the website of the «Geosystems of Transition Zones» journal: <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2025-4-9.pdf>

Для цитирования: Малышев А.И., Малышева Л.К. Водно-осажденная сера вулканов Головнина и Менделеева (остров Кунашир, Южные Курильские острова, Россия). *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 4, с. 452–477. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.452-477>; <https://www.elibrary.ru/zblqvww>

For citation: Malyshev A.I., Malysheva L.K. Water-deposited sulfur of Golovnin and Mendeleev volcanoes (Kunashir Island, Southern Kuril Islands, Russia). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 4, 24 p. URL: <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2025-4-9.pdf>; <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.452-477>

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» ИГГ УрО РАН.

Авторы выражают благодарность Д.А. Замятину, Н.С. Чебыкину, Л.В. Леоновой за консультации и помощь в работе со сканирующим электронным микроскопом; В.И. Силаеву за консультации по минералогии месторождений серы и дополнительные данные для публикации; 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 D.A. Zamyatin, N.S. Chebykin, and L.V. Leonova for consultations and assistance in working with a scanning electron microscope; to V.I. Silaev for advice on the mineralogy of sulfur deposits and providing additional data for publication; and to the administration and staff of the Kuril Reserve for their help in conducting research.

Введение

Сера – одно из основных летучих веществ, обеспечивающих магматическую активность (Ф.А. Перре: «Газ является активным веществом, а магма – его носителем!» [1, с. 36]). Критическая температура серы составляет 1040 °С. Давление насыщенных паров серы уменьшается с понижением температуры. Поэтому относительное увеличение ее содержания в составе вулканических газов обычно указывает на поступление новых порций ювенильного материала и используется при прогнозировании вулканической активности. Физико-химические свойства серы делают ее одним из ключевых факторов рудообразования [2], которое обеспечило человечество запасами сульфидных и постсульфидных оксидных руд, а также залежами самой самородной серы.

В представлениях о формировании вулканогенных месторождений самородной серы преобладают две точки зрения. Одна из них [3] рассматривает серу как конечный продукт гидротермального процесса рудообразования. Другая [4, 5] исходит из естественного круговорота серы, при котором накопление ее промышленных концентраций происходит в водной среде. Обе точки зрения сходятся

в отношении озер в кратерах вулканов. Сера здесь, по мнению исследователей, имеет экзогенное происхождение и образуется в результате взаимодействия вулканических газов друг с другом и с атмосферным кислородом в водной среде.

Коллоидная сера занимает центральное место в концепции хемогенно-осадочного генезиса самородной серы в вулканических озерах [6–9]. С.И. Набоко [7, с. 100–103] писала об образовании серы в вулканических озерах кальдеры Головнина: «Сера образуется, вероятно, в результате окисления сероводорода. Также она может возникнуть из сернистой кислоты при реакции ее с сероводородом. Во всех случаях образуется коллоидная сера. В коллоидных растворах вокруг газовых пузырьков и твердых илистых частиц образовывались сферические стяжения, которые частично осаждались на дно с образованием серных илов, а частично выносились газами на поверхность в виде серной пены».

В предыдущих исследованиях мы не обнаружили отложений коллоидной серы в кальдере вулкана Головнина [10] и пришли к выводу, что сера в озерах кальдеры представляет собой преимущественно эндогенный конденсат. Мы не отрицаем этого вывода, но считаем, что исследования водно-осажденной серы

остались тогда незавершенными. Данная работа направлена на устранение возникшего пробела. Цель исследований: определить значение водного осаждения серы в общем генезисе ее вулканогенных месторождений, подтвердить или опровергнуть участие коллоидной серы в осадкообразовании и ее хемогенный генезис. Это позволяет более детально и объективно оценить важность коллоидной серы в формировании отложений вулканических озер в кальдере Головнина. Поскольку Набоко [7] приводит отложения термальных источников на вулкане Менделеева в качестве примера залежей коллоидной серы, в этой работе мы расширили географию исследований, включив в нее эти объекты.

Методы

Работа основана на полевых наблюдениях и исследованиях, проведенных в основном в сентябре 2024 г. и частично в 2021–2023 гг. В ходе исследований осматривались известные по литературным данным и собственным наблюдениям отложения водно-осажденной серы, оценивалось их распространение и мощность отложений, обращалось внимание на наличие или отсутствие газовых выходов и отложений воздушно-осажденной серы в окрестностях серуотлагающих термальных источников. Пробы водного осадка отбирались по возможности без нарушения его целостности вместе с водой в герметические емкости. Температуру измеряли цифровым термометром с выносным датчиком с рабочим диапазоном измерений от -20 до $+300$ °C и точностью ± 1 °C. Измерения pH выполнялись двумя pH-метрами (диапазон 0.00–14.00 pH, точность ± 0.01 pH) после охлаждения воды до температуры менее 60 °C.

Микроструктуру донных осадков, после длительного (не менее месяца) отстаивания отобранных образцов водных отложений, слива избыточной воды и высушивания, исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA LANS с приставками EMF и DORE INCA Energy350X-Max50

и NordlysNano (Oxford Instruments). Состав осадка определяли при помощи спектрального сканирования. При наличии самородной серы анализировались размеры и морфология ее минеральных выделений с контролем наличия в осадке коллоидных частиц (размерность менее 1 мкм).

В теоретической части обсуждения результатов используется молекулярно-химическое моделирование, подробно рассмотренное в [10].

Вулканологическая обстановка

Вулканы Менделеева и Головнина (рис. 1) расположены в южной части о. Кунашир, самого южного острова Курильской островной дуги.

Вулкан Менделеева

Вулкан Менделеева (43.98 N, 145.73 E, высота 896 м) имеет сложное строение. Согласно [12], он состоит из трех вложенных друг в друга кальдерно-кратерных депрессий (6×9 ; 3×3.5 ; 1×1 км) и экструзивного купола высотой около 400 м, заполняющего внутреннюю депрессию. Лавы купола имеют дацитовый состав. Остальная часть вулкана состоит из андезитовых и андезибазальтовых лавовых потоков. Фундаментом вулкана являются вулканические неогеновые структуры.

Согласно радиоуглеродному анализу, возраст экструзивного купола составляет около 2600 лет [12]. Текущая активность вулкана ограничена термальными полями, расположенными на расстоянии 1–1.5 км от вершины на высоте от 300 до 500 м над уровнем моря. Северо-Западное поле (рис. 1, I) и Северо-Восточное поле (рис. 1, II) наиболее активны. На общем фоне спокойной фумарольной активности здесь периодически происходят газовые выбросы и взрывы. На Северо-Западном термальном поле также иногда изливаются серные и серно-опаловые лавы.

На склонах вулкана известно несколько групп термальных источников. Нас интересуют

отложения серы в кислых горячих источниках, расположенных в верховьях Кедрового ручья (рис. 1 с, точки 1 и 2) и в среднем течении Кислого ручья (рис. 1 с, точки 3–5).

Подробное описание этих и других гидротермальных источников вулкана, а также гидротермальной системы вулкана Менделеева в целом приведено в [13].

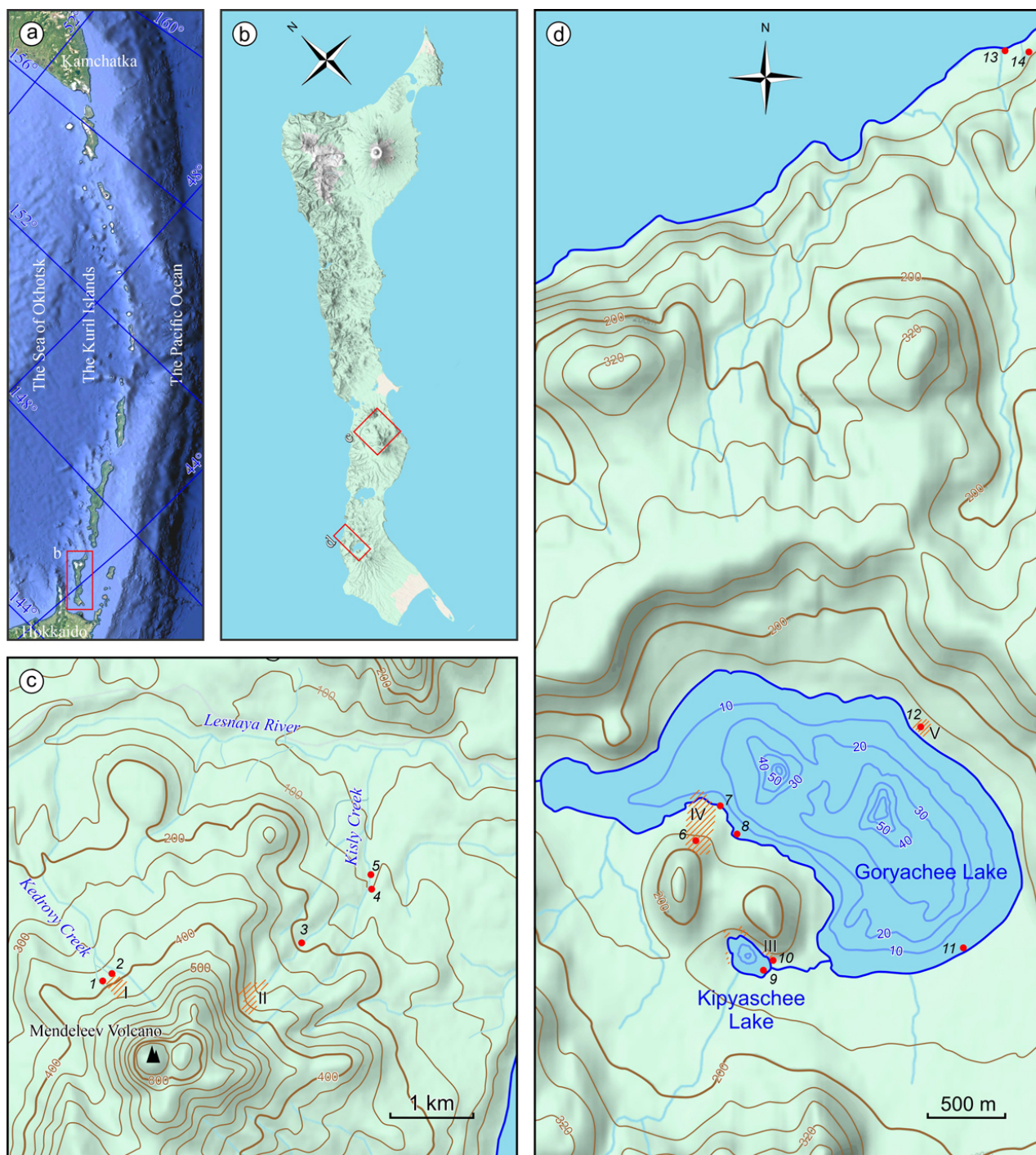


Рис. 1. (а) Курильские острова, (б) о. Кунашир, (с) вулкан Менделеева, (д) кальдера Головнина. I–V – термальные поля: Северо-Западное (I) и Северо-Восточное (II) вулкана Менделеева; Центральное Восточное (III), Центральное Западное (IV) и Черепакховое поле (V) вулкана Головнина. 1–14 – точки наблюдения.

Fig. 1. (a) The Kuril Islands, (b) Kunashir Island, (c) Mendelev volcano, (d) Golovnin caldera. I–V, thermal fields: North-Western field (I) and North-Eastern field (II) of Mendelev volcano; Central East field (III), Central West field (IV), and Cherepakhovoe field (V) of Golovnin caldera. 1–14, observation points.

Вулкан Головнина

Вулкан Головнина (48.87 N, 145.50 E, максимальная высота 547 м) представляет собой кальдеру, которая возникла ~38 тыс. лет назад [14] и имеет диаметр около 6 км. В посткальдерный период вулканическая активность привела к образованию экструзивных куполов андезит-дацитового состава [15], одного снаружи кальдеры и четырех внутри нее. В кальдере расположены два вулканических озера.

Кипящее озеро (135 м н.у.м., площадь 0.05 км²) расположено у южного подножия Центрального Восточного купола (рис. 1 d) 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 [13, 16]. Основной газогидротермальный поток приурочен к глубоководной части озера. Максимальная глубина озера составляет 25 м [16]. Есть свидетельства существования расплава серы на дне озера [11].

Горячее озеро (128 м н.у.м., площадь 2.94 км²) расположено в северо-восточной части кальдеры (рис. 1 d). 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. Глубина озера здесь достигает 60 м. Оба кратера демонстрируют газогидротермальную активность. Река Озерная вытекает из озера на западе и через 2 км впадает в Охотское море.

Последнее сильное извержение произошло около 1300–1420 гг. нашей эры [17] у южного подножия Центрального Восточного купола. В настоящее время вулкан проявляет эпитеермальную ($T < 400$ °С) вулканическую активность. Она локализована в основном в пределах термальных полей и проявляется в виде фумарол, горячих источников и небольших грязевых котлов. Наиболее активны Центральное Восточное, Центральное Западное и Черепаховое термальные поля (рис. 1). Горя-

чие источники с водно-осажденной серой также присутствуют на внешних склонах вулкана со стороны Охотского моря. Вулкан время от времени демонстрирует эпитеермальную эффузивную активность: в августе 1979 г. произошло три эпизода излияния расплава серы [18], в сентябре 2022 г. нами были обнаружены серно-опаловый поток и излияние геля кремниевой кислоты [19]. 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 [18].

Результаты

Водно-осажденная сера на вулкане Менделеева

Отложения Кедрового ручья

Наиболее известны среди исследователей, местных жителей и туристов отложения водно-осажденной серы в верховьях ручья Кедровый (рис. 1 с, точки 1 и 2). Горячие источники с водно-осажденной серой расположены в двух оврагах у подножия Северо-Западного термального поля. Согласно [13], источники относятся к сульфатному типу термальных вод.

Водно-осажденная сера в северо-западном овраге (рис. 1 с, точка 1) присутствует на двух участках.

Верхний участок (рис. 2 а–с) расположен на высоте 391 м н.у.м. в 40 м от окончания опаловых и серно-опаловых пород термального поля. Отложения водно-осажденной серы берут начало из двух термальных источников в борту оврага. Один из горячих источников (рис. 2 b) имеет температуру 55 °С и pH = 1.55, второй (рис. 2 с) – 56 °С и pH = 1.21. Вода в обоих источниках прозрачна, газовые выходы отсутствуют.

На выходе термальных источников водные отложения серы незначительны. В трех-пяти метрах от истоков водные потоки из обоих горячих источников сливаются в один. Толщина отложений водной серы здесь максимальна – до 1 см на поверхности обломков пород

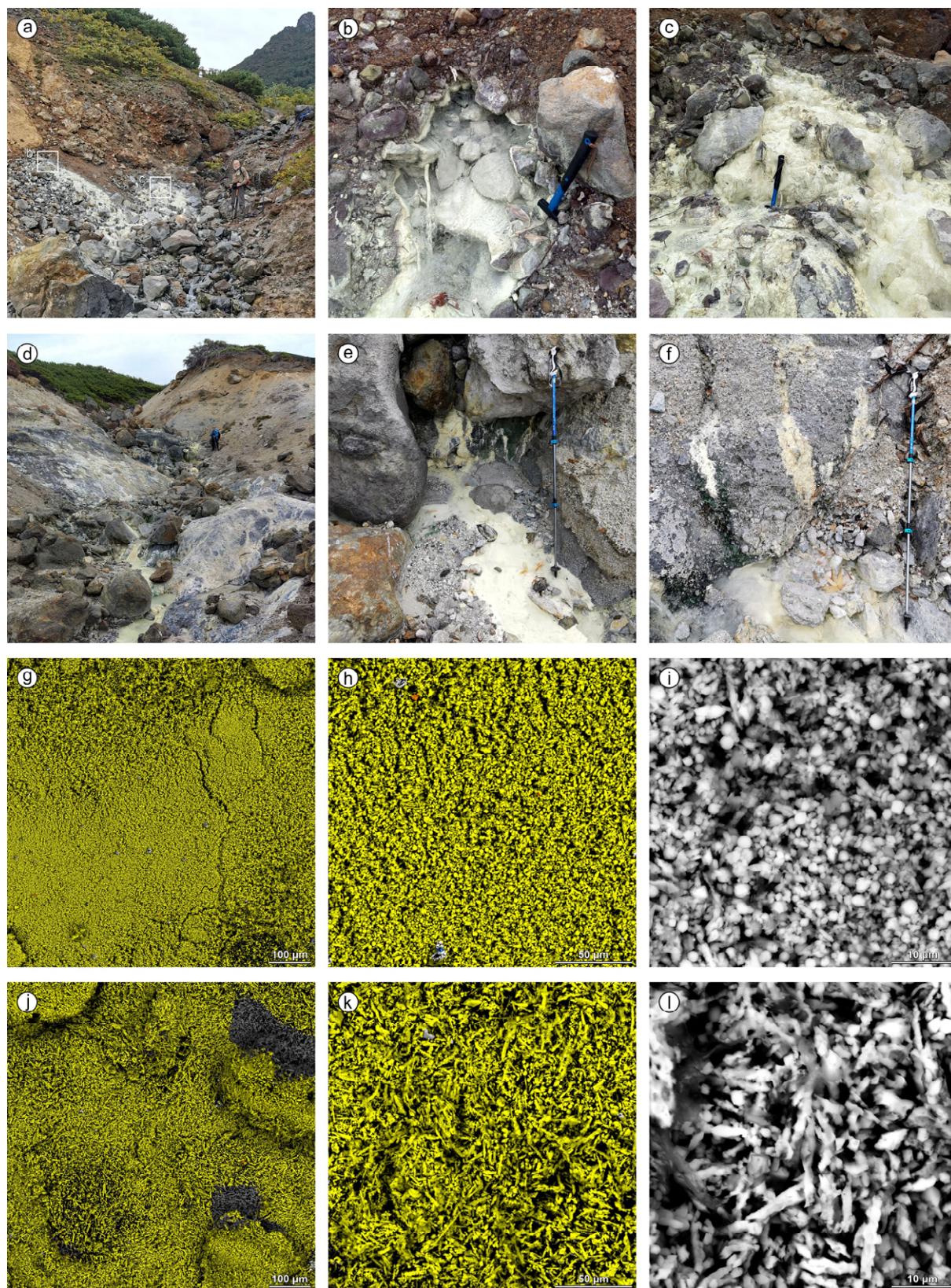


Рис. 2. Водно-осажденная сера в верховьях Кедрового ручья на вулкане Менделеева (a–f) и ее СЭМ-изображения (g–l). Условные цвета спектрального картирования для фотографий g, h, j, k: желтый – самородная сера, оранжевый – сульфид железа, светло-серый – диоксид кремния, от темно-серого до черного – спектральные тени. Остальные пояснения см. в тексте.

Fig. 2. Water-deposited sulfur in the upper reaches of the Kedrovyy Creek on Mendelev volcano (a–f) and its SEM-images (g–l). The conventional colors of spectral mapping for images g, h, j, k: yellow, native sulfur; orange, iron sulfide; light gray, silicon dioxide; dark gray to black, spectral shadows. See the text for explanations.

на дне потока и до 10 см в пустотах между ними. Отложения серы имеют белый цвет со слабым желтым оттенком. Они рыхлые, слабосвязанные и легко разрушаются при малейшем прикосновении и в виде белесой мути уносятся водным потоком. Толщина отложений серы быстро уменьшается вниз по течению термального ручья, и на расстоянии 13 м от источников отложения полностью исчезают. Термальный водный поток здесь имеет температуру 50 °С, $pH = 1.38$, а протекающий по параллельному руслу и не имеющий отложений серы водный поток – температуру 36 °С и $pH = 1.76$.

Нижний участок северо-западного оврага с отложениями водно-осажденной серы находится в 35 м от верхних горячих источников на высоте 377 м н.у.м. Водные отложения серы начинаются здесь с выхода термальной воды в углублении на дне одного из русел ручья. Видимых газовых выходов нет. Термальная вода донного источника имеет температуру 51 °С, температура воды в ручье перед источником (выше по течению) составляет 40 °С. Значения pH примерно одинаковы в термальном источнике и в ручье перед термальным выходом – 1.75 и 1.78 соответственно. Как и на верхнем участке, водные отложения серы минимальны на выходе термальной воды, достигают максимальной толщины 4–5 мм на расстоянии 3–5 м от истока и полностью исчезают на расстоянии 14.5 м.

Повышенная температура термальной воды обуславливает ее интенсивное испарение в условиях прохладного климата. Судя по сильному запаху, вместе с парами воды выделяется сероводород. Интенсивность запаха (выделения сероводорода) коррелирует с толщиной и площадью водных отложений серы. Запах незначителен в районе самих источников, становится сильным в испарениях из зон максимального отложения серы, а затем ниже по течению ослабляется до обычного запаха, свойственного сульфатным термальным водам.

Водные отложения серы в северном овраге (рис. 1, точка 2; рис. 2 d) тоже находятся на высоте 375–395 м н.у.м. Водно-осажденная сера приурочена к многочисленным тер-

мальным источникам на дне оврага (рис. 2 e) и просачиваниям воды в его бортах (рис. 2 f). Общая протяженность отложений серы на дне оврага составляет чуть более 50 м. Максимальная протяженность отложения серы из одиночного термального источника не превышает 15 м. Многочисленные просачивания воды в бортах оврага формируют короткие (20–50 см) шлейфы водно-осажденной серы. Сближенные группы источников формируют общий шлейф серных отложений на дне оврага и вместе с изолированными источниками создают штрихпунктирный облик отложений водной серы. Толщина отложений серы обычно составляет несколько миллиметров, в редких случаях достигая 1 см.

Максимальный дебит источников в северном овраге ниже дебита источников верхнего участка северо-западного оврага. Температура воды в источниках варьирует в зависимости от дебита от 53 °С в крупных источниках до 18 °С в мелких просачиваниях воды в бортах оврага; $pH = 1.2–1.8$. Выходы газов отсутствуют. Запах сероводорода в испарениях термальных вод коррелирует с толщиной и площадью водных отложений серы. Отложения воздушно-осажденной серы на камнях и растительности за пределами водных потоков отсутствуют.

Частицы водно-осажденной серы (рис. 2 g–l) представлены низкотемпературной ромбической α -серой и серными шариками. Кристаллические формы серы – это скелетные кристаллы в форме копья, усеченные бипирамиды и призматические кристаллы. Кроме серы в водных отложениях присутствуют редкие микрочастицы опала и сульфидов железа. СЭМ-изображения серы из нижнего (рис. 2 g–i) и верхнего (рис. 2 j–l) участков в северо-западном овраге (рис. 1, точка 1) приведены в качестве примера. В водно-осажденной сере верхнего участка доминируют копьевидные скелетные кристаллы размером до 50 мкм. В сере нижнего участка преобладают серные сферулы диаметром 1–3 мкм, копьевидные скелетные кристаллы встречаются реже, и их продольный размер не превышает 15 мкм. Минимальный поперечный

размер частиц водно-осажденной серы ограничен примерно 1 мкм в обоих случаях. Микроструктурные характеристики водной серы в северном овраге (рис. 1, точка 2) аналогичны и варьируют в зависимости от условий: более крупнозернистая сера характерна для термальных источников с более высоким дебитом и объемом отложений серы.

Пространственное положение и объемы водно-осажденной серы не менялись в течение всего 4-летнего периода наших наблюдений.

Также есть несколько кипящих источников с вытекающими из них термальными ручьями в пределах самого Северо-Западного термального поля. Вода в них прозрачна, имеет сульфатно-хлоридный состав [13] при температуре 96–97 °С и pH = 1.9–2.1. Водно-осажденная сера в них отсутствует, тогда как воздушно-осажденная сера вполне обычна на породах над кипящими источниками с газовыми выходами (рис. 3).

Отложения в Кислом ручье

Истоки Кислого ручья расположены на Северо-Восточном термальном поле (рис. 1, II). Здесь многочисленные ручейки, стекающие со склонов вулкана Менделеева, группируются в двух оврагах. Газовые выходы (до 98 °С) находятся в опал-серно-сульфидных скалах в бортах этих оврагов. Термальные источники, водные и грязевые котлы

(и, соответственно, водно-осажденная сера) в пределах Северо-Восточного термального поля отсутствуют.

Верхне-Менделеевские термальные источники находятся вниз по течению Кислого ручья примерно в 800 м от Северо-Восточного термального поля. Многочисленные газовые выходы, кипящие водные и грязевые котлы и парящие опал-серно-сульфидные скалы находятся в русле ручья и на его берегах на протяжении 120 м. Источники имеют сульфатный состав вод [13] с pH < 2.5 и температурой до 100 °С. В кипящих источниках водно-осажденная сера отсутствует, тогда как воздушно-осажденная сера вполне обычна на поверхности нависающих над источниками пород (аналогично рис. 3). Сильный запах сероводорода сопровождает все газовые выходы.

Водно-осажденная сера присутствует в нижней части Верхне-Менделеевских источников (рис. 1, точка 3) в обрыве левого берега Кислого ручья на высоте 178 м н.у.м. и на 1–1.5 м выше уровня воды в ручье. Отложения водной серы представлены (рис. 4) небольшими шлейфами в просачиваниях термальных вод, серно-опаловыми сталактитами и отложениями серы в небольшой луже под сталактитами. Из этой лужи вытекает ручеек, в котором отложения серы прослеживаются на расстояние около 1.5 м.

Температура воды, тонкими струйками льющейся из сталактитов, составляет 57 °С. Термальные выходы воды с осажденной серой имеют температуру от 52 до 71 °С. Газовые выходы на участке осаждения водной серы отсутствуют, однако сами отложения источают сильный запах сероводорода.

Небольшой активный грязевой котел (рис. 4 с) расположен на этом же берегу Кислого Ручья в 6 м от обрыва с серно-опаловыми сталактитами на вершине холма термальных глин под уступом серно-опаловых пород. Булькающая грязь в котле имеет температуру 83 °С, температура поверхности окружающих термальных глин 50 °С.



Рис. 3. Один из кипящих источников Северо-Западного термального поля. Водно-осажденная сера на дне источника отсутствует, воздушно-осажденная сера отмечена на поверхности нависающих над источником пород.

Fig. 3. One of the boiling springs of the North-Western thermal field. Water-deposited sulfur is absent at the bottom of the spring, but air-deposited sulfur is present on the surface of the rocks overhanging the spring.

Образец грязи из этого котла использован для контроля наличия и вида водно-осажденной серы в грязевых котлах.

Просачивания термальных вод с короткими (0.5–1.5 м) шлейфами водно-осажденной

серы обнаружены также в 80 м ниже по течению Кислого ручья (168 м н.у.м.) в основании свежей обвальной осыпи левого берега.

Микроструктурный анализ водно-осажденной серы из просачиваний и серно-опаловых

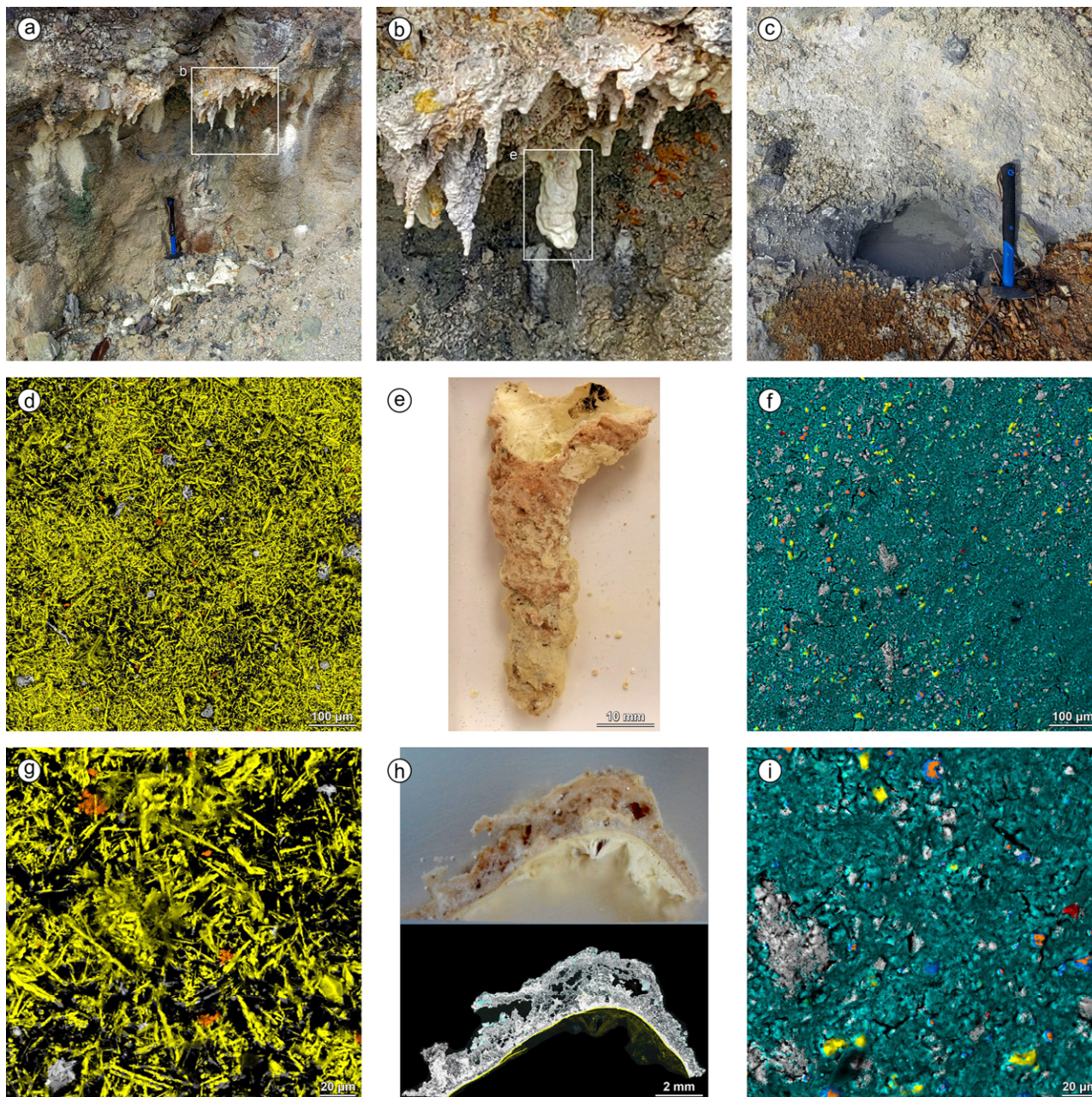


Рис. 4. Отложения серы в воде Верхне-Менделеевских термальных источников. Условные цвета спектрального картирования для фотографий d, g, h (нижняя часть), f, i: желтый – самородная сера; оранжевый – сульфид железа; светло-серый – диоксид кремния; голубой – алюмосиликаты (глинистые минералы); синий – силикаты, содержащие Fe, Mg или Ca (частицы породообразующих минералов вулканических пород); красный – диоксид титана; от темно-серого до черного – спектральные тени. Белые прямоугольники с буквенным обозначением здесь и далее показывают участки, отображенные с увеличением на части рисунка с соответствующим буквенным обозначением. Остальные пояснения см. в тексте.

Fig. 4. Water-deposited sulfur of the Upper Mendelev thermal springs. Conventional spectral mapping colors for images d, g, h (lower part), f, i: yellow, native sulfur; orange, iron sulfide; light gray, silicon dioxide; light blue, aluminosilicates (clay minerals); dark blue, silicates containing Fe, Mg, or Ca (particles of rock-forming minerals of volcanic rocks); red, titanium dioxide; dark gray to black, spectral shadows. The white rectangles with the letter designation here and below show the areas displayed with magnification on the part of the picture with the corresponding letter designation. See the text for explanations.

сталактитов показал, что в ней доминируют копьевидные или игольчатые скелетные кристаллы ромбической серы с размерами по вытянутой оси до 60 мкм (рис. 4 d, g). Дипирамиды (до 20 мкм) и призматические кристаллы имеют подчиненное значение. Отмечены также частицы опала и сульфидов железа. Частицы с поперечными размерами менее 1 мкм в осажденном материале отсутствуют.

Губчатый опал является основой серно-опаловых сталактитов (рис. 4 b, e, h). В качестве примеси содержит глинистые алюмосиликаты и редкие включения TiO_2 . Игольчатые кристаллы серы покрывают не только внешнюю, но и внутреннюю поверхность сталактитов. Тонкий слой серы на границе с губчатым опалом обогащен микрочастицами TiO_2 с размерами 1–2 мкм.

Глинистые алюмосиликаты доминируют в веществе грязевого котла (рис. 4 c, f, i). Вторым по распространенности является опал с размерами частиц до 100 мкм. Сера имеет подчиненное значение и представлена оплавленными частицами неправильной формы с размерами 3–20 мкм. Частицы сульфидов железа, диоксида титана и силикатных минералов вулканических пород также присутствуют, имеют аналогичные размеры, но меньшую распространенность по сравнению с серой.

Нижне-Менделеевские источники находятся на расстоянии 1.3 км на северо-восток от Верхне-Менделеевских, имеют хлоридно-сульфатный состав вод [13] и образуют две группы (по названию наиболее крупного источника): группа Поворотного источника (95–100 м н.у.м.) и группа Купального источника (84 м н.у.м.).

Группа Поворотного источника расположена в пойме Кислого ручья вдоль его берегов. Есть небольшие выходы газа на отмели в центре русла. Поворотный источник находится у левого берега ручья и имеет температуру 42 °С и $\text{pH} = 1.9$. Сера в его донных отложениях отсутствует. Легкий налет водно-осажденной серы обнаружен в пределах данной группы лишь в одном слабом, но наиболее высоко-

температурном (70 °С, $\text{pH} = 1.7$) термальном источнике у правого берега ручья. Здесь находится небольшая лужа термальной воды с отложениями серы (рис. 5 a). Из лужи вытекает небольшой ручеек, в котором шлейф водных отложений серы прослеживается на расстояние около 3 м. Газовых выходов нет, но запах сероводорода ощущается.

Опал доминирует в веществе донных отложений этого термального источника (рис. 5 d–f). Сера присутствует в меньшем, но сопоставимом с опалом количестве. Она представлена сравнительно крупными (до 0.25 мм) призматическими кристаллами и бипирамидами. Частицы серы с размерами менее микрона не обнаружены. Глинистые алюмосиликаты и фрагменты минералов вулканических пород присутствуют в донном осадке в подчиненном количестве.

Группа Купального источника расположена в 200 м от Поворотного источника на уступе левого берега Кислого ручья на высоте 1–1.5 м над урезом воды. Купальный источник (81 °С, $\text{pH} = 1.2$; рис. 5 b, c) – самый крупный из термальных источников Кислого ручья. Термальная вода вытекает из наклонной 30-сантиметровой трещины в скале у подошвы склона долины и бьет ключом из донных отложений, примыкающих к этой трещине.

В самом термальном источнике отложения серы отсутствуют (рис. 5 c), они появляются в 30–40 см от выхода воды, достигают максимума на расстоянии 6–8 м и полностью исчезают на расстоянии 13 м от выхода. Белые щеточки мелких кристаллов гипса образуются по кромке воды вдоль берегов и на выступающих из потока камнях.

Выходы газа отсутствуют, но термальная вода интенсивно парит. Сильный запах сероводорода в испарениях приурочен к отложениям водной серы и коррелирует с ее объемами. Воздушно-осажденной серы на камнях и растительности вокруг источника и на берегах термального потока не наблюдается.

Водно-осажденная сера Купального источника представлена кристаллическими агрегатами ромбической серы (рис. 5 g–i).

Среди наиболее крупных кристаллических агрегатов доминируют копьевидные скелетные кристаллы размером до 200 мкм (рис. 5 g). Основную массу кристаллических агрегатов среднего размера составляют бипирамиды, призматические кристаллы и копьевидные

скелетные кристаллы (рис. 5 h). В основном бипирамидальные формы и их срастания представляют наиболее мелкие частицы водно-осажденной серы (рис. 5 i). В ней также присутствует небольшое количество опала. Частиц менее микрона в осадке нет.

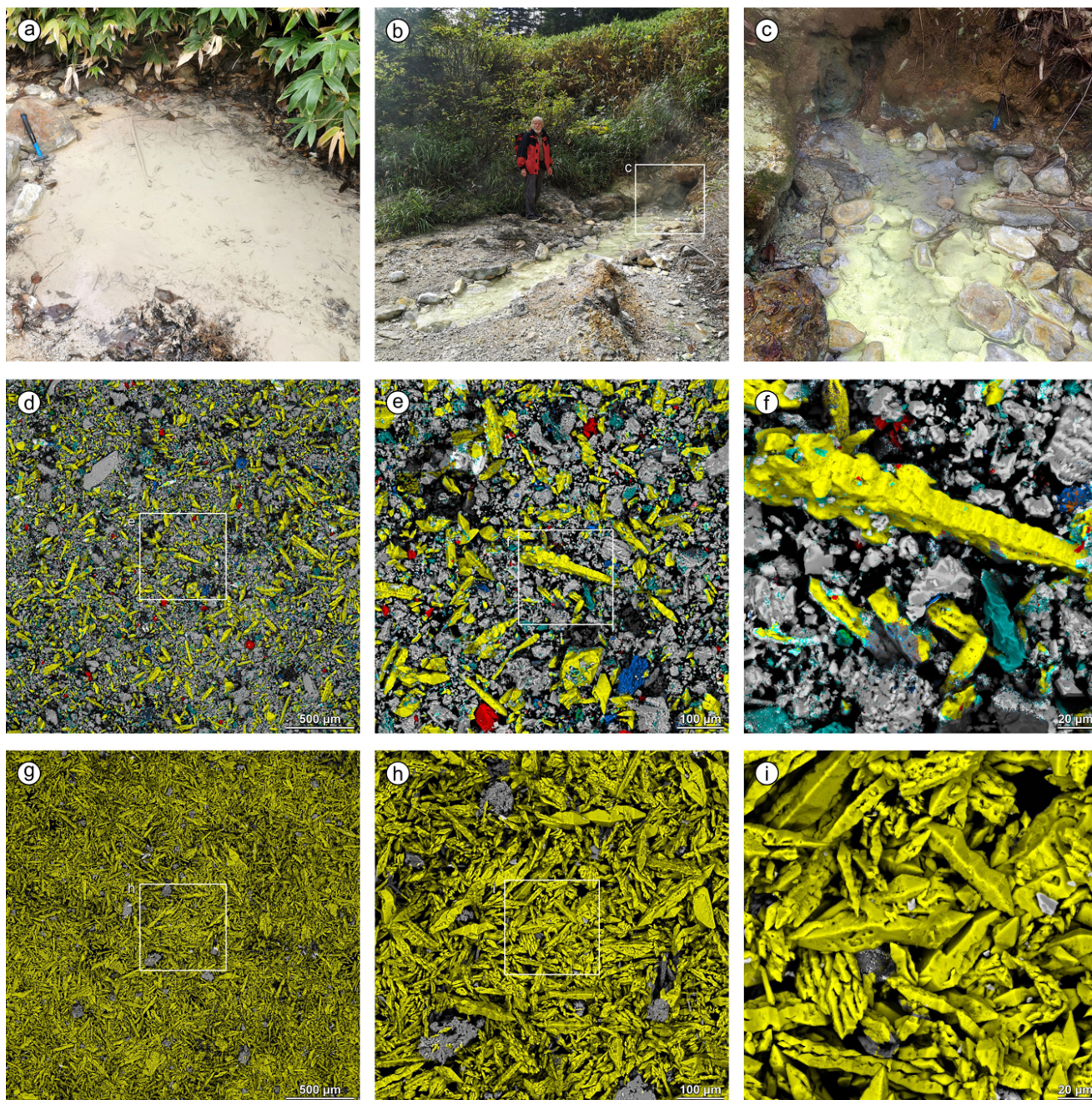


Рис. 5. Водно-осажденная сера Нижне-Менделеевских термальных источников. Условные цвета спектрального картирования для фотографий d–i: желтый – самородная сера; оранжевый – сульфид железа; светло-серый – диоксид кремния; голубой – алюмосиликаты (глинистые минералы); синий – силикаты, содержащие Fe, Mg или Ca (частицы породообразующих минералов вулканических пород); красный – титаномагнетит; от темно-серого до черного – спектральные тени. Пояснения приведены в тексте.

Fig. 5. Water-deposited sulfur of the Lower Mendeleev thermal springs. Conventional spectral mapping colors for images d–i: yellow, native sulfur; orange, iron sulfide; light gray, silicon dioxide; light blue, aluminosilicates (clay minerals); dark blue, silicates containing Fe, Mg, or Ca (particles of rock-forming minerals of volcanic rocks); red, titanomagnetite; dark gray to black, spectral shadows. See the text for explanations.

Водно-осажденная сера вулкана Головнина

Донные отложения озер в кальдере Головнина

Мы проанализировали ряд образцов донных отложений кальдерных озер дополнительно к предыдущим исследованиям [11]. Образец поверхностного слоя донных отложений Кипящего озера (рис. 1, точка 9; рис. 6 с, f, i, l) имеет опал-алунит-каолинитовый состав. Сера присутствует в незначительном количестве в виде фрагментов серных шариков и мелких частиц оплавленной формы. В малых количествах встречаются частицы сульфидов железа и цинка, а также диоксида титана. Как было показано ранее [11], состав мелководных донных отложений Кипящего озера формируется из каолинитовой пены, поступающей из донных гидротермальных выходов. Каолинитовая пена выносит на поверхность застывшие капли донного серного расплава – серные и серно-сульфидные шарики и их фрагменты.

Образцы донных отложений Горячего озера в точках 8 и 11 (рис. 1) показали полное отсутствие самородной серы. Они представлены мелкозернистым хорошо сортированным песком, состоящим из обломков минералов вулканических пород и опала. Частицы песка имеют размер 200–500 мкм и местами с поверхности покрыты глинистым минералом (каолинит) и гипсом. Отбор и материал донных отложений в точке 8 в качестве примера показаны на рис. 6 g, j.

Отдельные пятна донных гидротермальных выходов просматриваются в прозрачной воде до глубины около 2 м у Центрального Западного термального поля (рис. 1, IV). Они выделяются бирюзовым цветом воды и бело-желтым цветом донных отложений. В некоторых случаях гидротермальная вода слегка мутная из-за диспергированного каолинита. Бело-желтый осадок распространяется от донных гидротермальных выходов на расстояние не более 1.5–2 м. Множественные гидротермальные выходы формируют общий шлейф тонкого бело-желтого (в основном опалово-

го) осадка вдоль побережья у Центрального Западного термального поля (рис. 7). Отбор и состав материала этих отложений в точке 7 (рис. 1) показаны на рис. 6 b, e, h, k.

Максимальная толщина осадка в точке 7 не превышает 2–3 мм. Осадок легко образует водную взвесь при неосторожных движениях. Он представлен практически чистой мелкокристаллической самородной серой (рис. 6 e, h, k), аналогичной отложениям Кедрового ручья (рис. 2). Наиболее крупные скелетные кристаллы ромбической серы не превышают 20 мкм. Большое увеличение (рис. 6 k) показывает наличие среди кристаллических форм серы отдельных шариков размером 2–3 мкм, также обнаружен одиночный крупный серный шарик размером 50 мкм (рис. 6 e, в центре). Частицы размером менее микрона отсутствуют. Кроме серы в осадке имеется небольшое количество опала.

Многочисленные донные гидротермальные выходы присутствуют на мелководье у Черепяхового термального поля (рис. 1, V). Вода в небольшом заливе у термального поля мутная из-за диспергированного каолинита и имеет бирюзовый оттенок (рис. 8). Обильное выделение струй, состоящих из пузырьков газа, происходит со дна залива практически повсеместно. Температура воды в заливе 29–30 °С, тогда как обычная температура воды в озере 17 °С. Температура придонной воды у побережья на глубине 7 см местами скачкообразно меняется от 32 до 60 °С в связи с локальными выходами термальной воды. Температура возрастает до 97 °С при заглублении термометра в грунт еще на 7 см. Донный осадок представлен опалитовой гравийно-песчаной смесью в опал-каолинитовом тонкозернистом материале. Самородная сера практически отсутствует.

Высокотемпературные источники и грязевые котлы в кальдере Головнина

Термальные источники с температурой 95–97 °С обычны для Центрального Восточного, Центрального Западного и Черепяхового термальных полей. Водно-осажденная сера в их донных отложениях, как правило,

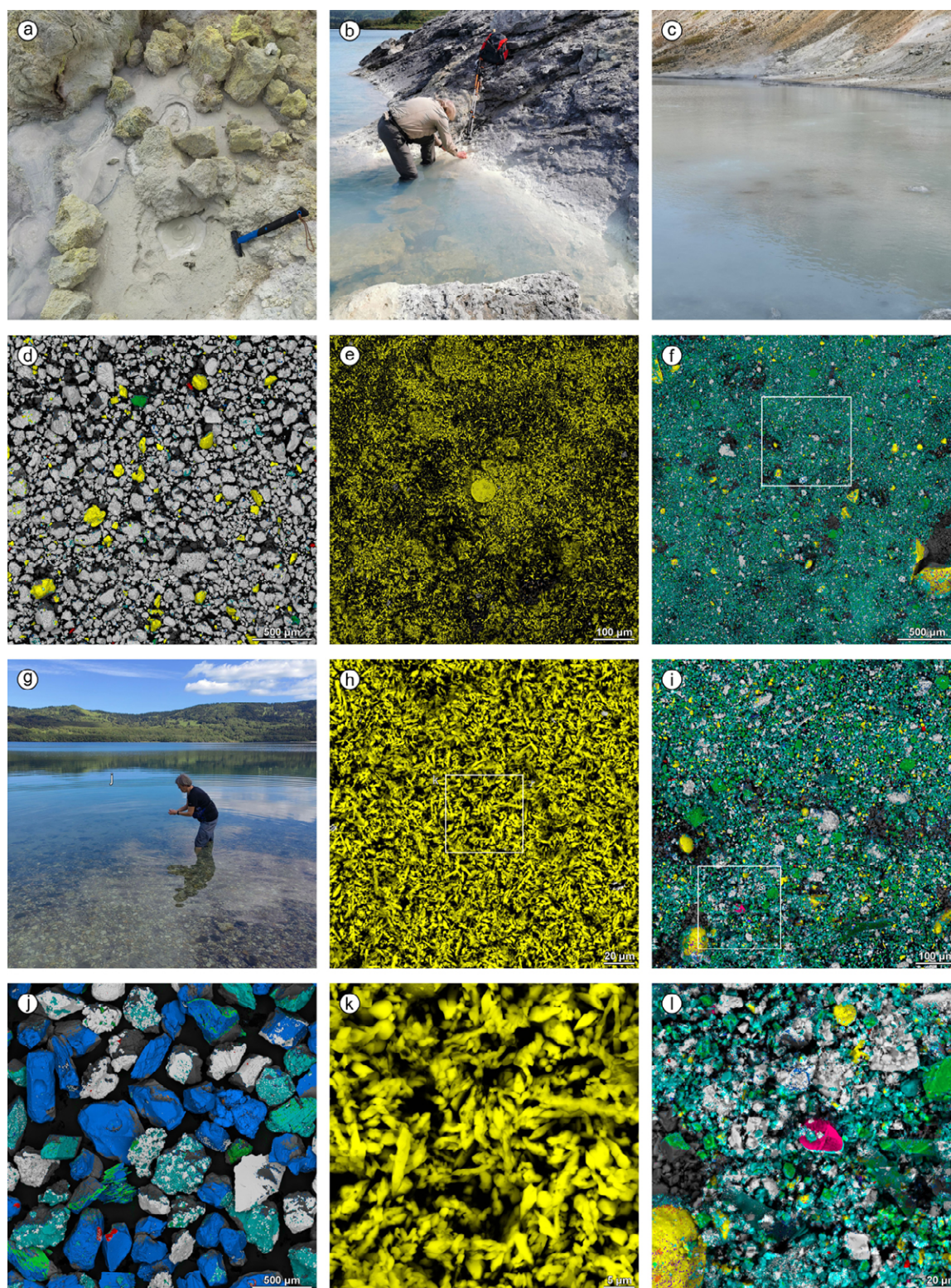


Рис. 6. Содержание серы в отложениях грязевого (силикагелевого) котла (а, d) и в донных отложениях озер кальдеры Головинина (остальные фотографии). Условные цвета спектрального картирования для фотографий d–f, h–l: желтый – самородная сера; оранжевый – сульфид железа; пурпурный – сульфид цинка; светло-серый – диоксид кремния; голубой – алюмосиликаты; синий – силикаты, содержащие Fe, Mg или Ca; красный – диоксид титана; зеленый – сульфаты; от темно-серого до черного – спектральные тени. Пояснения приведены в тексте.

Fig. 6. Sulfur in the sediments of the mud (silica gel) boiler (a, d) and in the bottom sediments of the lakes of Golovnin caldera (other photos). Conventional spectral mapping colors for images d–f, h–l: yellow, native sulfur; orange, iron sulfide; magenta, zinc sulfide; light gray, silicon dioxide; light blue, aluminosilicates; dark blue, silicates containing Fe, Mg, or Ca; red, titan dioxide; green, sulfates; dark gray to black, spectral shadows. See the text for explanations.

отсутствует. Некоторое количество самородной серы на общем фоне доминирующего опала появляется в осадке горячих водных потоков как результат водной эрозии фумарольных серно-опаловых холмов, через которые горячие ручьи текут к Горячему озеру (рис. 9).

Материал грязевых котлов Центрального Восточного термального поля (побережье Кипящего озера) состоит в основном из алуни-каолининовой смеси (рис. 17 в [19]). В незначительном количестве в ней присутствует чистая самородная сера, а также редкие зерна опала, диоксида титана и сульфида железа иногда с примесью сульфида мышьяка. Опал доминирует в небольших грязевых котлах Центрального Западного поля. Как пример, один из таких котлов (рис. 1, точка 6; рис. 6 а, d) имеет диаметр всего 20 см. Кипящая в нем бело-желтая грязь по консистенции напоминает густое молоко и имеет температуру 96 °С. Скорее всего, связующей массой этой грязи является обводненный силикагель. Силикагель полностью коагулирует и переходит в опал после высыхания (рис. 6 d). Оплавленные кусочки серы имеют второстепенное значение. Алуни-каолинит присутствуют в незначительных количествах.

Низкотемпературные источники в кальдере Головнина

В кальдере Головнина есть ряд наземных термальных источников и просачиваний с водно-осажденной серой. Объемы водно-осажденной серы в них крайне малы. Как правило, кристаллические формы водно-осажденной серы здесь срастаются в тонкие корочки (рис. 10).

Малодебитный источник на восточном берегу Кипящего озера (рис. 1, точка 10; рис. 10 а, d, g, j) имеет максимальную температуру отдельных струй 63 °С. Источник покрыт тонкими корочками (1–2 мм) желто-коричневых отложений, образующих пятно неправильной формы размером около 1.5 м. Температура воды в точке отбора пробы 31 °С. Водно-осажденная сера входит в состав этих корочек в виде ажурных срастаний кристаллической серы. Частицы серы размером

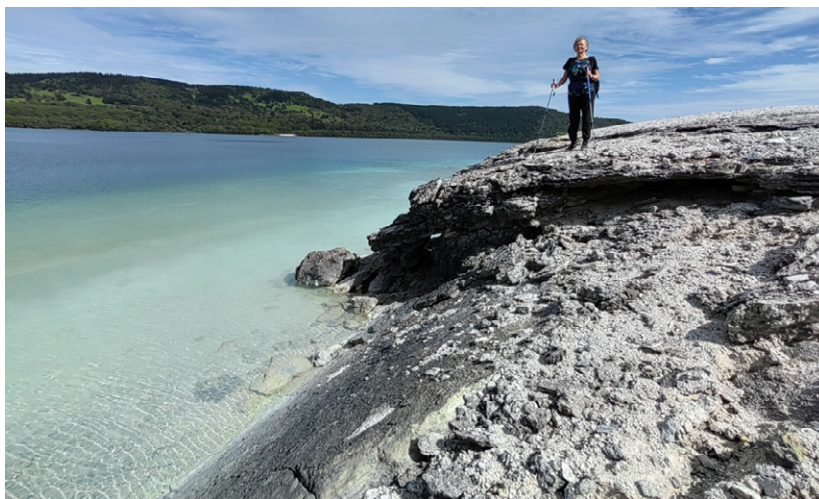


Рис. 7. Шлейф тонкого бело-желтого осадка вдоль побережья Горячего озера у Центрального Западного термального поля.

Fig. 7. A plume of thin white-yellow sediment along the coast of Goryachee Lake near the Central West thermal field.



Рис. 8. Гидротермальные выходы на мелководье вблизи Черепяхового термального поля.

Fig. 8. Hydrothermal vents in shallow water near the Cherepakhovoe thermal field.

менее микрона отсутствуют. Верхняя поверхность серы покрыта мелкими кристаллами и волокнистыми агрегатами сульфата кальция (гипс).

Есть два малодобитных источника на Черепашовом термальном поле (рис. 1, точка 12). Шлейфы водно-осажденной серы распространяются на расстояние 12–13 м по небольшим ручейкам, вытекающим из них (рис. 10 б). Температура воды на участках наибольшего распространения осажденной серы в одном ручье составляет 26 °С, в другом – 23 °С (при температуре воздуха 19 °С). Сера образует тонкие корочки (1–2 мм и менее) светло-желтого цвета. Самородная сера доминирует в составе корочек (рис. 10 е, h, k) в виде сросшихся кристаллических агрегатов (дипирамиды, призматические кристаллы, копьевидные скелетные кристаллы). В составе корочек также присутствует незначительное количество опала, сульфатов алюминия, сульфидов железа и частичек минералов вулканических пород.

Небольшое просачивание термальной воды с температурой 30 °С находится между двумя ручьями с водно-осажденной серой. Пятно слоистого водно-осажденного материала диаметром около 70 см окружает этот термальный источник (рис. 10 с). Срастание копьевидных скелетных кристаллов самородной серы составляет внутреннюю основу этих корочек (рис. 10 f, j, l). Поверхность корочек покрыта сплошным покровом войлочного сульфата алюминия, в котором присутствуют частички опала, алюмосиликатов, сульфидов железа и диоксида титана.

Отложения Алехинских источников

Алехинские термальные источники расположены к северу от кальдеры Головнина на внешнем склоне вулкана на побережье Охотского моря. Мы обследовали два наиболее крупных термальных источника – Орлиный и Завальный (рис. 11).



Рис. 9. Переотложение серы и опала в процессе эрозии потоком горячей воды fumarольных серно-опаловых холмов Центрального Западного термального поля.

Fig. 9. Redeposition of sulfur and opal during erosion by a stream of hot water of fumarolic sulfur-opal hills on the Central West thermal field.

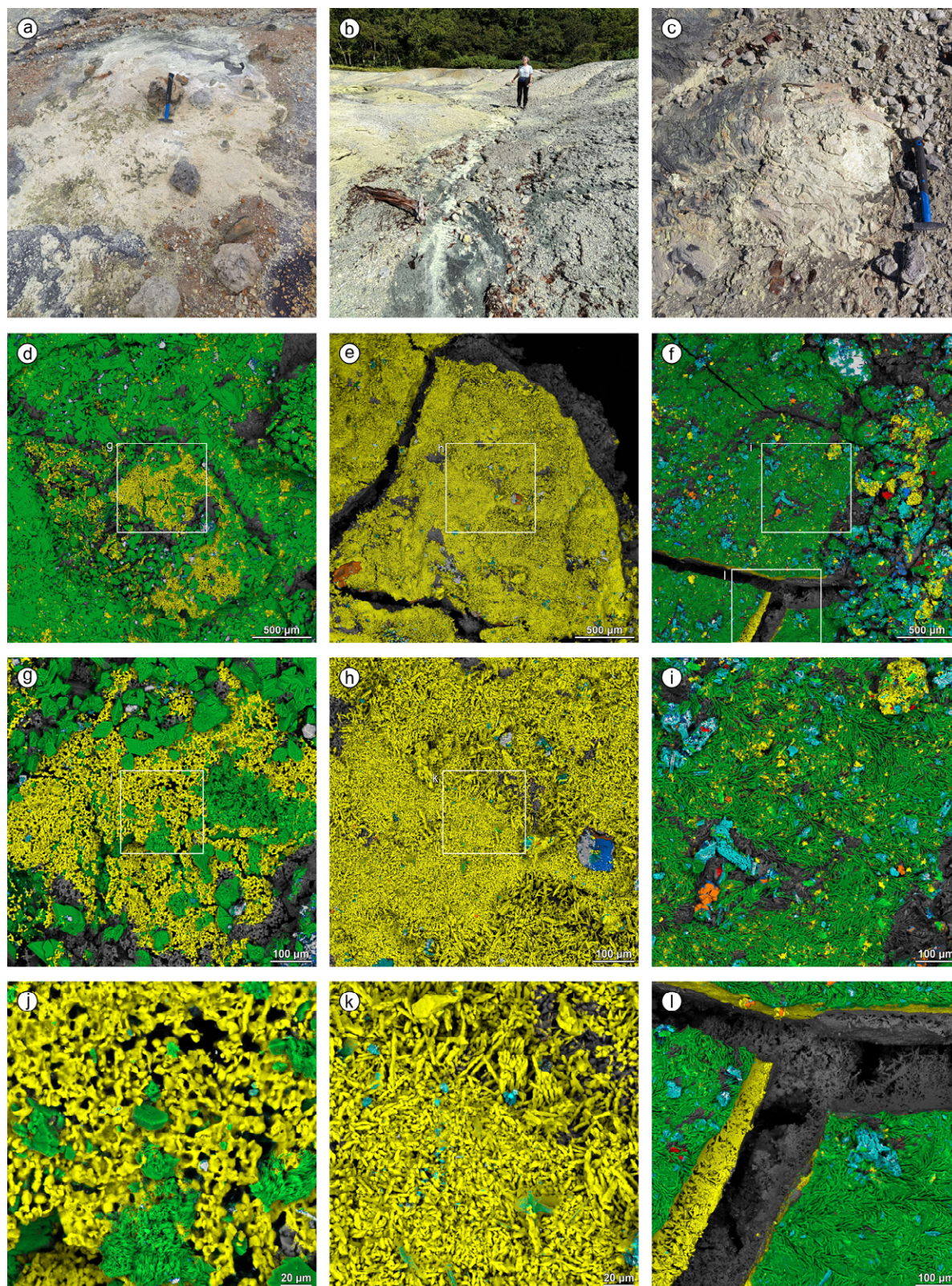


Рис. 10. Водно-осажденная сера из низкотемпературных источников в кальдере Головнина. Условные цвета спектрального картирования для фотографий d–l: желтый – самородная сера; оранжевый – сульфид железа; светло-серый – диоксид кремния; голубой – алюмосиликаты; синий – силикаты, содержащие Fe, Mg или Ca; красный – диоксид титана; зеленый – сульфаты; от темно-серого до черного – спектральные тени. Пояснения приведены в тексте.

Fig. 10. Water-deposited sulfur from low-temperature springs in Golovnin caldera. Conventional spectral mapping colors for images d–l: yellow, native sulfur; orange, iron sulfide; light gray, silicon dioxide; light blue, aluminosilicates; dark blue, silicates containing Fe, Mg, or Ca; red, titan dioxide; green, sulfates; dark gray to black, spectral shadows. See the text for explanations.

Орлиный источник (рис. 1, точка 14) состоит из двух участков – верхнего (рис. 11 а, б) и нижнего (рис. 11 д, е). Верхний участок находится на расстоянии примерно 350 м от береговой линии на высоте 23 м н.у.м. в основании скалы берегового обрыва. Здесь находятся два выхода термальной воды. Первый (рис. 11 а) расположен в верти-

кальной трещине шириной 10–15 см, второй (рис. 11 б) – в трех метрах левее и на 1.5 м ниже первого. Он представляет собой небольшой грот высотой до 0.5 м и шириной 1.2 м, из которого вытекает поток термальной воды шириной около 30 см. Термальная вода в обоих источниках имеет одинаковую температуру 53–54 °С и pH = 3.5.

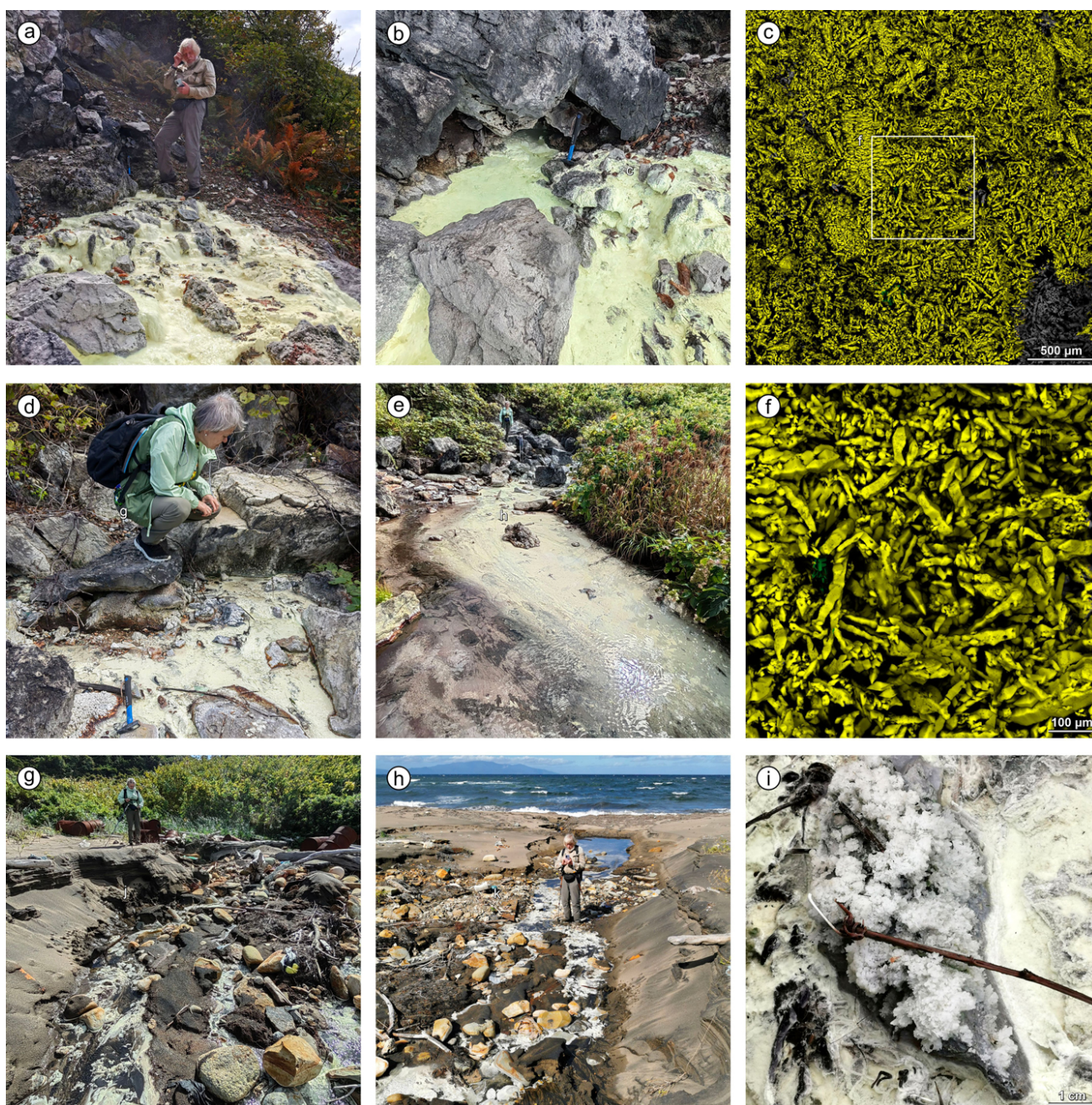


Рис. 11. Водно-осажденная сера Алехинских термальных источников. Условные цвета спектрального картирования для фотографий с и f: желтый – самородная сера; зеленый – сульфат кальция; от темно-серого до черного – спектральные тени. Пояснения приведены в тексте.

Fig. 11. Water-deposited sulfur of the Alyokhinskie thermal springs. Conventional spectral mapping colors for images c and f: yellow, native sulfur; green, calcium sulfate; dark gray to black, spectral shadows. See the text for explanations.

Выходы газа в обоих источниках и окружающих породах не обнаружены. Водные отложения серы отсутствуют в трещине первого источника и уменьшаются вглубь грота второго источника. Объем водно-осажденной серы максимален на расстоянии 3–4 м от источников термальной воды. Полоса отложений серы здесь достигает ширины около 2 м при толщине 2–3 см на поверхности каменных обломков и 10–12 см между ними. Толщина отложений серы уменьшается далее по течению потока. Водные отложения серы полностью исчезают на расстоянии около 14 м от выхода термальных вод. Еще через 20 м чистая вода верхнего участка сливается с отлагающей серу термальной водой нижнего участка Орлиного источника. На рис. 11 е прозрачная и не имеющая серного осадка вода верхнего участка в левом нижнем углу фото, вода нижнего участка с осажденной серой – справа и в центре.

Исток нижнего участка расположен на высоте 15 м н.у.м. и имеет три выхода термальной воды (рис. 11 d). Вода более слабого правого выхода имеет температуру 48 °С, центрального и левого – 52 °С, pH = 3.0–3.1. Газовые выходы отсутствуют. Толщина отложений серы минимальна у истоков термальной воды, достигает максимума в 3–5 мм на расстоянии 3–4 м от истоков и далее постепенно уменьшается. В итоге водно-осажденная сера полностью исчезает на расстоянии примерно 14 м от выходов термальной воды.

Испарения горячей воды на обоих участках имеют запах сероводорода. Интенсивность запаха коррелирует с объемом водно-осажденной серы. Влажная поверхность выступающих из воды обломков вблизи отложений серы обильно покрыта мелкокристаллическим гипсом (рис. 11 i). Опубликованные данные [20, рис. 132, 133] свидетельствуют, что объем и положение водно-осажденной серы здесь остаются неизменными более двух десятилетий.

Источник Завальный (рис. 1, точка 13) расположен на высоте 6 м н.у.м. в 100 м за-

паднее Орлиного источника на расстоянии нескольких десятков метров от береговой линии, практически в полосе прибоя (рис. 11 g, h). Источник имеет несколько рассредоточенных слабых выходов термальных вод с максимальной температурой 42 °С и pH = 3.2–3.4. Толщина отложений серы не превышает 1–2 мм, а их общая протяженность около 15 м.

Еще две группы источников находятся на расстоянии 1.2 и 3 км на юго-запад от Орлиного источника. Все источники находятся в полосе прибоя и сильно замусорены. Водно-осажденная сера присутствует в отложениях первой группы источников, но менее распространена даже по сравнению с отложениями серы Завального источника. Несколько выходов второй группы источников выбрасывают кипящую воду на берег моря [13]. Водно-осажденная сера в них практически отсутствует.

Водно-осажденная сера верхнего участка Орлиного источника микроскопически (рис. 11 с, f) представлена наиболее крупными кристаллическими агрегатами по сравнению со всеми ранее рассмотренными образцами. Копьевидные скелетные кристаллы, вытянутые срастания бипирамид и призматические кристаллы нередко достигают в длину 300 мкм и субпараллельно группируются в плотные пакеты (рис. 11 с). Частицы серы менее микрона отсутствуют. Кроме серы в осадке отмечено незначительное количество мелких частиц гипса. Отложения серы нижнего участка Орлиного источника и Завального источника аналогичны отложениям серы в верховьях Кедрового ручья.

Обсуждение

Обобщение наблюдений

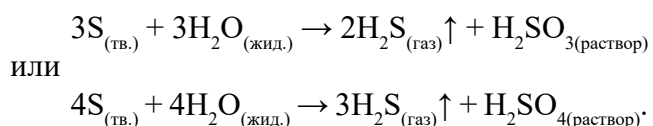
Размер частиц водно-осажденной серы во всех рассмотренных случаях находится в диапазоне от 1 до 300 мкм. Частицы серы размером менее микрона отсутствуют. Согласно определению IUPAC*, термин «коллоидный»

* 'Colloidal' in IUPAC Compendium of Chemical Terminology. 5th ed. International Union of Pure and Applied Chemistry, 2025. Online version 5.0.0, 2025. <https://doi.org/10.1351/goldbook.C01172> (accessed 24 August 2025).

относится к дисперсным системам, в которых частицы, диспергированные в среде, имеют по крайней мере в одном направлении размер примерно от 1 нм до 1 мкм. Отсюда следует, что коллоидная сера не участвует в формировании осадка водной серы напрямую. Осаждение коллоидных частиц серы на 1 см в спокойной воде требует часов, дней или месяцев в зависимости от размера частиц. Это делает осаждение коллоидной серы невозможным в условиях турбулентного течения в водных потоках и конвективного перемешивания воды в термальных водоемах. Тем не менее очевидно, что молекулярные агрегаты серы коллоидного или меньшего (субколлоидного) размера принимают активное участие как в образовании, так и в разрушении водно-осажденной серы.

Водно-осажденная сера представлена преимущественно кристаллической ромбической серой. Серные шарики, формировавшиеся из капель расплавленной серы под воздействием поверхностного натяжения, крайне редки. Широкое распространение копьевидных скелетных кристаллов свидетельствует о кристаллизации в условиях больших пресыщений, когда преобладает скорость роста индивидов вдоль оси С. В то же время объем и положение водно-осажденной серы у стабильных термальных источников остаются неизменными в течение всего периода исторических наблюдений. Накопления водно-осажденной серы не наблюдается. Следовательно, одновременно с кристаллизацией серы происходит ее разрушение. Баланс кристаллизации и разрушения определяет стабильность объема и профиля отложений серы.

Механическое разрушение растущих кристаллов серы происходит под воздействием турбулентного потока термальной воды. Химическое разрушение осажденной серы возможно в результате реакции диспропорционирования серы под воздействием термальной воды:



Направленность этих реакций определяется возможностью ухода сероводорода из реакционной зоны.

Сильное турбулентное течение на выходе из наземных термальных источников препятствует отложению серы. Поэтому водно-осажденная сера здесь отсутствует или толщина ее отложений минимальна. Выход потока на открытое пространство и снижение его турбулентности вызывает активную кристаллизацию и осаждение серы. В свою очередь высокая концентрация серы обуславливает ее интенсивное химическое разрушение с выделением сероводорода. Пик концентрации осажденной серы и ее химического разрушения обычно находится в термальных ручьях на расстоянии 3–4 м от истока. Если судить по запаху, то выделение сероводорода здесь максимально. Далее концентрация серы и интенсивность ее разрушения снижаются. Осадок серы полностью исчезает на расстоянии менее 15 м от термального источника. Концентрация коллоидной серы здесь становится недостаточной для кристаллизации. Фоновый сероводородный запах термальной воды далее обеспечивается постепенным диспропорционированием остаточной коллоидной серы в водном потоке. В мелководных термальных источниках на побережье Горячего озера у Центрального Западного термального поля ситуация отличается лишь отсутствием направленного движения придонной термальной воды. Поэтому отложения серы обычно формируют круговые пятна радиусом 1.5–2 м вокруг одиночных выходов термальных вод.

Возможность образования водно-осажденной серы за счет окисления сероводорода атмосферным кислородом, как это предполагалось ранее (см., например, [6–10]), можно исключить. Во-первых, в большинстве рассмотренных случаев какие бы то ни было газовые выходы в термальных источниках и окружающих породах отсутствуют. Во-вторых, источником запаха сероводорода является сама водно-осажденная сера, и этот запах сохраняется длительное время уже после отбора образцов. В-третьих, интенсивное выделение сероводорода в атмосферу осажденной серой создает,

казалось бы, идеальные условия для окисления сероводорода и образования воздушно-осажденной серы за пределами термальных водотоков. В реальности это не наблюдается, что свидетельствует о незначительной роли атмосферного окисления сероводорода в образовании серы во всех рассмотренных случаях.

Теоретические аспекты

Образование коллоидной серы при конденсации газообразной серы так же естественно, как и образование тумана при конденсации воды. Поэтому анализ условий конденсации воды и серы позволяет лучше понять и детализировать процесс образования водно-осажденной серы. Большое значение также имеет различие в молекулярно-химических свойствах твердой и расплавленной серы. *TP*-область конденсации воды частично накладывается на *TP*-область конденсации серы (рис. 12). Температура плавления–отвердевания серы делит *TP*-области еще на две части. В результате возникают 4 варианта, различающиеся условиями образования и последующим поведением коллоидной (и субколлоидной) серы.

Первый вариант. Конденсация серы в *TP*-области I (рис. 12) происходит с образованием коллоидной серы в виде аэрозоля жидкой серы в эндогенных газовых потоках. Низкотемпературный расплав серы химически малоактивен, но склонен к полимеризации и обладает высокими адгезией и когезией из-за наличия разомкнутых молекулярных цепочек

со свободными связями по краям. Поэтому образующийся аэрозоль серы теряет дисперсность, так как поглощается уже существующим серным расплавом или формирует новые его концентрации.

Второй вариант. Конденсация серы в *TP*-области II (рис. 12) происходит с образованием коллоидной серы в виде эмульсии жидкой серы в воде гидротермальных потоков. Ситуация аналогична предыдущему варианту в ограниченном пространстве вмещающих пород: эмульсия теряет дисперсность и формирует расплав самородной серы; пластичность, высокие адгезия и когезия препятствуют

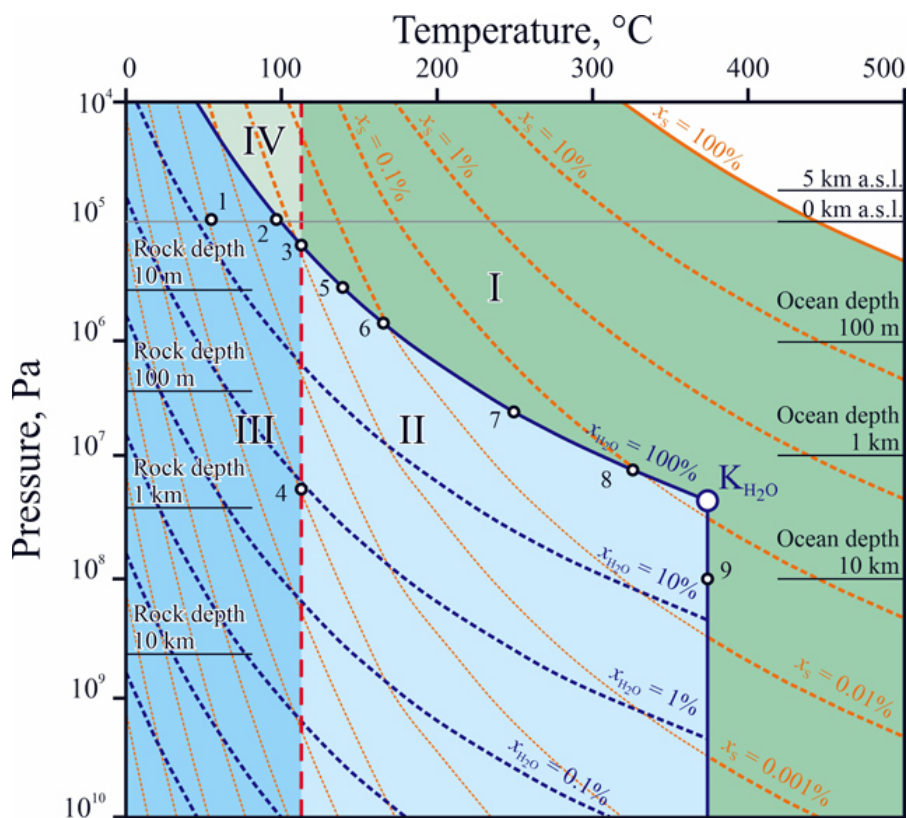


Рис. 12. *TP*-диаграмма конденсации серы и воды. Вертикальная красная штриховая линия соответствует температуре плавления–затвердевания серы. Глубина горной породы и глубина океана являются эквивалентами литостатического и гидростатического давления с учетом атмосферного давления. K_{H_2O} – положение критической точки воды. x_s и x_{H_2O} – относительные парциальные давления (%) насыщенных паров элементарной серы и воды соответственно. I–IV – *TP*-области, различающиеся условиями образования и последующим поведением коллоидной серы. 1–9 – расчетные точки (пояснения приведены в тексте).

Fig. 12. *TP* diagram of condensation of sulfur and water. The vertical red dotted line corresponds to the melting–solidification temperature of sulfur. Rock depth and ocean depth are the lithostatic and hydrostatic pressure equivalent, taking into account atmospheric pressure. 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–IV, *TP* areas, differing in the conditions of formation and subsequent behavior of colloidal sulfur. 1–9, calculation points (explanations are given in the text).

механическому разрушению расплава в турбулентных потоках; реакции диспропорционирования серы блокируются из-за невозможности удаления сероводорода из реакционной зоны. Ситуация меняется при выходе гидротермального потока в открытое водное пространство (гидротермальные выходы на дне озер, морей и океанов). Во-первых, реакции диспропорционирования становятся вероятны, так как сероводород получает возможность покинуть реакционную зону. Во-вторых, постепенное рассеивание образующейся эмульсии серного конденсата затрудняет образование серного расплава. В-третьих, капли серного расплава, образующиеся при когезии эмульсионных частиц, оседают на дно водного бассейна под воздействием гравитации.

Третий вариант. Конденсация серы в *TP*-области III (рис. 12) приводит к образованию коллоидной серы в виде суспензии твердой серы в гидротермальных потоках. Поведение твердой коллоидной серы существенно отличается от поведения ее жидкой эмульсии из-за различия в молекулярной структуре.

Молекулярная структура твердой серы представлена замкнутыми 8-атомными молекулами серы [21]. Наиболее устойчивая ромбическая форма октосеры имеет коронообразную форму с расстоянием 0.466 нм между наиболее удаленными атомами. Угол между двумя S–S связями каждого атома составляет 105°. Это определяет коронообразный вид молекулы – расположение смежных атомов в двух плоскостях по 4 атома в каждой. Расстояние между плоскостями (высота короны) составляет 0.099 нм.

При таких размерах одиночной молекулы кластер из примерно 100 молекул достигает нижней границы коллоидной частицы согласно существующему определению IUPAC. Однако в контексте данной работы нижняя граница размера коллоидной частицы значения не имеет. Все описываемые процессы и явления применимы к молекулярным кластерам меньшего размера, т.е. к субколлоидным частицам.

Межмолекулярное электростатическое взаимодействие (кристаллическая связь) моле-

кул серы в твердом состоянии наиболее устойчиво при их стыковке плоскостями корон, когда сразу 4 атома одной молекулы взаимодействуют с 4 атомами другой. Отсутствие разомкнутых молекулярных цепочек полностью исключает возможность полимеризации, снижает адгезию и когезию серы до пренебрежимо малых значений. Сера теряет пластичность и становится хрупкой.

При конденсации серы в ограниченном пространстве вмещающих пород сильное турбулентное течение гидротермального потока препятствует кристаллизации коллоидной суспензии; реакция диспропорционирования блокируется отсутствием возможности удаления сероводорода из реакционной зоны. Конденсация серы в этих условиях ведет к накоплению коллоидных частиц без их кристаллизации и осаждения.

Кристаллизация серы из коллоидной дисперсии с одновременным ее разрушением начинается при выходе гидротермального потока в открытое пространство (термальные источники, гидротермальные выходы на дне водоемов). Профиль формирующегося осадка кристаллической серы определяется балансом ее накопления и разрушения. Относительная устойчивость кристаллических межмолекулярных связей при стыковке коронообразных молекул серы друг с другом плоскостями корон обеспечивает преимущественный рост кристаллов в направлении оси *C* и, соответственно, игольчатую и копьевидную форму кристаллов.

Четвертый вариант. Конденсация серы в *TP*-области IV (рис. 12) приводит к образованию коллоидной серы в виде аэрозоля твердой серы в газовых потоках. Особенности образования и поведения серы аналогичны предыдущему варианту и отличаются от него только газовой дисперсионной средой. В частности, именно аэрозоль твердой серы, образующийся в *TP*-области IV, приводит к росту игольчатых кристаллов вокруг газовых выходов на фумарольных полях.

Все наши полевые наблюдения за отложениями серы в воде проводились на высотах

0–400 м над уровнем моря (давление 0.096–0.101 МПа) при температуре термальных источников от 23 до 81 °С. Например, *ТР*-условия термального источника Орлиный (54 °С, 0.101 МПа; рис. 12, пункт 1) соответствуют парциальному давлению насыщенных паров серы $x_s = 1.06 \cdot 10^{-5} \%$. Температура кипения–конденсации воды при атмосферном давлении (рис. 12, пункт 2) соответствует $x_s = 6.95 \cdot 10^{-4} \%$. Как было показано ранее в работе [11], магмы среднекислотного состава, характерные для последних извержений вулканов Головнина и Менделеева, способны генерировать потоки флюидов с соотношением S/H_2O до 0.03. Среднее число атомов в молекулах паров серы изменяется незначительно ($N_s = 7.7–6.97$) в диапазоне температур 100–374 °С. Следовательно, линия начала конденсации серы практически совпадает с изолинией относительного парциального давления серы $x_s \approx 0.25 \%$ ($x_s = 0.236 \%$ при 100 °С, $x_s = 0.260 \%$ при 374 °С). Это позволяет нам в первом приближении оценить массовую долю конденсата серы m_s между произвольными точками на *ТР*-диаграмме по изменению относительного парциального давления серы. В частности, примерно 0.3 мас.% от общего конденсатного потенциала ($x_{s(\text{общий})} = 0.25$) серы конденсируется при остывании гидротермального потока из точки 2 ($x_{s(2)} = 6.95 \cdot 10^{-4} \%$) в точку 1 ($x_{s(1)} = 1.06 \cdot 10^{-5} \%$): $m_{s(2 \rightarrow 1)} \approx (x_{s(2)} - x_{s(1)})/x_{s(\text{total})} = 0.00274$.

Серa не осаждается в кипящих источниках (рис. 12, точка 2). Водная суспензия серы на границе *ТР*-области III еще не сформировалась, а аэрозоль твердой серы из *ТР*-области IV проходит сквозь кипящую воду и участвует в образовании кристаллов воздушно осажденной серы, как это часто наблюдается в кипящих источниках кальдеры Головнина и вулкана Менделеева (рис. 3). Диспропорционирование коллоидной и остаточной газообразной серы в открытых термальных потоках делает невозможными накопление коллоидной дисперсии и появление водно-осажденной серы в ручьях, вытекающих из кипящих источников.

Напротив, постепенное охлаждение теплового потока в закрытых термальных водотоках приводит к накоплению коллоидной суспензии

и началу кристаллизации водно-осажденной серы, когда термальная вода достигнет поверхности и турбулентность уменьшится. Накопление коллоидной суспензии максимально, если термальный водный поток уходит из *ТР*-области существования серного расплава в малоглубинных условиях (рис. 12, точка 3) по закрытым водотокам: $m_{s(3 \rightarrow 1)} \approx 0.0046$. Накопление коллоидной суспензии в закрытых термальных водотоках уменьшается с увеличением глубины выхода термального водного потока из *ТР*-области II и на определенной глубине полностью прекращается. В частности, в точке 4 (рис. 12; вероятная глубина точки 4 по литостатическому эквиваленту давления 620 м) $x_{s(4)} = x_{s(1)}$ и, соответственно, $m_{s(4 \rightarrow 1)} = 0$. Значительная глубина питания многих термальных источников обуславливает отсутствие водно-осажденной серы при их излиянии на поверхность.

Образование водно-осажденной серы в подводных гидротермальных выходах отличается от наземных гидротермальных источников. Существование кристаллической водно-осажденной серы возможно только на мелководье (рис. 6 б). На глубинах более 5 м появляются условия для образования донного серного расплава.

Серный расплав образуется в донных кратерных воронках в озерах кальдеры Головнина в результате охлаждающего воздействия озерных вод на высокотемпературные флюидные потоки [11]. Давление водного столба определяет парциальное давление насыщенных паров серы в условиях начала конденсации воды: $x_{s(5)} = 3.90 \cdot 10^{-3} \%$ в гидротермальных выходах на глубине 25 м в кратерной воронке Кипящего озера (рис. 12, точка 5), $x_{s(6)} = 9.28 \cdot 10^{-3} \%$ на глубине 62 м в кратерных воронках Горячего озера (рис. 12, точка 6).

Как было показано ранее в [11], в образовании донного расплава серы в озерах Кипящее и Горячее участвуют 98.5 и 96 % исходного потенциального содержания серы соответственно. Однако часть газообразной серы (1.5 и 4 %) выносится в водную среду. Охлаждаясь, эта часть серы образует коллоидный конденсат сначала в виде эмульсии,

а затем в виде коллоидной суспензии. Частицы серной эмульсии, которые успевают сгруппироваться в капли серного расплава до перехода в состояние суспензии, осаждаются на дно озера. Здесь они либо объединяются с расплавом в донных кратерах, либо осаждаются как застывшие серные шарики за пределами донных гидротермальных выходов.

Коллоидная суспензия твердой серы не участвует в образовании озерных осадков из-за конвекции. Рассеивание, механическое и химическое разрушение препятствуют участию коллоидной суспензии серы в кристаллизации. В итоге эта часть серы расходуется в реакциях диспропорционирования с выделением сероводорода и образованием сульфатов.

Вынос газообразной серы в водную среду возрастает с глубиной. Расчеты показывают, что $x_{S(7)} = 4.32 \cdot 10^{-2} \%$ на глубине 415 м (рис. 12, точка 7) в небольшой (~20 м × 14 м) депрессии на СЗ склоне подводного вулкана Дайкоку [22]. Здесь находится небольшой бассейн расплавленной серы. Газообразная сера охлаждается в гидротермальном шлейфе и образует коллоидную эмульсию жидкой серы. Частицы эмульсии активно участвуют в образовании капель серного расплава, которые оседают на дно. Как результат, «бросается в глаза обрамление, образованное богатой серой коркой, покрытой слоем многочисленных шариков серы, представляющих собой осажденные "лапиллы" из богатых серой выбросов» [22, с. 265].

Металлоносный расплав серы обнаружен на глубине 1700 м в кальдере на северо-востоке Lay Basin, расположенной в юго-западной части Тихого океана [23]. Величина $x_{S(8)}$ здесь возрастает до 0.118 % (рис. 12, точка 8). Парциальное давление насыщенных паров серы, поступающих в водную среду, увеличивается до максимума $x_{S(K)} = 0.140 \%$ на глубине 2245 м, где гидростатическое давление достигает уровня критического давления воды $2.212 \cdot 10^7$ Па (рис. 12, точка K_{H_2O}).

В этих условиях в водную среду поступает более половины от общего серного потенциала среднекислых магм (56 %). Однако среди вулканических пород дна океана доминируют базальты.

Общий серный потенциал основных магм соответствует соотношению $S/H_2O = 0.12-0.14$ [2], что выше потенциала среднекислых магм. Это детерминирует начало конденсации серы парциальным давлением насыщенных паров: $x_{S(total)} = 1 \%$ (0.925 % при 100 °С, 1.022 % при 374 °С). Поэтому конденсация серы в придонных горных породах по-прежнему доминирует из-за более высокого общего серного потенциала мафических магм. Лишь меньшая часть общего потенциала газообразной серы выносятся в водную среду ($m_S = x_{S(K)}/x_{S(total)} = 14 \%$). Тем не менее это количество экстремально высоко и обеспечивает появление феномена гидротермальных черных и белых курильщиков в диапазоне глубин 2–4 км [24]. Образование коллоидной эмульсии при охлаждении гидротермальных шлейфов приводит здесь не только к образованию капель серного расплава, а также сульфатов («белые курильщики»), но и к образованию сульфидного коллоида вследствие сульфидизации серной эмульсии («черные курильщики»).

Вынос газообразной серы в водную среду постепенно снижается ниже «критической» глубины 2245 м. Парциальное давление насыщенных паров серы на глубине Марианской впадины составляет лишь $x_{S(9)} = 0.028 \%$ (рис. 12, точка 9), что примерно в пять раз меньше выноса газообразной серы на «критической» глубине.

Заключение

Коллоидная суспензия серы имеет эндогенное (конденсатное) происхождение и не осаждается в турбулентных и конвективных водных потоках, постепенно разрушаясь в реакциях диспропорционирования серы. Водные отложения мелкокристаллической серы возникают в специфических условиях пресыщенной концентрации серной суспензии и являются таким же локальным явлением, как и образование игольчатой кристаллической серы вокруг газовых выходов на наземных термальных полях. Выполненные полевые, лабораторные

и теоретические исследования с учетом ранее полученных результатов [11] не подтверждают экзогенное происхождение серы вулканических озер в результате взаимодействия вулканических газов друг с другом и с атмосферным кислородом в водной среде.

Хотя эти результаты получены на основании изучения водно-осажденной серы лишь двух вулканов о. Кунашир, выполненный в работе теоретический анализ позволяет распространить их на все вулканические объекты и дополнить следующими выводами: 1) образование мелкокристаллической водно-осажденной серы ограничено мелководными условиями, условия для образования донного серного расплава появляются на глубинах более 5 м; 2) вынос серы в водную среду возрастает с глубиной и достигает максимума на «критической» глубине 2245 м, что обеспечивает феномен «черных и белых курильщиков», а затем снова снижается; 3) в глубоководных условиях сера осаждается в виде капель серного расплава или участвует в образовании сульфидов и сульфатов в «дымах курильщиков».

Итоговым является заключение, что сера гидротермальных источников на поверхности, на дне вулканических озер, морей и океанов имеет исключительно эндогенное (конденсатное) происхождение.

Список литературы

- MacDonald G.A. **1972**. *Volcanoes: A discussion of volcanoes, volcanic products, and volcanic phenomena*. New Jersey: Prentice-Hall, 510 p.
- Malyshev A., Malysheva L. **2022**. Sulfur in ore formation. *Ore Geology Reviews*, 150(105199), 21 p. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105199>
- Власов Г.М. (ред.) **1971**. *Вулканические серные месторождения и некоторые проблемы гидротермального рудообразования*. М.: Наука, 360 с.
- Виноградов В.И. **1980**. *Роль осадочного цикла в геохимии изотопов серы*. М.: Наука, 192 с.
- Аверьянов И.П. **1981**. *Баланс серы в поствулканическом процессе и проблемы промышленного сероаккумуляции*. М.: Наука, 179 с.
- Набоко С.И. **1958**. Об образовании озерной серы на вулкане Головнина. *Бюллетень вулканологических станций*, 27: 43–50.
- Набоко С.И. **1959**. *Вулканические эксгаляции и продукты их реакций*. М.: Изд-во АН СССР, 303 с. (Труды Лаборатории вулканологии АН СССР; 16).
- Varekamp J.C., Ouimet A.P., Kreulen R. **2004**. The magmato-hydrothermal system at Copahue volcano, Argentina. *Water-Rock Interaction*, 11: 215–218.
- Delmelle P., Bernard A. **2015**. The remarkable chemistry of sulfur in hyper-acid crater lakes: a scientific tribute to Bokuichiro Takano and Minoru Kusakabe. In: Rouwet D. et al. (eds) *Volcanic lakes. Advances in volcanology*. Berlin, Heidelberg: Springer, p. 239–259. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36833-2_10.
- Mora Amador R.A., Rouwet D., Vargas P., Oppenheimer C. **2019**. The extraordinary sulfur volcanism of Poás from 1828 to 2018. In: Tassi F., Vaselli O., Mora Amador R. (eds) *Poás volcano. Active volcanoes of the World*. Cham, Switzerland: Springer, p. 45–78. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02156-0_3.
- Malyshev A., Malysheva L. **2023**. Sulfur melt in Golovnin Caldera, Kunashir Island, Russia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 443(107933), 15 p. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107933>
- Абдурахманов А.И., Разжигаяева Н.Г., Рыбин А.В. **2003**. Современная вулканическая и сейсмическая активность вулкана Менделеева (о. Кунашир, Курильские острова). *Вестник Сахалинского музея*, 10(1): 277–283. <https://elibrary.ru/ysqkwd>
- Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Котенко Т.А., Ингуаджато С., Волошина Е.В. **2017**. Гидротермальная система вулкана Менделеева, о. Кунашир, Курильские острова: геохимия и вынос магматических компонентов. *Вулканология и сейсмология*, 5: 18–35.
- Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д., Литасова С.Н. **1994**. Возраст действующих вулканов Курило-Камчатского региона. *Вулканология и сейсмология*, 4-5: 5–32.
- Горшков Г.С. **1967**. *Вулканизм Курильской островной дуги*. М.: Наука, 288 с.
- Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Волошина Е.В., Тарасов К.В., Мельников Д.В., Котенко Т.А., Эрдниева Д.Ю. **2023**. Кратерное озеро Кипящее в кальдере вулкана Головнина: геохимия воды и газов, вынос магматических летучих (о. Кунашир). *Вулканология и сейсмология*, 1: 3–20.
- Belousov A., Belousova M., Kozlov D. **2017**. Strong hydrothermal eruption 600 BP inside Golovnin Caldera, Kunashir Island, Kurile arc. *Geophysical Research Abstracts*, 19(EGU2017-7596).
- Мархинин Е.К. **1983**. О состоянии вулканов острова Кунашир (март 1974 – май 1982 г.). *Вулканология и сейсмология*, 1: 43–51.
- Малышев А.И., Малышева Л.К. **2024**. Рудная сера вулкана Головнина, о-в Кунашир. *Литосфе-*

- ра, 24(5): 886–910. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-5-886-910>
- 20 Жарков Р.В. **2014**. *Термальные источники Южных Курильских островов*. Владивосток: Дальнаука, 378 с.
 - 21 Малышев А.И. **2004**. *Сера в магматическом рудообразовании*. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 189 с.
 - 22 De Ronde C.E.J., Chadwick Jr.W.W., Ditchburn R.G., Embley R.W., Tunnicliffe V., Baker E.T., Walker S.L., Ferrini V.L., Merle S.M. **2015**. Molten sulfur lakes of intra-oceanic arc volcanoes. In: Rouwet D. et al. (eds) *Volcanic Lakes. Advances in Volcanology*. Berlin, Heidelberg: Springer, p. 261–288. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36833-2_11
 - 23 Kim J., Lee K.-Y., Kim J.-H. **2011**. Metal-bearing molten sulfur collected from a submarine volcano: implications for vapor transport of metals in seafloor hydrothermal systems. *Geology*, 39: 351–354. <https://doi.org/10.1130/G31665.1>
 - 24 Colín-García M., Heredia A., Cordero G., Camprubí A., Negrón-Mendoza A., Ortega-Gutiérrez F., Beraldi H., Ramos-Bernal S. **2016**. Hydrothermal vents and prebiotic chemistry: a review. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3): 599–620. <https://doi.org/10.18268/BSGM2016v68n3a13>
 - 9 Delmelle P., Bernard A. **2015**. The remarkable chemistry of sulfur in hyper-acid crater lakes: a scientific tribute to Bokuichiro Takano and Minoru Kusakabe. In: Rouwet D. et al. (eds) *Volcanic lakes. Advances in volcanology*. Berlin, Heidelberg: Springer, p. 239–259. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36833-2_10
 - 10 Mora Amador R.A., Rouwet D., Vargas P., Oppenheimer C. **2019**. The extraordinary sulfur volcanism of Poás from 1828 to 2018. In: Tassi F., Vaselli O., Mora Amador R. (eds) *Poás volcano. Active volcanoes of the World*. Cham, Switzerland: Springer, p. 45–78. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02156-0_3
 - 11 Malyshev A., Malysheva L. **2023**. Sulfur melt in Golovnin Caldera, Kunashir Island, Russia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 443(107933), 15 p. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107933>
 - 12 Abdurakhmanov A.I., Razzhigaeva N.G., Rybin A.V. **2003**. [Modern volcanic and seismic activity of Mendeleev volcano (Kunashir Island, Kuril Islands)]. *Bulletin of the Sakhalin Museum*, 10(1): 277–283. <https://elibrary.ru/ysqkwd>. (In Russ.).
 - 13 Kalacheva E.G., Taran Y.A., Kotenko T.A., Inguaggiato S., Voloshina E.V. **2017**. The hydrothermal system of Mendeleev Volcano, Kunashir Island, Kuril Islands: The geochemistry and the transport of magmatic components. *Journal of Volcanology and Seismology*, 11: 335–352. <https://doi.org/10.1134/S0742046317050037>
 - 14 Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomoreva V.V., Sulerzhitsky L.D., Litasova S.N. **1994**. [The ages of active volcanoes of the Kuril-Kamchatka region]. *Volcanology & Seismology*, 4-5: 5–32. (In Russ.).
 - 15 Gorshkov G.S. **1967**. [Volcanism of the Kuril island arc]. Moscow: Nauka, 288 p. (In Russ.). URL: http://repo.kscnet.ru/156/1/Gorshkov_1967.pdf (accessed 15.10.2023).
 - 16 Kalacheva E.G., Taran Y.A., Voloshina E.V., Tarasov K.V., Melnikov D.V., Kotenko T.A., Erdnieva D.M. **2023**. Crater Lake Kipyashchee in the caldera of Golovnin Volcano: Water and gas geochemistry, output of magmatic volatiles (Kunashir Island). *Journal of Volcanology and Seismology*, 17: 1–16. <https://doi.org/10.1134/S0742046322700063>
 - 17 Belousov A., Belousova M., Kozlov D. **2017**. Strong hydrothermal eruption 600 BP inside Golovnin Caldera, Kunashir Island, Kurile arc. *Geophysical Research Abstracts*, 19(EGU2017-7596).
 - 18 Markhinin E.K. **1983**. On the state of the volcanoes of Kunashir Island (March 1974 – May 1982). *Volcanology & Seismology*, 1: 43–51. (In Russ.).
 - 19 Malyshev A.I., Malysheva L.K. **2024**. Ore sulfur of Golovnin Volcano, Kunashir Island. *Lithosphere (Russia)*, 24(5): 886–910. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-5-886-910>

References

- 1 MacDonald G.A. **1972**. *Volcanoes: A discussion of volcanoes, volcanic products, and volcanic phenomena*. New Jersey: Prentice-Hall, 510 p.
- 2 Malyshev A., Malysheva L. **2022**. Sulfur in ore formation. *Ore Geology Reviews*, 150(105199), 21 p. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105199>
- 3 Vlasov G.M. (ed.) **1971**. [Volcanic sulfur deposits and some problems of hydrothermal ore formation]. Moscow: Nauka, 360 p. (In Russ.).
- 4 Vinogradov V.I. **1980**. [The role of the sedimentary cycle in the geochemistry of sulfur isotopes]. Moscow: Nauka, 192 p. (In Russ.).
- 5 Averyanov I.P. **1981**. [Sulfur balance in the post-volcanic process and problems of industrial sulfur accumulation]. Moscow: Nauka, 179 p. (In Russ.).
- 6 Naboko S.I. **1958**. [On the formation of lake sulfur on Golovnin Volcano]. *Bull. of the Volcanological Stations*, 27: 43–50 (In Russ.).
- 7 Naboko S.I. **1959**. [Volcanic exhalations and products of their reactions]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 303 p. (In Russ.).
- 8 Varekamp J.C., Ouimette A.P., Kreulen R. **2004**. The magmato-hydrothermal system at Copahue volcano, Argentina. *Water-Rock Interaction*, 11: 215–218.

- 20 Zharkov R.V. **2014.** *Thermal springs of the Southern Kuril Islands*. Vladivostok: Dalnauka Publ., 378 p. (In Russ.)/
- 21 Malyshev A.I. **2004.** *Sulfur in the magmatic ore formation*. Ekaterinburg: IGG UrO RAN, 189 p. (In Russ.).
- 22 De Ronde C.E.J., Chadwick Jr.W.W., Ditchburn R.G., Embley R.W., Tunnicliffe V., Baker E.T., Walker S.L., Ferrini V.L., Merle S.M. **2015.** Molten sulfur lakes of intra-oceanic arc volcanoes. In: Rouwet D. et al. (eds) *Volcanic Lakes. Advances in Volcanology*. Berlin, Heidelberg: Springer, p. 261–288. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36833-2_11
- 23 Kim J., Lee K.-Y., Kim J.-H. **2011.** Metal-bearing molten sulfur collected from a submarine volcano: implications for vapor transport of metals in seafloor hydrothermal systems. *Geology*, 39: 351–354. <https://doi.org/10.1130/G31665.1>
- 24 Colín-García M., Heredia A., Cordero G., Camprubí A., Negrón-Mendoza A., Ortega-Gutiérrez F., Beraldi H., Ramos-Bernal S. **2016.** Hydrothermal vents and prebiotic chemistry: a review. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3): 599–620. <https://doi.org/10.18268/BSGM2016v68n3a13>

Об авторах

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

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

Поступила 20.10.2025

Принята к публикации 01.12.2025

About the Authors

Malyshev, Aleksandr I. (<https://orcid.org/0000-0002-4306-8000>), 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

Malysheva, Lidiia K. (<https://orcid.org/0000-0002-2784-2182>), Research, 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

Received 20 October 2025

Accepted 1 December 2025

© Авторы, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

ЭКСПЕДИЦИИ И ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 551.21

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.478-484>
<https://www.elibrary.ru/scfbav>

Полевые исследования ультракислых термальных источников «Голубые озера» на вулкане Баранского (о. Итуруп, Южные Курильские острова) в 2025 г.

А. В. Дегтерев[@], Ф. А. Романюк

@E-mail: d_a88@mail.ru

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

Резюме. Представлены предварительные результаты полевых обследований (июль 2025 г.) ультракислых сульфатно-хлоридных термальных источников «Голубые озера», разгружающихся в долине ручья Кипящий на склоне действующего вулкана Баранского (о. Итуруп, Южные Курильские острова).

Ключевые слова: о. Итуруп, вулкан Баранского, гидротермы, термальные источники, ультракислые воды, мониторинг

Field study of the ultra-acidic thermal springs «Blue Lakes» on Baransky volcano (Iturup Island, Southern Kuril Islands) in 2025

Artem V. Degterev[@], Fedor A. Romanyuk

@E-mail: d_a88@mail.ru

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

Abstract. Preliminary results of field surveys (July 2025) of the ultra-acid sulfate-chloride thermal springs of the “Blue Lakes” which discharge in the Kipyashchiy Stream valley on the slope of the active Baransky volcano (Iturup Island, Southern Kuril Islands), are presented.

Keywords: Iturup Island, Baransky volcano, hydrothermal systems, thermal springs, ultra-acidic waters, monitoring

Для цитирования: Дегтерев А.В., Романюк Ф.А. Полевые исследования ультракислых термальных источников «Голубые озера» на вулкане Баранского (о. Итуруп, Южные Курильские острова) в 2025 г. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 4, с. 478–484. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.478-484>; <https://www.elibrary.ru/scfbav>

For citation: Degterev A.V., Romanyuk F.A. Field study of the ultra-acidic thermal springs “Blue Lakes” on Baransky volcano (Iturup Island, Southern Kuril Islands) in 2025. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 4, pp. 478–484. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.478-484>; <https://www.elibrary.ru/scfbav>

Финансирование и благодарности

Исследования проведены в рамках государственного задания ИМГиГ ДВО РАН (FWWM-2024-0003, «Вулканизм Сахалина и Курильских островов: хронология, петролого-геохимические особенности, гидротермальные проявления, мониторинг вулканической активности»).

Funding and Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the state task of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS (FWWM-2024-0003, “Volcanism of Sakhalin and the Kuril Islands: chronology, petrological and geochemical features, hydrothermal activity, and monitoring of volcanic activity”).

Авторы благодарят за содействие в проведении полевых работ В.В. Тарико и сотрудников рекреационной зоны ручья Кипящий (ЗАО «Гидрострой»).

Авторы выражают признательность рецензентам, замечания которых оказались полезными и помогли улучшить содержание рукописи.

The authors thank V.V. Tariko and the team of the Kipyashchiy Stream recreational area (CJSC “Gidrostroy”) for their assistance in conducting the field work.

The authors are grateful to the respected Reviewers whose comments proved to be very helpful and improved the content of the manuscript.

На юго-западном склоне действующего вулкана Баранского (хр. Грозный, центральная часть о. Итуруп, Южные Курильские острова) в верховьях ручья Кипящий расположена группа уникальных термальных источников «Голубые озера», где разгружаются высокотемпературные ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$) ультракислые ($\text{pH} < 2$) сульфатно-хлоридные воды [1–5 и др.]. Их формирование является результатом взаимодействия магматических газов с метеорными водами и глубинными хлоридно-натриевыми флюидами, что делает их потенциальным индикатором вулканической активности [3, 6]. Однако ограниченность и фрагментарность данных о состоянии гидротерм, отсутствие регулярных наблюдений не позволяют отследить динамику изменения физико-химических параметров во времени и объективно оценить активность вулканоматматической системы, к которой они приурочены.

В настоящем сообщении представлены актуальные данные о текущем состоянии источников «Голубые озера», полученные сотрудниками лаборатории вулканологии и вулканоопасности ИМГиГ ДВО РАН в ходе полевых работ на о. Итуруп в июле 2025 г.

В ходе полевых работ было изучено современное состояние «Голубых озер» и отобраны пробы вод для исследования их химического состава. Пробы направлены в Приморский центр локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток).

Группа ультракислых сульфатно-хлоридных терм «Голубые озера» (местные жители называют их также «Изумрудными глазками» или «Голубыми глазками») приурочена к действующему вулкану Баранского (рис. 1), расположенному в пределах хребта Грозный,

протягивающегося вдоль тихоокеанского побережья центральной части о. Итуруп.

Действующий вулкан Баранского (абс. выс. – 1126 м) представляет собой сложно построенный стратовулканический конус, сложенный андезибазальтами, андезитами и андезидацитами [7, 8]. Достоверно зафиксированные исторические извержения вулкана Баранского не известны, за исключением упоминания о слабом эксплозивном извержении летом 1951 г. [7].

В последние годы вулкан проявляет интенсивную сольфатарную и гидротермальную активность по периметру лавово-экструзивного купола, в юго-западном боковом кратере, на Старозаводском сольфатарном поле и в долине ручья Кипящий [1, 2, 3].

По данным [9], к юго-западной части вулкана Баранского приурочены две высокотемпературные гидротермальные системы: 1) субнейтральная водно-доминирующая, проявляющаяся на поверхности в виде нейтральных теплых источников $\text{SO}_4\text{--Cl}$ -состава, разбавленных грунтовыми водами, паровых струй, водных и водно-грязевых котлов; 2) близповерхностная ультракислая, формирующаяся в постройке вулкана в результате взаимодействия магматических газов и метеорных вод, выраженная на поверхности фумаролами юго-западного кратера, парогазовыми струями и высокотемпературными ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$) сульфатно-хлоридными источниками с $\text{pH} < 2$ («Голубые озера»), локализованными в долине ручья Кипящий [9].

Источники «Голубые озера», расположенные в 3 км к юго-западу от вершины вулкана Баранского, на высоте ~ 250 м н.у.м., представляют собой редкий пример кипящих ультракислых сульфатно-хлоридных вод,

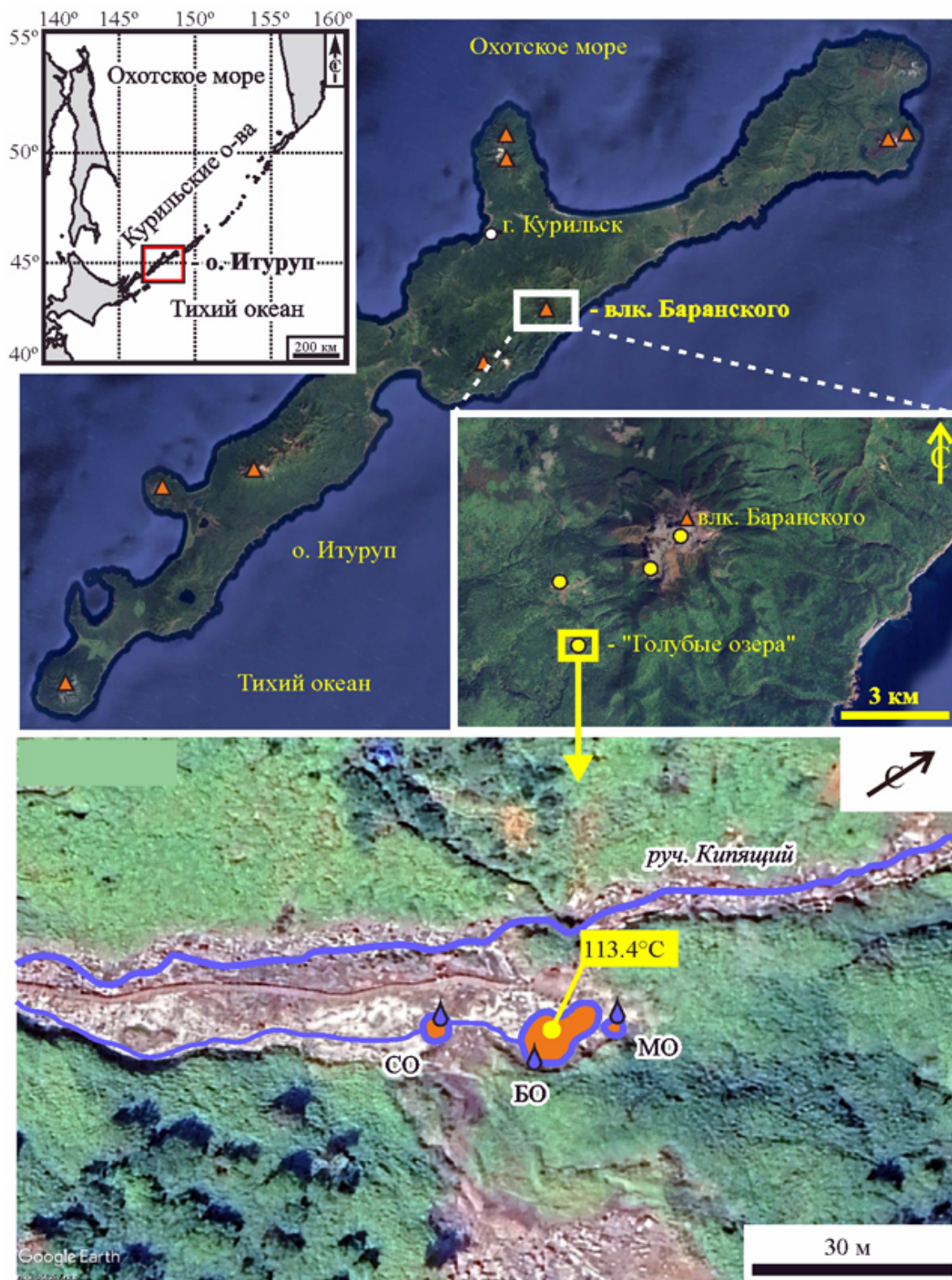


Рис. 1. Расположение источников «Голубые озера», приуроченных к гидротермальной системе действующего вулкана Баранского. СО – Среднее озеро, БО – Большое озеро, МО – Малое озеро. Треугольниками обозначены активные вулканы, желтыми кружками – участки сольфатарной и гидротермальной активности. Точки отбора проб воды отмечены голубыми каплями-символами. Использованы спутниковые снимки ГИС-сервиса Google Earth.

Fig. 1. Location of the “Blue Lakes” springs, associated with the hydrothermal system of the active Baransky volcano. SO, Srednee (Middle) Lake; BO, Bolshoe (Large) Lake; MO, Maloe (Small) Lake. Triangles denote active volcanoes; yellow dots denote areas of solfataric and hydrothermal activity. Water sampling points are marked with blue droplet symbols. Satellite images from the Google Earth GIS service are used.

характеризующихся температурой свыше 100 °C и экстремально низким pH ~ 1.2. Как показано в [3], химический состав этих вод формируется в результате сложного взаимодействия магматических газов, метеорных вод и глубинных хлоридно-натриевых флюидов, что отражается в высоких концентрациях элементов магматического происхождения – Cl, S (в форме SO_4^{2-}), F, а также катионов Al, Fe, Ca, Mg и кремнезема (SiO_2). Через гидротермальную систему вулкана Баранского осуществляется масштабный вынос химических элементов в Тихий океан: общий сток магматических летучих достигает 14 т хлора и 41 т серы (в виде SO_4) ежедневно, причем более 30 % этого выноса обеспечивается источниками «Голубые озера» [3].

Термальные воды «Голубых озер» разгружаются в воронкообразных углублениях, врезанных в пойму ручья Кипящий, сформированную грубообломочной толщей гидротермально измененных пород вулкана Баранского (рис. 1, 2). Всего в настоящее время выделены 3 такие воронки, различающиеся размерами и глубиной. В данном сообщении они описаны нами как Большое озеро (БО), Среднее (СО) и Малое (МО) (рис. 1, 2 а–ж). Наиболее крупное, так называемое Большое озеро, имеет вытянуто-изометричную (апиодную) форму и размеры примерно 7×12 м. Его глубина в центральной части воронки составляет не менее 4.5 м (глубина была измерена с помощью отвеса и плетеной лески, заброшенной в воронку спиннингом). У северо-восточного края Большого озера, отделенная небольшой перемычкой (рис. 2 в), расположена воронка Малого озера (диаметр ~1.5 м, глубина ~0.5 м), которое впервые было описано в 2022 г. в работе [3] (возможно, оно существовало и ранее, но отдельно не выделялось). Ниже по течению, примерно в 10 м, находится Среднее озеро, имеющее диаметр ~3.5 м и глубину ~1.5 м.

По результатам измерений 2025 г. максимальная температура (113.4 °C) зафиксирована в центральной части Большого озера (рис. 1). Для измерений использовался

цифровой измеритель температуры IT-8-K/K от НПК «Рэлсиб» (погрешность измерений в диапазоне от –50.0 до +999.9 °C составляет 0.1 °C). Ранее столь высокие значения температуры в гидротермах «Голубые озера» не фиксировались, поэтому требуют перепроверки с использованием дополнительного измерительного оборудования. Температура и pH в точке отбора проб воды составляли 95–97 °C и 1.2–1.4 соответственно. При этом отмечалось интенсивное парение и бурление источника, чего так явно не наблюдалось при посещении его в предыдущие годы (2013, 2014) (рис. 3). Периодически поднимающийся над поверхностью озера бурлящий грифон с потоками газов имел высоту до 30–35 см (в 2013–2014 гг. подобное явление не отмечалось, см. рис. 3 а, б). Мнения местных жителей и персонала рекреационной зоны ручья Кипящий о возможных изменениях в динамике «Голубых озер» за последние годы были довольно противоречивыми. Один из наблюдателей упоминал «выброс серы» в русле ручья Кипящий, наблюдавшийся в начале лета 2025 г.

Уникальные термальные проявления ручья Кипящий на вулкане Баранского обладают значительным рекреационным потенциалом, который активно используется в условиях интенсивно развивающегося в последние годы внутреннего туризма. В связи с этим важно отметить, что источники «Голубые озера» следует рассматривать как природные объекты повышенной опасности. Их значительная глубина, экстремально высокая температура и кислотность требуют особого внимания и осторожности при посещении. В условиях растущего туристического потока в районе смотровой площадки у озер иногда одновременно находятся более 15 чел. (за день таких групп может быть более 5). При этом некоторые посетители выходят за пределы огороженной зоны, приближаясь непосредственно к воронкам, чего делать категорически нельзя – перегретые глубинные воды источников имеют температуру более 100 °C.



Рис. 2. «Голубые озера» вулкана Баранского в июле 2025 г.: а, в, д, е – Большое озеро, б, ж – Среднее озеро, в, г – Малое озеро. Фото А.В. Дегтерева.

Fig. 2. The “Blue Lakes” of Baransky volcano in July 2025: (а, в, д, е) Large Lake; (б, ж) Middle Lake; (в, г) Small Lake. Photo by A.V. Degterev.



Рис. 3. «Голубые озера» вулкана Баранского в 2013 г.: а – общий вид на долину ручья Кипящий, б – Большое озеро, в – Среднее озеро. Фото А.В. Дегтерева.

Fig. 3. The “Blue Lakes” of Baransky volcano in 2013: (a) general view of the Kipyashchiy Stream valley; (б) Large Lake; (в) Middle Lake. Photo by A.V. Degterev.

Не исключается возможность и парогазовых выбросов, которые могут привести к термическим и химическим ожогам.

Учитывая потенциальную индикаторную роль источников «Голубые озера», необходимо проведение регулярных мониторинговых исследований данных гидротерм, включая изучение химического состава, определение физических параметров и визуальные обследования с использованием тепловизионного оборудования.

Список литературы

1. Жарков Р.В. **2014.** *Термальные источники Южных Курильских островов.* Владивосток: Дальнаука, 378 с.
2. Знаменский В.С., Никитина И.Б. **1985.** Гидротермы центральной части острова Итуруп (Курильские острова). *Вулканология и сейсмология*, 5: 44–65.
3. Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Котенко Т.А., Волошина Е.В., Эрдниева Д.М. **2022.** Ультракислые сульфатно-хлоридные воды вулкана Баранского (о. Итуруп, Курильские о-ва). Состав и вынос магматических

и породообразующих компонентов. *Вулканология и сейсмология*, 5: 31–48. <https://doi.org/10.31857/S0203030622050054>

4. Рычагов С.Н., Главатских С.Ф., Гончаренко О.П. и др. **1993**. Температурная и геолого-геохимическая модель геотермального месторождения Океанское (о. Итуруп). *Геология рудных месторождений*, 5: 405–418.
5. Bragin I.V., Chelnokov G.A., Zharkov R.V., Kharitonova N.A. **2015**. Impact of volcanic fluids on water quality, Baransky volcano, Southern Kuriles. *J. Water Resource and Hydraulic Engineering*, 4(1–4): 111–114. <https://doi.org/10.5963/jwrhe0401011>
6. Taran Y.A., Kalacheva E.G. **2020**. Acid sulfate-chloride volcanic waters. Formation and potential for monitoring of volcanic activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 405(107036). <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107036>
7. Горшков Г.С. **1967**. *Вулканизм Курильской островной дуги*. М.: Наука, 288 с.
8. Биндеман И.Н. **1997**. Периодическое смещение магм с кумюлятами как механизм циклической эволюции вулкана Баранского (о. Итуруп, Курильские острова). *Геохимия*, 4: 380–390.
9. Таран Ю.А., Знаменский В.С., Юрова Л.М. **1995**. Геохимическая модель гидротермальных систем вулкана Баранского (о-в Итуруп, Курильские острова). *Вулканология и сейсмология*, № 4/5. С. 95–115.
2. Znamensky V.S., Nikitina I.B. **1985**. [Hydrotherms of the central part of Iturup Island (Kuril Islands)]. *Volcanology and Seismology*, 5: 44–65. (In Russ.).
3. Kalacheva E.G., Taran Yu.A., Kotenko T.A., et al. **2022**. Ultra acid sulfate chloride waters of Baransky volcano on Iturup Island, Kurils. The composition and output of magmatic and rock-forming components. *Journal of Volcanology and Seismology*, 16: 349–364. <https://doi.org/10.1134/S0742046322050050>
4. Rychagov S.N., Glavatskikh S.F., Goncharenko O.P., et al. **1993**. [Temperature and geological-geochemical model of the Okeanskoye geothermal deposit (Iturup Island)]. *Geology of Ore Deposits*, 5: 405–418. (In Russ.).
5. Bragin I.V., Chelnokov G.A., Zharkov R.V., Kharitonova N.A. **2015**. Impact of volcanic fluids on water quality, Baransky volcano, Southern Kuriles. *J. Water Resource and Hydraulic Engineering*, 4(1–4): 111–114. <https://doi.org/10.5963/jwrhe0401011>
6. Taran Y.A., Kalacheva E.G. **2020**. Acid sulfate-chloride volcanic waters. Formation and potential for monitoring of volcanic activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 405(107036). <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107036>
7. Gorshkov G.S. **1967**. [Volcanism of the Kuril island arc]. Moscow: Nauka, 288 p. (In Russ.).
8. Bindeman I.N. **1997**. [Periodic displacement of magmas with cumulates as a mechanism of cyclic evolution of Baransky volcano (Iturup Island, Kuril Islands)]. *Geochemistry*, 4: 380–390. (In Russ.).
9. Taran Yu.A., Znamensky V.S., Yurova L.M. **1995**. [A geochemical model of hydrothermal systems of Baransky volcano (Iturup Island, Kuril Islands)]. *Volcanology and Seismology*, 4/5: 95–115. (In Russ.).

References

Об авторах

Дегтерев Артем Владимирович (<https://orcid.org/0000-00018291-2289>), кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией вулканологии и вулканопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, d_a88@mail.ru

Романюк Федор Александрович (<https://orcid.org/0000-00031581-1503>), кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, f.romanuk@imgg.ru

About the Authors

Degterev, Artem V. (<https://orcid.org/0000-0001-8291-2289>), Cand. of Sci. (Geology and Mineralogy), Head of Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, d_a88@mail.ru

Romanyuk, Fedor A. (<https://orcid.org/0000-0003-1581-1503>), Cand. Sci. (Biology), Researcher of the Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, f.romanuk@imgg.ru

Поступила 01.11.2025

Принята к публикации 28.11.2025

Received 1 November 2025

Accepted 28 November 2025

© Авторы, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

ЭКСПЕДИЦИИ И ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 551.21

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.485-494>
<https://www.elibrary.ru/emoeme>

Полевые работы в бухте Крашенинникова и на хребте Карпинского (остров Парамушир, Северные Курильские острова) в 2025 году

*Н. К. Самаркина^{1,2}, А. Б. Ермолинский², М. Л. Зверева³, В. Бутрис¹,
А. А. Нуждаев¹, С. Б. Григорьева⁴, Р. А. Кузнецов¹, Ю. А. Титов⁵*

@E-mail: nastasya.samarkina@bk.ru

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

² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

³ *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

⁴ *Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*

⁵ *Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия*

Резюме. Представлены первые результаты полевых работ в бухте Крашенинникова и на хребте Карпинского (о. Парамушир, Северные Курильские острова), выполненных в июле–августе 2025 г. сотрудниками Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН в ходе комплексной экспедиции Русского географического общества «Восточный бастион. Курильская гряда». С целью изучения процессов вулканической и гидротермальной активности на территории были отобраны образцы горных пород единого плейстоценового основания вулканов Чикурачки, Татарина и Ломоносова, а также образцы лав этих вулканов. На вершине вулкана Татарина выполнена аэрофото- и площадная температурная съемка кратера с использованием беспилотного летательного аппарата, оснащенного тепловизионной камерой; проведено минералогическое опробование фумарольных площадок вулкана. Для определения геохимических особенностей геобиоценозов вблизи действующих вулканов отобраны пробы почв и выполнено гидрохимическое опробование основных водотоков бухты Крашенинникова. Собранный полевой материал (образцы горных пород, вод, продуктов фумарольной деятельности) представляет основу для дальнейших минералого-геохимических исследований.

Ключевые слова: экспедиция, Курильские острова, вулкан Татарина, бухта Крашенинникова, хребет Карпинского

Fieldwork in Krasheninnikov Bay and the Karpinsky Ridge (Paramushir Island, Northern Kuril Islands) in 2025

*Nastasia K. Samarkina^{1,2}, Andrey B. Ermolinskiy², Maria L. Zvereva³, Veronika Butris¹,
Anton A. Nuzhdavev¹, Sofia B. Grigorieva⁴, Ruslan A. Kuznetsov¹, Yuriy A. Titov⁵*

@E-mail: nastasya.samarkina@bk.ru

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

² *M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

³ *Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

⁴ *Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia*

⁵ *Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint Petersburg, Russia*

Abstract. This paper presents a description of the fieldwork conducted in Krasheninnikov Bay on Paramushir Island in July–August 2025 by researchers from the Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. The fieldwork was carried out during the Russian Geographical Society’s expedition “Eastern Bastion – Kuril Ridge.” To study volcanic and hydrothermal activity in the area, rock samples were collected from formations composing the unified Pleistocene basement of the Chikurachki, Tatarinov, and Lomonosov volcanoes, as well as samples of lava from these volcanoes. At the summit of Tatarinov volcano, aerial and surface temperature surveys of the crater were performed using an unmanned aerial vehicle equipped with a thermal imaging camera. Mineralogical sampling of fumarolic fields on the volcano was also carried out. To determine the geochemical characteristics of geobiospheres near active volcanoes, soil sampling and hydrochemical testing of major watercourses in Krasheninnikov Bay were conducted. The collected field material (samples of rocks, waters, and products of fumarolic activity) provides the basis for further mineralogical and geochemical studies.

Keywords: expedition, Kuril Islands, Tatarinov volcano, Krasheninnikov Bay, Karpinsky Ridge

Для цитирования: Самаркина Н.К., Ермолинский А.Б., Зверева М.Л., Бутрис В., Нуждаев А.А., Григорьева С.Б., Кузнецов Р.А., Титов Ю.А. Полевые работы в бухте Крашенинникова и хребте Карпинского (остров Парамушир, Северные Курильские острова) в 2025 году. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 4, с. 485–494. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.485-494>; <https://www.elibrary.ru/emoeme>

For citation: Samarkina N.K., Ermolinskiy A.B., Zvereva M.L., Butris V., Nuzhdaev A.A., Grigorieva S.B., Kuznetsov R.A., Titov Yu.A. Fieldwork in Krasheninnikov Bay and the Karpinsky Ridge (Paramushir Island, Northern Kuril Islands) in 2025. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 4, pp. 485–494. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.485-494>; <https://www.elibrary.ru/emoeme>

Финансирование и благодарности

Работа проведена в рамках экспедиции «Восточный бастион – Курильская гряда» (VI полевой сезон 2025 г.), ВОО «Русское географическое общество».

Funding and Acknowledgements

The study was carried out within the “Eastern Bastion – Kuril Ridge” expedition (VI field season 2025), Russian Geographical Society.

Бухта Крашенинникова расположена в юго-западной части о. Парамушир (Северные Курильские острова). С северо-востока

акватория ограничена вулканами Чикурачки и Татаринова, а с юго-запада – вулканом Фусса (рис. 1). Все три вулкана относятся к действующим.

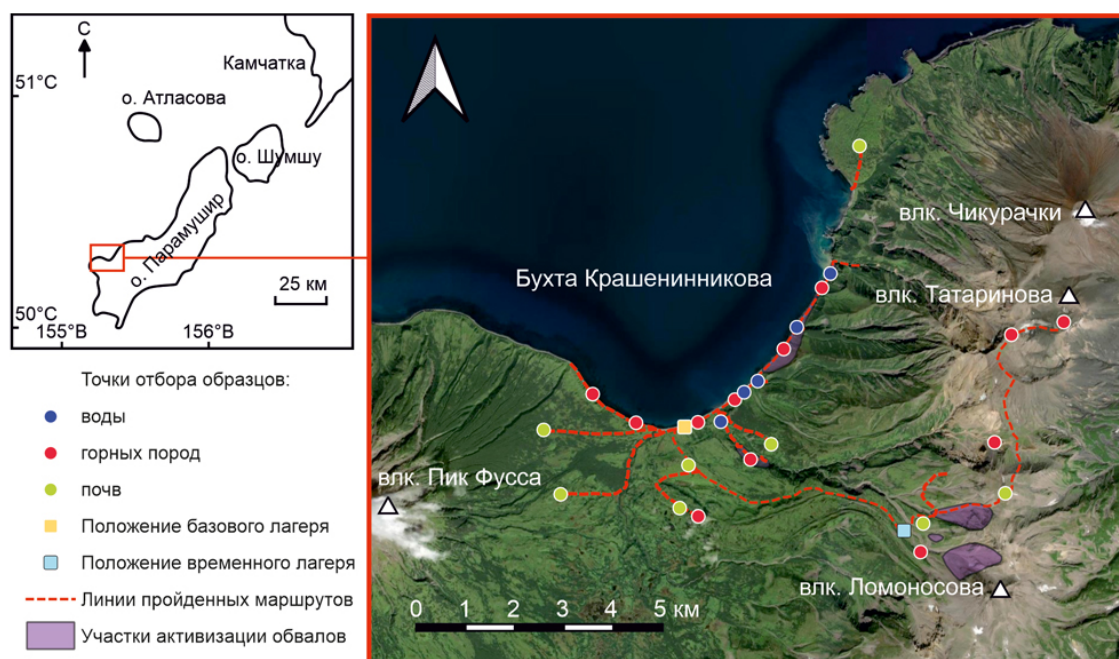


Рис. 1. Район работ и схематическое расположение точек опробования.

Fig. 1. Study area and schematic location of sampling points.

ющим. В силу своей труднодоступности они мало изучены и представляют значительный интерес для вулканологических и геологических исследований.

Береговая линия бухты в западной и восточной частях представлена крутыми абразионными обрывами, в центральной части – относительно пологими поверхностями морских и речных террас и приуроченными к ним склонами. У подножий данных форм рельефа формируется узкая аккумулятивная полоса, сложенная окатанным обломочным материалом. Размеры обломков варьируют от среднезернистого песка в устьях рек и гальки диаметром в несколько сантиметров до валунов метровых размеров под клифами (рис. 2).

Вдоль побережья была проведена серия геологических маршрутов, в ходе которых осуществлялся отбор проб материала из осыпей, коренных выходов горных пород основания вулканов, а также проб воды из основных водотоков: рек Аленушкина, Теневия, Кири и др.

Прибрежный галечный материал представлен обломками вулканических пород, разнообразных по структуре и текстуре. Встречаются как полнокристаллические, так и стекловатые разности; преобладают породы порфирового типа, иногда с крупными вкра-

пленниками, размером до 2 см; в небольшом количестве присутствуют валуны и гальки с афировой структурой. По текстуре выделяются массивные и пористые разновидности вулканических горных пород.

В серовато-бурых пирокластических обломках, имеющих рыхлую текстуру и порфировую структуру, отмечаются кристаллы плагиоклаза размером 2–3 см (рис. 3). В светло-серых валунах андезитового состава наблюдаются вкрапленники пироксена до 1 см, а в ряде валунов также обнаружены многочисленные ксенолиты размером от 1 до 10 см, характеризующиеся четко выраженными зонами закалки (рис. 4). Морфологически ксенолиты представлены мелкозернистыми образованиями от светло- до темно-серого оттенка, частично измененными; вероятно, они являются реликтами древних фрагментов вулканической постройки.

В районе устья р. Кири найдены образцы с признаками вторичной минерализации – тонким белым налетом на поверхности валунов, а также обломки, подвергшиеся интенсивным гидротермальным изменениям и имеющие характерный запах серы. Данные обломки, по-видимому, поступают в бухту вследствие обрушений со склонов вулканов Чикурачки и Татаринава.



Рис. 2. Галечная полоса вдоль береговой линии бухты Крашенинникова. Фото М.Л. Зверевой.

Fig. 2. Pebble coastline of Krashenninnikov Bay. Photo by M.L. Zvereva.



Рис. 3. Вкрапленник плагиоклаза в пирокластическом обломке. Фото Н.К. Самаркиной.

Fig. 3. Plagioclase phenocryst in a pyroclastic fragment. Photo by N.K. Samarkina.

Для установления генетической связи обломочного материала побережья с источниками его поступления исследованы геологическое строение территории и проявления современных процессов, происходящих в пределах сопредельных вулканических построек. Для этого в ходе полевых работ на маршрутах вдоль побережья был описан разрез единого основания вулканов Чикурачки, Татаринова и Ломоносова (рис. 5), отобраны образцы пород, слагающих его в руслах рек Аленушки-

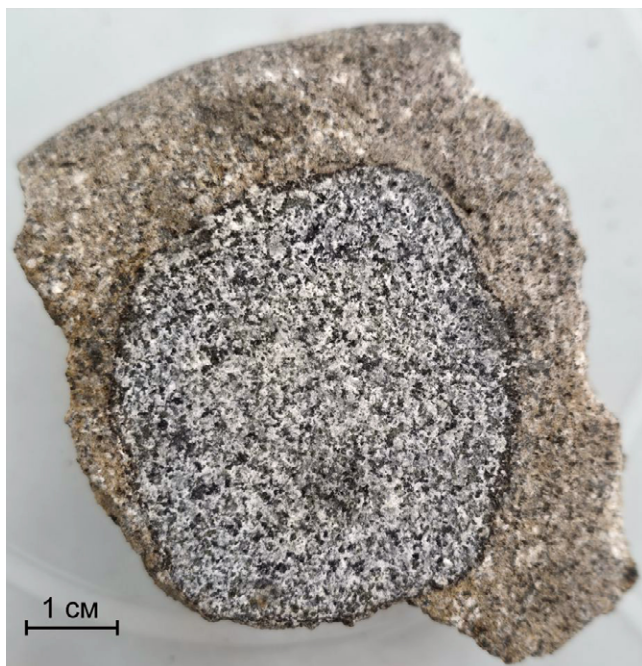


Рис. 4. Ксенолит в андезите. Фото Н.К. Самаркиной.

Fig. 4. Xenolith in andesite. Photo by N.K. Samarkina.

на, Теневая и Кири, а также вдоль побережья бухты Крашенинникова. Фундамент состоит из пирокластического потока и перекрывающего его лавового потока [1].

Полевые работы, проводимые на о. Парамушир, пересеклись во времени с крупным землетрясением магнитудой 8.8, которое произошло 30 июля 2025 г. и эпицентр которого находился в Тихом океане у юго-западного побережья п-ова Камчатка.

В момент землетрясения в базовом лагере в устье р. Крашенинникова были слышны раскаты со стороны вулкана Фусса и хребта Карпинского. По-видимому, они были вызваны перемещением горных пород в результате обвалов и осыпей.

В дальнейшем, в ходе геологических маршрутов в северную часть бухты Крашенинникова, по долине р. Аленушкина и на склонах хребта Карпинского наблюдались многочисленные проявления обвальных процессов (рис. 1). В долине р. Аленушкина и в бухте Крашенинникова обвалы в основании и нижней части сложены пирокластическими образованиями, а в верхней части – более молодыми



Рис. 5. Коренные выходы фундамента в долине р. Аленушкина. Фото М.Л. Зверевой.

Fig. 5. Bedrock outcrops of the foundation in the valley of the Alyonushkina River. Photo by M.L. Zvereva.



Рис. 6. Осыпные образования в борту долины р. Аленушкина. Фото А.Б. Ермолинского.

Fig. 6. Talus formations of the valley slope of the Alyonushkin River. Photo by A.B. Ermolinskiy.

лавовыми потоками. В формировании обвалов участвовали лишь горные породы, слагающие верхнюю часть массивов (рис. 6). Свежие обвалы превосходно дешифрировались в местах, где они перекрывали растительность, снежники, а также валунники. По оценкам авторов, объем обвалов, которые удалось наблюдать, в среднем не превышал десятков кубических метров.

Ряд маршрутов, пройденных вглубь острова, предусматривал работы по отбору образцов каменного материала с самого молодого голоценового потока вулкана Ломоносова [1], который расположен на западном склоне одноименного вулкана. Ширина потока в верхней части составляет 150–200 м, ниже по склону он расширяется до 1 км. Поток сложен глыбовыми серыми андезитами с многочисленными фенокристаллами плагиоклаза и редкими выделениями пироксена в плотной основной массе. Его поверхность в значительной степени задернована, однако встречаются выходы выветрелых пород (рис. 7).



Рис. 7. Скальные выходы андезитов на конце языка лавового потока вулкана Ломоносова. Фото М.Л. Зверевой.

Fig. 7. Andesite rock outcrops at the end of the lava flow tongue of Lomonosov volcano. Photo by M.L. Zvereva.

Вулканический хребт Карпинского представляет собой одну из самых крупных геологических структур на о. Парамушир, он ориентирован субмеридионально и пересекает южную часть острова на всю ширину. В ходе маршрутных исследований на северной части хребта, на участке между вулканами Ломоносова и Татарина, были обнаружены проявления палеогидротермальной деятельности в виде обширных полей аргиллизитов, которые представлены аргиллизированными андезитами, а также сцементированными глинами и опалитами.

На участке распространения опалитов и сцементированных глин на южном склоне вулкана Татарина была пройдена шурфозачистка (рис. 8). Вскрытые горные породы представляют из себя неоднородные сцементированные (не размокают в воде) глинистые образования, интенсивно трещиноватые и разбитые на призматические отдельности размерами 1–5 см. Также массив подвержен ожелезнению, которое распространяется по наиболее крупным магистральным трещинам и формирует гнездовидные зоны. По морфологии данные образования сходны с приповерхностными глинами современных термальных полей, находящимися в зоне сернокислотного выщелачивания. Приуроченность подобной обстановки к зонам сернокислого выщелачивания была описана С.И. Набоко [2].

Вулкан Татарина представляет собой действующий андезитовый стратовулкан высотой 1530 м, входящий в состав вулканического хребта Карпинского. Вулкан формирует массив неправильной формы с несколькими кратерами, граничащий на севере с вулканом Чикурачки, а на юге – с вулканом Ломоносова. Предположительно, первое зафиксированное извержение плининского типа было в конце XVII в. В последующем (1953–1959, 1962 гг.) на вулкане регистрировалась сольфатарная активность [3, 4].

В ходе работ совершенно восхождение на вершину вулкана. Маршрут пролегал через крупный кратер южнее вершины диаметром более 1 км и глубиной до 150 м, внутри которого сформировался молодой кратер (рис. 9). В ходе исследований осуществлен отбор ми-

нералогических образцов в местах сольфатарной активности с привязкой и фотофиксацией, проведено опробование воды из оз. Колодец, проведена съемка кратера с использованием беспилотного летательного аппарата, оснащенного тепловизионной камерой.

На момент проведения работ (5 августа 2025 г.) в кратере зафиксированы два водоема, образованные за счет таяния снежного покрова: оз. Колодец в пределах «молодого» кратера и безымянное озеро в «старом» кратере (образование нового «молодого» кратера в «старом» кратере вулкана Татарина впервые было отмечено Горшковым [5]). Внутренние стенки и дно кратера сложены тефрой (шлаками и обломка-

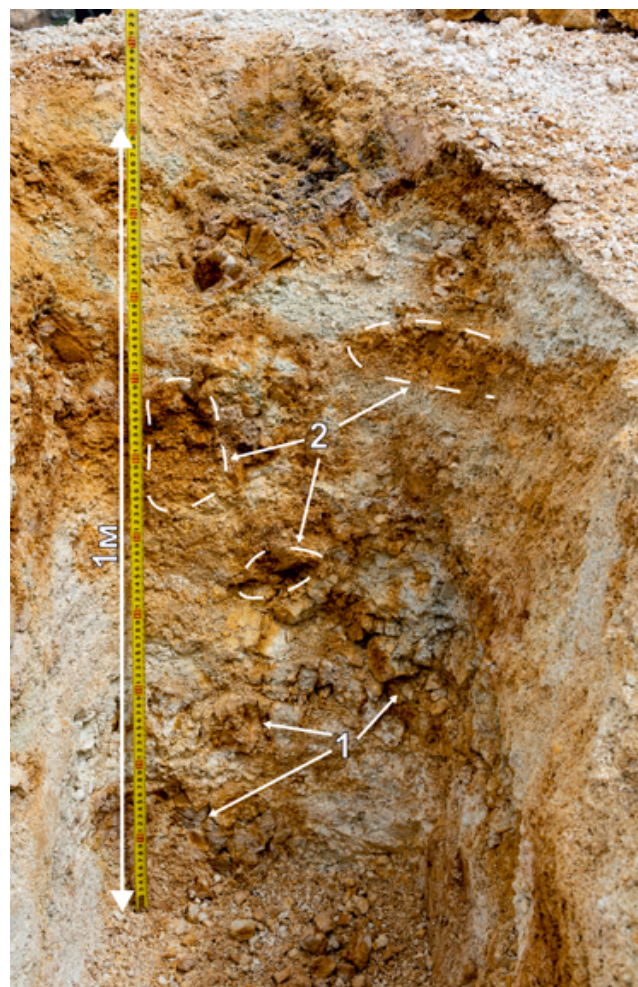


Рис. 8. Стенка шурфозачистки на севере хребта Карпинского (южный склон вулкана Татарина). 1 – зоны интенсивной трещиноватости; 2 – участки ожелезнения.

Фото А.Б. Ермолинского

Fig. 8. The wall of the pit located in the north of the Karpinsky ridge (the southern slope of Tatarinov volcano). Designations: 1, zones of intense fracturing; 2, areas of ferruginization.

Photo by A.B. Ermolinskiy.

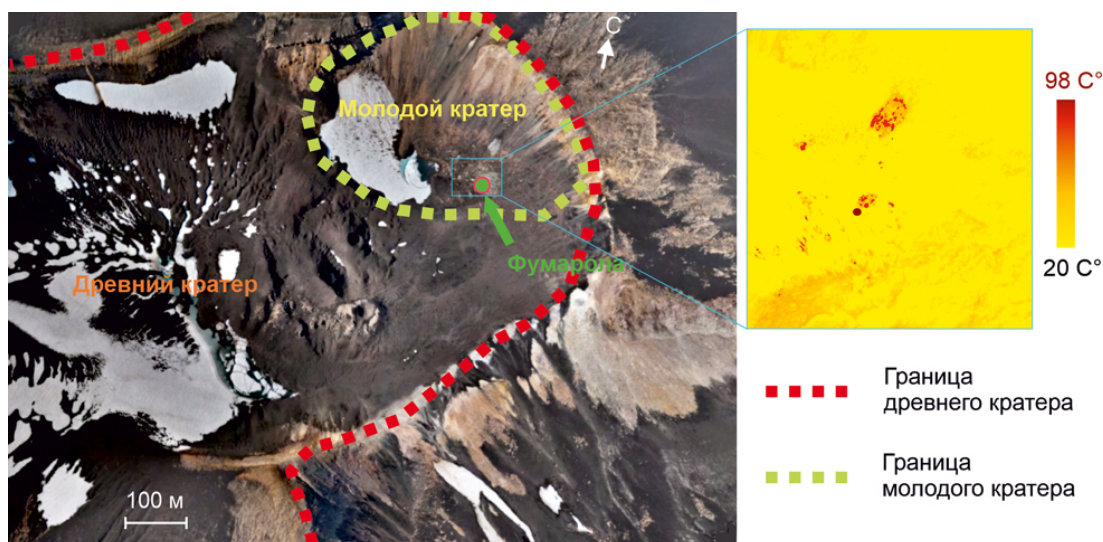


Рис. 9. Южная вершинная часть вулкана Татаринова в видимом диапазоне с выделенным участком фумарольного поля, представленным справа в инфракрасном диапазоне.

Fig. 9. The southern summit part of Tatarinov volcano in the visible range with a highlighted section of the fumarole field, shown on the right in the infrared range.

ми андезибазальтов). На поверхности отмечено значительное количество воронок диаметром от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров (рис. 10), формирование которых, предположительно, связано с неравномерным таянием погребенного под шлаком снега.

На северо-восточной части кромки кратера обнаружено большое количество обломков самородной серы от разрушенной затухшей сольфатары, вероятно прекратившей свою активность в 1959 г. [5, 6]. В пределах молодого кратера отмечены прогретые участки с температурами 40–60 °C, поверхность которых покрыта бело-серо-желтыми возгонами. Наиболее высокая температура зафиксирована в пределах фумарольного поля размерами около 2 × 2 м, которое расположено в юго-восточной части «молодого» кратера (рис. 9). Оно характеризуется несколькими активными выходами парогазовых струй. В местах выхода газа формируются плотные сливные агрегаты самородной серы, а на периферии – тонковолокнистые игольчатые (рис. 11). Максимальная зарегистрированная температура – 98 °C.

В устьевых участках рек и крупных ручьев бухты Крашенинникова были измерены температуры и водородный показатель (pH). Во всех опробованных в бухте Крашенинникова водотоках наблюдались воды с pH 7.2–7.5, кроме р. Кири, где измеренный pH составил 5.3.



Рис. 10. Воронки в кратере вулкана Татаринова. Фото Н.К. Самаркиной.

Fig. 10. Funnels in the crater of Tatarinov volcano. Photo by N.K. Samarkina.

Для изучения почвенного покрова юго-западной части о. Парамушир производились закладки почвенных разрезов с отбором материала в точках, указанных на рис. 1: в нижней части потока, исходящего из бокового конуса вулкана Чикурачки; на юго-восточном склоне вулкана Фусса; в районе потока Ломоносова; а также на плейстоценовом основании, общем для близлежащих вулканов.

На исследуемой территории почвенно-пирокластический чехол хорошо развит, его строение включает многочисленные слои тефры, перекрывающие органоминеральные и органоминеральные горизонты различной степени гумусированности. В отличие от синлитогенных почв, где тефра выполняет роль минеральной основы в процессах почвообразования, в торфяниках отмечается наибольшая сохранность пирокластического материала (рис. 12), что было отмечено также предшественниками [7]. Дальнейшее изучение отобранного материала будет

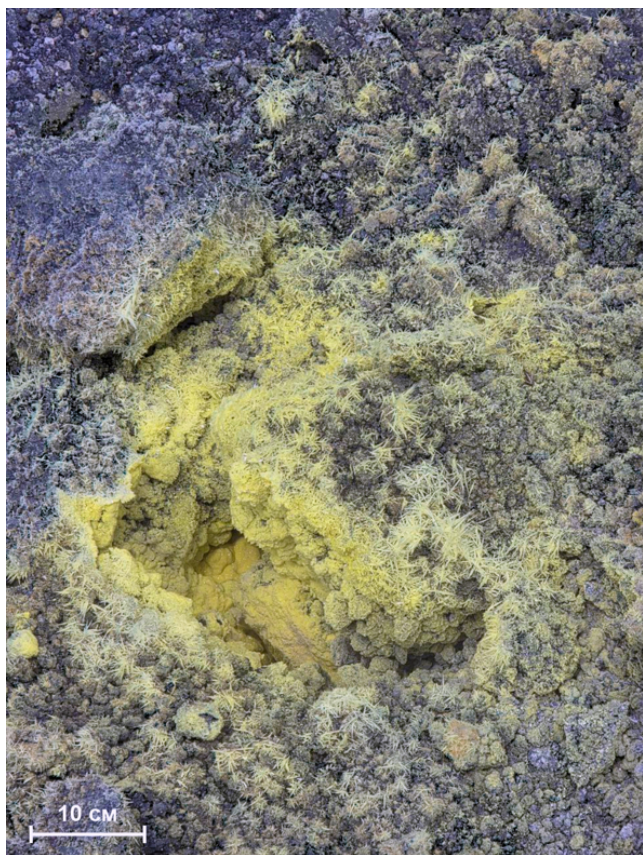


Рис. 11. Фумарола с игольчатыми кристаллами серы в кратере вулкана Татаринова. Фото Н.К. Самаркиной.

Fig. 11. Fumarole with needle-shaped sulfur crystals in the crater of Tatarinov volcano. Photo by N.K. Samarkina.

осуществляться с использованием химико-минералогического анализа для установления генетической принадлежности и связи с конкретными вулканическими извержениями.

Таким образом, в ходе полевых работ в бухте Крашенинникова получен комплекс новых данных о геологическом строении, минералого-петрографических особенностях и гидротермально-вулканических процессах исследуемого района. Установлено, что плейстоценовый фундамент вулканов Чикурачки, Татаринова и Ломоносова сложен пирокластическим материалом, перекрытым лавами и кластолавами андезитового и андезибазальтового состава с характерным преобладанием плагиоклаза среди вкрапленников. Отмечены свежие осыпи пород, что свидетельствует о высокой тектонической и сейсмической активности территории.

Гидрохимические исследования показали локальное проявление кислых вод в бассейне р. Кири, вероятно связанных с выносом продуктов гидротермальной или вулканической деятельности. В кратере вулкана Татаринова выявлены участки парогазовой активности, где происходят современные процессы минералообразования.

Полученный в результате проведенных полевых исследований ценный фактический материал станет базой для углубленного изучения минералого-геохимических характеристик пород и оценки современных гидротермальных процессов в районе бухты Крашенинникова.

Список литературы

1. Hasegawa T., Nakagawa M., Yoshimoto M., Ishizuka Y., Hirose W., Seki S., Ponomareva V., Rybin A. **2011**. Tephrostratigraphy and petrological study of Chikurachki and Fuss volcanoes, Paramushir Island, northern Kurils: Evaluation of Holocene eruptive activity and temporal change of magma system. *Quaternary International*, 246(1–2): 278–297. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.06.047>
2. Набоко С.И. **1963**. *Гидротермальный метаморфизм пород в вулканических областях*. М.: Изд-во Академии наук СССР, 172 с.
3. Горшков Г.С. **1967**. *Вулканизм Курильской островной дуги*. М.: Наука, с. 41–45.
4. Горшков Г.С. **1958**. Действующие вулканы Курильской островной дуги. В кн.: *Молодой вулканизм СССР: Труды Лаборатории вулканологии АН СССР*, 13: 5–70.



современные
эутрофно-торфяные
горизонты,
чередующиеся
со светлым
пирокластическим
материалом

окисленная часть тефры

переотложенная
несортированная
базальтовая тефра

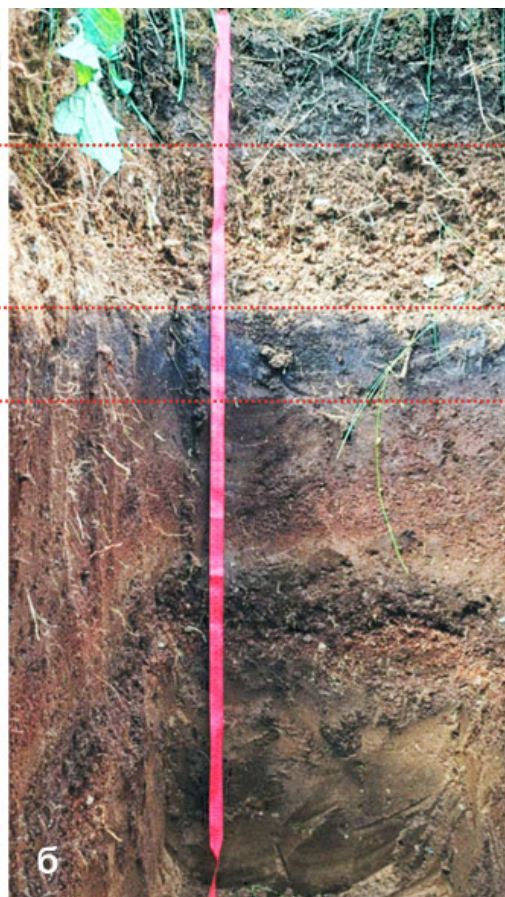
а

современные процессы
почвообразования

светлая тефра, пемза

погребённый гумусовый
горизонт

пирокластический
материал



б

Рис. 12. Почвенный профиль фронтальной части голоценового потока вулкана Ломоносова (а) и почвенно-пирокластический чехол склона вулкана Фусса (б). Фото В. Бутрис.

Fig. 12. Soil profile of the frontal part of the Holocene flow of Lomonosov volcano (а) and soil-pyroclastic cover of the slope of Fussa volcano (б). Photo by V. Butris.

5. Горшков Г.С. 1954. Хронология извержений вулканов Курильской гряды (1713–1952 гг.). *Труды лаборатории вулканологии АН СССР*, 8: 58–99.
6. Шилов В.Н., Воронова Л.Г. 1962. Состояние действующих вулканов северной группы Курильских островов летом 1959 г. и некоторые сведения об извержении вулкана Чикурачки в мае 1958 г. *Труды СакхКНИИ*, 12: 114–126.
7. Белоусов А.Б., Белоусова М.Г., Гришин С.Ю., Крестов П.В. 2003. Исторические извержения вулкана Чикурачки (о. Парамушир, Курильские острова). *Вулканология и сейсмология*, 3: 15–34.
2. Naboko S.I. 1963. [*Hydrothermal metamorphism of rocks in volcanic regions*]. Moscow: Publ. House of the USSR Academy of Sciences, 172 p. (In Russ.).
3. Gorshkov G.S. 1967. [*Volcanism of the Kuril island arc*]. Moscow: Nauka, p. 41–45. (In Russ.).
4. Gorshkov G.S. 1958. Active volcanoes of the Kuril island arc. In: *Young volcanism of the USSR: Proceedings of the Laboratory of Volcanology of the USSR Academy of Sciences*, 13: 5–70. (In Russ.).
5. Gorshkov G.S. 1954. [Chronology of volcanic eruptions of the Kuril Ridge (1713–1952)]. *Proceedings of the Laboratory of Volcanology of the USSR Academy of Sciences*, 106(8): 58–99. (In Russ.).
6. Shilov V.N., Voronova L.G. 1962. [The state of active volcanoes of the northern group of Kuril Islands in the summer of 1959 and some information about the eruption of Chikurachki volcano in May 1958]. *Transactions of SakhKNII*, 12: 114–126. (In Russ.).
7. Belousov A.B., Belousova M.G., Grishin S.Yu., Krestov P.V. 2003. Historical eruptions of Chikurachki volcano (Paramushir I., Kuriles). *J. of Volcanology and Seismology*, 3: 15–34. (In Russ.).

References

1. Hasegawa T., Nakagawa M., Yoshimoto M., Ishizuka Y., Hirose W., Seki S., Ponomareva V., Rybin A. 2011. Tephrostratigraphy and petrological study of Chikurachki and Fuss volcanoes, Paramushir Island, northern Kurils: Evaluation of Holocene eruptive activity and temporal change of magma system. *Quaternary International*, 246(1–2): 278–297. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.06.047>

Об авторах

Самаркина Настасья Константиновна (<https://orcid.org/0009-0008-7545-7247>), магистрант, инженер, лаборатория вулканохимии, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, nastasya.samarkina@bk.ru

Ермолинский Андрей Борисович (<https://orcid.org/0009-0009-5566-1221>), аспирант, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, ermolinskiyab@my.msu.ru

Зверева Мария Львовна, студент, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, mlz17@mail.ru

Бутрис Вероника, магистрант, инженер, лаборатория вулканохимии, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, veronikabutris@gmail.com

Нуждаев Антон Алексеевич (<https://orcid.org/0000-0002-8973-1015>), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией вулканохимии, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, nuzhdaev@gmail.com

Григорьева Софья Борисовна (<https://orcid.org/0009-0009-5947-3594>), студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, s.grigr1902@gmail.com

Кузнецов Руслан Алексеевич (<https://orcid.org/0009-0006-1817-8036>), научный сотрудник, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, ruslanalexeevich@yandex.ru

Титов Юрий Алексеевич (<https://orcid.org/0000-0002-6970-0916>), научный сотрудник, лаборатория автоматизации измерений и цифровой обработки сигналов, Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия, toplm@mail.ru

About the Authors

Samarkina, Nastasia K. (<https://orcid.org/0009-0008-7545-7247>), Graduate Student, Research Engineer, the Laboratory of volcanochimistry, Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, nastasya.samarkina@bk.ru

Ermolinskiy, Andrey B. (<https://orcid.org/0009-0009-5566-1221>), Postgraduate Student, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, ermolinskiyab@my.msu.ru

Zvereva, Maria L., Student, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia, mlz17@mail.ru

Butris, Veronika, Graduate Student, Research Engineer, the Laboratory of volcanochimistry, Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, veronikabutris@gmail.com

Nuzhdaev, Anton A. (<https://orcid.org/0000-0002-8973-1015>), Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Head of the Laboratory of volcanochimistry, Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, nuzhdaev@gmail.com

Grigorieva, Sofia B. (<https://orcid.org/0009-0009-5947-3594>), Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia, s.grigr1902@gmail.com

Kuznetsov, Ruslan A. (<https://orcid.org/0009-0006-1817-8036>), Researcher, Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, ruslanalexeevich@yandex.ru

Titov, Yuriy A. (<https://orcid.org/0000-0002-6970-0916>), Researcher, Laboratory of automation of measurements and digital signal processing, Institute of Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia, toplm@mail.ru

Поступила 30.10.2025

Принята к публикации 20.11.2025

Received 30 October 2025

Accepted 20 November 2025

**Тематический указатель материалов, опубликованных в журнале
«Геосистемы переходных зон» в 2025 г. (том 9)**

Автор(ы). Название	Номер: страницы
Геофизика. Сейсмология	
<i>Шевченко Ю.В.</i> Некоторые особенности морфологии сейсмофокальной зоны Камчатского региона. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.005-021 ; https://www.elibrary.ru/tnsita	1: 5–21
<i>Сафонов Д.А.</i> Новые переходные соотношения для энергетических характеристик землетрясений Сахалинского региона. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.022-036 ; https://www.elibrary.ru/wqiuqw	1: 22–36
<i>Стовбун Н.С., Закупин А.С., Богомолов Л.М., Костылев Д.В., Дудченко И.П., Гуляков С.А.</i> Вариации вертикальной компоненты электротеллурического поля на Южно-Сахалинском геофизическом полигоне в 2024 году. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.2.125-144 ; https://www.elibrary.ru/ttjeoc	2: 125–144
<i>Сычев В.Н., Богомолов Л.М.</i> Динамические параметры очагов землетрясений на острове Сахалин в 1978–2024 гг. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.238-255 ; https://www.elibrary.ru/dcgjno	3: 238–255
<i>Закупин А.С.</i> Прогноз землетрясений методом LURR на Сахалине в режиме реального времени. Результаты мониторинга в 2023–2025 гг. и их оценка в связи с мегаземлетрясением на Камчатке 30.07.2025, M 8.8. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.256-264 ; https://www.elibrary.ru/eaazgl	3: 256–264
<i>Александров П.Н., Стасенко Л.В.</i> Определение моментов времени вступления сейсмических сигналов на основе анализа их фазовых характеристик. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.0.doa-355 ; https://elibrary.ru/pnohgu	3: 265–276
Геотектоника и геодинамика. Геофизика	
<i>Каменев П.А., Маринин А.В., Сим Л.А., Богомолов Л.М., Лукманов А.Р., Дегтярев В.А.</i> Тектонофизическая цифровая база данных территории острова Сахалин. URL: http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-1-3.pdf ; https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.037-055	1: 37–55
<i>Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Фролов Д.И., Тен А.С.</i> Современные движения и деформации центральной части острова Сахалин. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.0.rma-361 ; https://www.elibrary.ru/zlcdn	3: 225–237
<i>Сим Л.А., Гордеев Н.А., Сычева Н.А.</i> Неотектонические и современные напряжения Степного Крыма. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.345-360 ; https://www.elibrary.ru/gwpjld	4: 345–360
Петрология, вулканология. Геохимия	
<i>Дегтерев А.В.</i> Эксплозивная активность вулкана Атсонупури в позднем голоцене (о. Итуруп, Южные Курильские острова): предварительные данные. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.073-091 ; https://www.elibrary.ru/hwyzwe	1: 73–91
<i>Мальшиев А.И., Мальшиева Л.К.</i> Водно-осажденная сера вулканов Головинна и Менделеева (остров Кунашир, Южные Курильские острова, Россия). https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.452-477 ; https://www.elibrary.ru/zblqvw	4: 452–477
<i>Дегтерев А.В., Романюк Ф.А.</i> Полевые исследования ультракислых термальных источников «Голубые озера» на вулкане Баранского (о. Итуруп, Южные Курильские острова) в 2025 г. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.478-484 ; https://www.elibrary.ru/scfbav	4: 478–484
<i>Самаркина Н.К., Ермолинский А.Б., Зверева М.Л., Бутрис В., Нуржаев А.А., Григорьева С.Б., Кузнецов Р.А., Титов Ю.А.</i> Полевые работы в бухте Крашенинникова и на хребте Карпинского (остров Парамушир, Северные Курильские острова) в 2025 году. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.485-494 ; https://www.elibrary.ru/emoeme	4: 485–494
Геология, поиск, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений	
<i>Булгаков Р.Ф., Богомолов Л.М.</i> Методический эксперимент по применению цеолитизированных туфов для обнаружения низких концентраций углеводородов в среде, моделирующей придонные осадки. URL: http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-3-8.pdf ; https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.325-331	3: 325–331
Океанология	
<i>Королев Ю.П., Королев П.Ю.</i> Оценка цунами в Тихом океане, вызванного взрывом вулкана Хунга Тонга–Хунга Ха-апай 15 января 2022 г., экспресс-методом оперативного прогноза. URL: http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-1-4.pdf ; https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.056-065	1: 56–65
<i>Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Борисов А.С., Зарочинцев В.С., Кириллов К.В.</i> Влияние широтного положения и ледового покрова на волновые и температурные процессы в морях Лаптевых и Охотском. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.2.145-163 ; https://www.elibrary.ru/vnnhfw	2: 145–163
<i>Холмогоров А.О., Сырбу Н.С., Лобанов В.Б., Жердев П.Д., Мальцева Е.В.</i> Геологические и гидрологические факторы формирования полей повышенных концентраций метана на восточном шельфе острова Сахалин. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.0.gah-1 ; https://elibrary.ru/wvbsfw	2: 164–181
<i>Королёв Ю.П.</i> Волны в слое жидкости, возбуждаемые вариациями давления над свободной поверхностью. URL: http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-0-2.pdf ; https://doi.org/10.30730/gtr.2025.0.wif-2	3: 277–285
<i>Горбов М.И., Салюк П.А., Павлов А.Н., Гаревских Г.П.</i> Анализ зависимости показателя ослабления подводной фотосинтетически активной радиации от концентрации хлорофилла-а и окрашенных растворенных органических веществ в отдельных районах залива Петра Великого. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.361-369 ; https://www.elibrary.ru/yeqyta	4: 361–369
<i>Кайстренко В.М., Виллис П., Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Шевченко Г.В., Королёв Ю.П.</i> Землетрясение и цунами 4(5) октября 1994 года на побережье Южных Курильских островов (взгляд 30 лет спустя). https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.370-386 ; https://www.elibrary.ru/yvnskm	4: 370–386

Геоморфология и палеогеография	
Козлов Д.Н., Жарков Р.В. Новые данные о морфологии котловины озера Кипящее (вулкан Головинна, о. Кунашир, Курильские о-ва): по результатам работ 2023 г. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.2.213-220 ; https://www.elibrary.ru/kqsgqa	2: 213–220
Назаров Н.Н. Гидролого-морфологический подход при установлении верхней (речной) границы устьевой области реки. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.387-397 ; https://www.elibrary.ru/zieudx	4: 387–397
Геоинформатика и картография	
Сенкевич Ю.И., Мищенко М.А. Определение оптимальной длительности временного окна для выделения аномалий акустической эмиссии перед сильными землетрясениями на Камчатке. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.410-419 ; https://www.elibrary.ru/reyvch	4: 410–419
Имашев С.А., Нигматуллин Р.Р. Разделение взрывов и землетрясений по информативным характеристикам сейсмического сигнала на основе методов машинного обучения. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.420-438 ; https://www.elibrary.ru/alymzd	4: 420–438
Механика деформируемого твердого тела. Математика	
Глячев В.Б., Уихо Д.С. О траекториях динамической системы Селькова, описывающей автоколебания источников микросейсм. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.066-072 ; https://www.elibrary.ru/xuvcpw	1: 66–72
Левин Л.Ю., Семин М.А., Вишивков А.Н., Пантелеев И.А., Бублик С.А., Угольников М.В., Ложкин Д.В., Плехов О.А. Экспериментальное исследование закономерностей тепломассопереноса во влажном засоленном песке при осевом замораживании. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.439-451 ; https://www.elibrary.ru/nohjvd	4: 439–451
Геоэкология. Гидрогеохимия. Экология	
Коренева Т.Г., Сырбу И.В., Ведерникова А.А., Марыжгихин В.Е., Мазанова А.Д. Подход к определению региональных нормативов содержания веществ двойного генезиса в морских водах побережья юго-западного Сахалина с учетом естественного гидрохимического фона. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.092-106 ; https://www.elibrary.ru/awwft	1: 92–106
Брагин И.В., Челноков Г.А., Лаврушин В.Ю., Павлов А.А., Челнокова Б.И., Харитонов Н.А. Современное состояние источников и генетическое разнообразие углекислых минеральных вод Приморского края. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.398-409 ; https://www.elibrary.ru/xsyomt	4: 398–409
Экология. Биология	
Косарев А.В., Сергеева И.В., Ключиков А.В., Чумакова С.В., Леонтьев А.А. Характеристика древесной растительности лесного биогеоценоза с применением искусственного интеллекта на основе данных дистанционного зондирования. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.286-298 ; https://www.elibrary.ru/fvkynr	3: 286–298
Мухаметова О.Н., Мухаметов И.Н. Условия нереста японского анчоуса <i>Engraulis japonicus</i> (Engraulidae) в юго-восточной части Сахалинского залива (Охотское море). https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.299-324 ; https://www.elibrary.ru/klqatc	3: 299–324
Мониторинг опасных геологических процессов	
Сафонов Д.А., Семенова Е.П., Костылев Д.В., Щукин М.А. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2024 году. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.2.182-196 ; https://www.elibrary.ru/xzupuo	2: 182–196
Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Вулканическая активность на Курильских островах в 2024 году: вулкан Эбеко (о. Парамушир). https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.2.197-203 ; https://www.elibrary.ru/fzefsa	2: 197–203
Жарков Р.В. Дистанционные видеонаблюдения извержения Главного Пугачевского грязевого вулкана (остров Сахалин) 15 января 2025 г. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.2.204-212 ; https://www.elibrary.ru/hxhvyu	2: 204–212
Хроника научной жизни. Дальневосточные ученые	
Дальний Восток России в международной морской научной деятельности и в Десятилетии ООН наук об океане в интересах устойчивого развития. Р.Б. Шакиров, Н.С. Сырбу, А.С. Макушев. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.107-111	1: 107–111
Кремнева И.П., Веселов О.В., Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Вулканологические исследования на Сахалине и Курильских островах под руководством В.Н. Шиловой в 1958–1971 годах (из истории ИМГиГ ДВО РАН). https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.332-340 ; https://www.elibrary.ru/ttepew	3: 332–340

Topical index of articles published in the journal “Geosystems of Transition Zones” in 2025 (Volum 9)

Author(s). Title	Issue: Pages
Geophysics. Seismology	
Shevchenko Yu.V. Some features of the morphology of the seismic focal zone of the Kamchatka region. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.005-021 ; https://www.elibrary.ru/tnsita	1: 5–21
Safonov D.A. New transition relationships for the energy characteristics of earthquakes in the Sakhalin region. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.022-036 ; https://www.elibrary.ru/wqiuqvw	1: 22–36
Stovbun N.S., Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Kostylev D.V., Dudchenko I.P., Gulyakov S.A. Variations in the vertical component of the electrotelluric field at the Yuzhno-Sakhalinsk geophysical test site in 2024. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.2.125-144 ; https://www.elibrary.ru/trjeoc	2: 125–144

<i>Sychev V.N., Bogomolov L.M.</i> Dynamic parameters of earthquake sources that occurred on Sakhalin Island in 1978–2024. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.238-255 ; https://www.elibrary.ru/dcgjno	3: 238–255
<i>Zakupin A.S.</i> Real-time LURR earthquake forecast in Sakhalin. Results of the monitoring in 2023–2025 and their assessment in connection with the megathrust earthquake in Kamchatka on July 30, 2025, <i>M</i> 8.8. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.256-264 ; https://www.elibrary.ru/eaazgl	3: 256–264
<i>Aleksandrov P.N., Stasenkov L.V.</i> Determination of the timing of the entry of seismic signals based on the analysis of their phase characteristics. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.0.doa-355 ; https://elibrary.ru/pnohgu	3: 265–276
Geotectonics and geodynamics. Geophysics.	
<i>Kamenev P.A., Marinin A.V., Sim L.A., Bogomolov L.M., Lukmanov A.R., Degtyarev V.A.</i> Tectonophysical digital database of Sakhalin Island. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.037-055 ; https://www.elibrary.ru/ouzgfu	1: 37–55
<i>Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I., Ten A.S.</i> Recent movements and deformations in Central Sakhalin. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.0.rma-361 ; https://www.elibrary.ru/zlcmdns	3: 225–237
<i>Sim L.A., Gordeev N.A., Sycheva N.A.</i> Neotectonic and modern stresses of Steppe Crimea. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.345-360 ; https://www.elibrary.ru/gwpjdd	4: 345–360
Petrology and volcanology. Geochemistry	
<i>Degterev A.V.</i> Late Holocene explosive activity of the Atsonupuri volcano (Iturup Island, Southern Kuril Islands): preliminary results. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.073-091 ; https://www.elibrary.ru/hwyzwe	1: 73–91
<i>Malyshev A.I., Malysheva L.K.</i> Water-deposited sulfur of Golovnin and Mendelev volcanoes (Kunashir Island, Southern Kuril Islands, Russia). URL: http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2025-4-9.pdf ; https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.452-477	4: 452–477
<i>Degterev A.V., Romanyuk F.A.</i> Field study of the ultra-acidic thermal springs «Blue Lakes» on Baransky volcano (Iturup Island, Southern Kuril Islands) in 2025. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.478-484 ; https://www.elibrary.ru/scfbav	4: 478–484
<i>Samarkina N.K., Ermolinskiy A.B., Zvereva M.L., Butris V., Nuzhdaev A.A., Grigorieva S.B., Kuznetsov R.A., Titov Yu.A.</i> Fieldwork in Krashenninnikov Bay and the Karpinsky Ridge (Paramushir Island, Northern Kuril Islands) in 2025. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.485-494 ; https://www.elibrary.ru/emoeme	4: 485–494
Geology, exploration and exploitation of oil and gas deposits	
<i>Bulgakov R.F., Bogomolov L.M.</i> Methodical experiment on the use of zeolitized tuffs to detect low concentrations of hydrocarbons in an environment simulating bottom sediments. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.325-331 ; https://www.elibrary.ru/stwzom	3: 325–331
Oceanology	
<i>Korolev Yu.P., Korolev P.Yu.</i> Assessment of the tsunami in the Pacific Ocean caused by the explosion of the Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano on January 15, 2022, using the express method of operational forecasting. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.056-065 ; https://www.elibrary.ru/kktwzl	1: 56–65
<i>Kovalev D.P., Kovalev P.D., Borisov A.S., Zarochintsev V.S., Kirillov K.V.</i> Impact of latitudinal position and ice cover on wave and temperature dynamics in the Laptev Sea and the Sea of Okhotsk. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.2.145-163 ; https://www.elibrary.ru/vnnhvjw	2: 145–163
<i>Kholmogorov A.O., Syrbu N.S., Lobanov V.B., Zherdev P.D., Maltseva E.V.</i> Geological and hydrological factors of dissolved methane distribution on the eastern shelf of Sakhalin Island. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.0.gah-1 ; https://elibrary.ru/wvbsfw	2: 164–181
<i>Korolev Yu.P.</i> Waves in a fluid layer excited by pressure variations above the free surface. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.0.wif-2 ; https://elibrary.ru/loobrn	3: 277–285
<i>Gorbov M.I., Salyuk P.A., Pavlov A.N., Garevskikh G.P.</i> Dependence of the diffuse attenuation coefficient for underwater photosynthetically active radiation on chlorophyll-a and colored dissolved organic matter in Peter the Great Bay. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.361-369 ; https://www.elibrary.ru/yeqyta	4: 361–369
<i>Kaistrenko V.M., Willis P., Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Shevchenko G.V., Korolev Yu.P.</i> Earthquake and tsunami of October 4(5), 1994, on the coast of the Southern Kuril Islands (a look 30 years later). https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.370-386 ; https://www.elibrary.ru/yvnskm	4: 370–386
Geomorphology and paleogeography	
<i>Kozlov D.N., Zharkov R.V.</i> New data on the morphology of Kipyashchee lake (Golovnin volcano, Kunashir Isl., Kuril Islands) based on the 2023 study results. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.2.213-220 ; https://www.elibrary.ru/kqsgqa	2: 213–220
<i>Nazarov N.N.</i> Hydrological and morphological approach to establishing the upper (river) boundary of the river mouth area. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.387-397 ; https://www.elibrary.ru/zieudx	4: 387–397
Geoinformatics and cartography	
<i>Senkevich Yu.I., Mishchenko M.A.</i> Searching the optimal time window duration for detecting acoustic emission anomalies preceding major earthquakes on Kamchatka. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.410-419 ; https://www.elibrary.ru/reyvch	4: 410–419
<i>Imashev S.A., Nigmatullin R.R.</i> Discrimination between explosions and earthquakes based on informative seismic signal features using machine learning methods. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.420-438 ; https://www.elibrary.ru/alyzmd	4: 420–438
Mechanics of deformable solids. Mathematics	
<i>Glachev V.B., Ushkho D.S.</i> On the trajectories of the Selkov dynamic system describing the self-oscillation of microseism sources. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.066-072 ; https://www.elibrary.ru/xuvcpw	1: 66–72

Levin L.Y., Semin M.A., Vshivkov A.N., Panteleev I.A., Bublik S.A., Ugolnikov M.V., Lozhkin D.V., Plekhov O.A. Experimental study of heat and mass transfer in moist saline sand under axial freezing. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.439-451 ; https://www.elibrary.ru/nohjvd	4: 439–451
Geocology. Gydrogeochemistry. Ecology	
Koreneva T.G., Syrбу I.V., Vedernikova A.A., Maryzhikhin V.E., Mazanova A.D. An approach to determining regional standards for the concentration of natural or anthropogenic substances in the coastal waters of southwestern Sakhalin, taking into account the natural hydrochemical background. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.092-106 ; https://www.elibrary.ru/awweft	1: 92–106
Bragin I.V., Chelnokov G.A., Lavrushin V.Yu., Pavlov A.A., Chelnokova B.I., Kharitonova N.A. Current state of springs and genetic diversity of high PCO ₂ mineral waters of Primorsky Krai. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.398-409 ; https://www.elibrary.ru/xsyomt	4: 398–409
Ecology. Biology	
Kosarev A.V., Sergeeva I.V., Klyuchikov A.V., Chumakova S.V., Leontiev A.A. Characterization of the woody vegetation of the forest biogeocenosis using artificial intelligence based on remote sensing data. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.286-298 ; https://www.elibrary.ru/fvkynr	3: 286–298
Moukhametova O.N., Moukhametov I.N. Spawning conditions of Japanese anchovy <i>Engraulis japonicus</i> (Engraulidae) in the southeastern part of Sakhalin Gulf (the Sea of Okhotsk). https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.299-324 ; https://www.elibrary.ru/klqatc	3: 299–324
Monitoring of geological hazards	
Safonov D.A., Semenova E.P., Kostylev D.V., Shchukin M.A. Seismicity of the south of the Russian Far East in 2024. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.2.182-196 ; https://www.elibrary.ru/xzupuo	2: 182–196
Degterev A.V., Chibisov M.V. The volcanic activity on the Kuril Islands in 2024: Ebeko volcano (Paramushir Island). https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.2.197-203 ; https://www.elibrary.ru/fzefsa	2: 197–203
Zharkov R.V. Remote video surveillance of the eruption of Main Pugachev mud volcano (Sakhalin Island) on January 15, 2025. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.2.204-212 ; https://www.elibrary.ru/hxhvyu	2: 204–212
Current scientific events	
The Russian Far East in the international marine scientific activity and the UN Decade of Ocean Sciences for Sustainable Development. R.B. Shakirov, N.S. Syrбу, A.S. Makushev. https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.107-111	1: 107–111
Kremneva I.P., Veselov O.V., Degterev A.V., Chibisova M.V. The volcanological studies in Sakhalin and the Kuril Islands under the leadership of Vsevolod N. Shilov in 1958–1971 (from the history of IMGG FEB RAS). https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.332-340 ; https://www.elibrary.ru/ttepcw	3: 332–340

Авторский указатель публикаций в журнале «Геоcистемы переходных зон» в 2025 г. (том 9)

Автор(ы). Название	Номер: страницы
Александров П.Н., Стасенко Л.В. Определение моментов времени вступления сейсмических сигналов на основе анализа их фазовых характеристик.	3: 265–276
Богомолов Л.М. см. Каменев П.А. 1: 37–55; Он же см. Стовбун Н.С. 2: 125–144; Он же см. Булгаков Р.Ф. 3: 325–331; Он же см. Сычев В.Н. 3: 238–255	
Борисов А.С. см. Ковалев Д.П. 2: 145–163	
Брагин И.В., Челноков Г.А., Лаврушин В.Ю., Павлов А.А., Челнокова Б.И., Харитонов Н.А. Современное состояние источников и генетическое разнообразие углекислых минеральных вод Приморского края.	4: 398–409
Бублик С.А. см. Левин Л.Ю. 4: 439–451	
Булгаков Р.Ф., Богомолов Л.М. Методический эксперимент по применению цеолитизированных туфов для обнаружения низких концентраций углеводородов в среде, моделирующей придонные осадки.	3: 325–331
Бутрис В. см. Самаркина Н.К. 4: 485–494	
Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Фролов Д.И., Тен А.С. Современные движения и деформации центральной части острова Сахалин.	3: 225–237
Ведерникова А.А. см. Коренева Т.Г. 1: 92–106	
Веселов О.В. см. Кремнева И.П. 3: 332–340	
Виллис П. см. Кайстренко В.М. 4: 370–386	
Вшивков А.Н. см. Левин Л.Ю. 4: 439–451	
Ганзей Л.А. см. Кайстренко В.М. 4: 370–386	
Гаревских Г.П. см. Горбов М.И. 4: 361–369	
Горбов М.И., Салюк П.А., Павлов А.Н., Гаревских Г.П. Анализ зависимости показателя ослабления подводной фотосинтетически активной радиации от концентрации хлорофилла-а и окрашенных растворенных органических веществ в отдельных районах залива Петра Великого.	4: 361–369
Гордеев Н.А. см. Сим Л.А. 4: 345–360	

Григорьева С.Б. см. Самаркина Н.К. 4: 485–494	
Гуляков С.А. см. Стовбун Н.С. 2: 125–144	
Дальний Восток России в международной морской научной деятельности и в Десятилетии ООН наук об океане в интересах устойчивого развития. Р.Б. Шакиров, Н.С. Сырбу, А.С. Макушев.	1: 107–111
Дегтерев А.В., Романюк Ф.А. Полевые исследования ультракислых термальных источников «Голубые озера» на вулкане Баранского (о. Итуруп, Южные Курильские острова) в 2025 г.	4: 478–484
Дегтерев А.В. см. Кремнева И.П. 3: 332–340	
Дегтерев А.В. Эксплозивная активность вулкана Атсонупури в позднем голоцене (о. Итуруп, Южные Курильские острова): предварительные данные.	1: 73–91
Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Вулканическая активность на Курильских островах в 2024 году: вулкан Эбеко (о. Парамушир).	2: 197–203
Дегтярев В.А. см. Каменев П.А. 1: 37–55	
Дудченко И.П. см. Стовбун Н.С. 2: 125–144	
Ермолинский А.Б. см. Самаркина Н.К. 4: 485–494	
Жарков Р.В. Дистанционные видеонаблюдения извержения Главного Пугачевского грязевого вулкана (остров Сахалин) 15 января 2025 г.	2: 204–212
Жарков Р.В. см. Козлов Д.Н. 2: 213–220	
Жердев П.Д. см. Холмогоров А.О. 2: 164–181	
Закупин А.С. Прогноз землетрясений методом LURR на Сахалине в режиме реального времени. Результаты мониторинга в 2023–2025 гг. и их оценка в связи с мегаземлетрясением на Камчатке 30.07.2025, М 8.8.	3: 256–264
Закупин А.С. см. Стовбун Н.С. 2: 125–144	
Зарочинцев В.С. см. Ковалев Д.П. 2: 145–163	
Зверева М.Л. см. Самаркина Н.К. 4: 485–494	
Имашев С.А., Нигматуллин Р.Р. Разделение взрывов и землетрясений по информативным характеристикам сейсмического сигнала на основе методов машинного обучения.	4: 420–438
Кайстренко В.М., Виллис П., Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Шевченко Г.В., Королёв Ю.П. Землетрясение и цунами 4(5) октября 1994 года на побережье Южных Курильских островов (взгляд 30 лет спустя).	4: 370–386
Каменев П.А., Маринин А.В., Сим Л.А., Богомолов Л.М., Лукманов А.Р., Дегтярев В.А. Тектонофизическая цифровая база данных территории острова Сахалин.	1: 37–55
Кириллов К.В. см. Ковалев Д.П. 2: 145–163	
Ключиков А.В. см. Косарев А.В. 3: 286–298	
Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Борисов А.С., Зарочинцев В.С., Кириллов К.В. Влияние широтного положения и ледового покрова на волновые и температурные процессы в морях Лаптевых и Охотском.	2: 145–163
Ковалев П.Д. см. Ковалев Д.П. 2: 145–163	
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.	2: 213–220
Коренева Т.Г., Сырбу И.В., Ведерникова А.А., Марыжгихин В.Е., Мазанова А.Д. Подход к определению региональных нормативов содержания веществ двойного генезиса в морских водах побережья юго-западного Сахалина с учетом естественного гидрохимического фона.	1: 92–106
Королёв П.Ю. см. Королев Ю.П. 1: 56–65	
Королёв Ю.П. Волны в слое жидкости, возбуждаемые вариациями давления над свободной поверхностью.	3: 277–285
Королёв Ю.П. см. Кайстренко В.М. 4: 370–386	
Королёв Ю.П., Королев П.Ю. Оценка цунами в Тихом океане, вызванного взрывом вулкана Хунга Тонга–Хунга Хаапай 15 января 2022 г., экспресс-методом оперативного прогноза.	1: 56–65
Косарев А.В., Сергеева И.В., Ключиков А.В., Чумакова С.В., Леонтьев А.А. Характеристика древесной растительности лесного биогеоценоза с применением искусственного интеллекта на основе данных дистанционного зондирования.	3: 286–298
Костылев Д.В. см. Сафонов Д.А. 2: 182–196; Он же. см. Стовбун Н.С. 2: 125–144	
Кремнева И.П., Веселов О.В., Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Вулканологические исследования на Сахалине и Курильских островах под руководством В.Н. Шилова в 1958–1971 годах (из истории ИМГиГ ДВО РАН).	3: 332–340
Кузнецов Р.А. см. Самаркина Н.К. 4: 485–494	
Лаврушин В.Ю. см. Брагин И.В. 4: 398–409	
Левин Л.Ю., Семин М.А., Вишневков А.Н., Пантелеев И.А., Бублик С.А., Угольников М.В., Ложкин Д.В., Плехов О.А. Экспериментальное исследование закономерностей теплопереноса во влажном засоленном песке при осевом замораживании.	4: 439–451
Леонтьев А.А. см. Косарев А.В. 3: 286–298	
Лобанов В.Б. см. Холмогоров А.О. 2: 164–181	
Ложкин Д.В. см. Левин Л.Ю. 4: 439–451	
Лукманов А.Р. см. Каменев П.А. 1: 37–55	
Мазанова А.Д. см. Коренева Т.Г. 1: 92–106	
Макушев А.С. см. Дальний Восток... 1: 107–111	
Мальшев А.И., Мальшева Л.К. Водно-осажденная сера вулканов Головнина и Менделеева (остров Кунашир, Южные Курильские острова, Россия).	4: 452–477

Малышева Л.К. см. <i>Малышев А.И.</i> 4: 452–477	
Мальцева Е.В. см. <i>Холмогоров А.О.</i> 2: 164–181	
Маринин А.В. см. <i>Каменев П.А.</i> 1: 37–55	
Марыжихин В.Е. см. <i>Коренева Т.Г.</i> 1: 92–106	
Мищенко М.А. см. <i>Сенкевич Ю.И.</i> 4: 410–419	
Мухаметов И.Н. см. <i>Мухаметова О.Н.</i> 3: 299–324	
Мухаметова О.Н., <i>Мухаметов И.Н.</i> Условия нереста японского анчоуса <i>Engraulis japonicus</i> (Engraulidae) в юго-восточной части Сахалинского залива (Охотское море).	3: 299–324
<i>Назаров Н.Н.</i> Гидролого-морфологический подход при установлении верхней (речной) границы устьевой области реки.	4: 387–397
Нигматуллин Р.Р. см. <i>Имашев С.А.</i> 4: 420–438	
Нуждаев А.А. см. <i>Самаркина Н.К.</i> 4: 485–494	
Павлов А.А. см. <i>Брагин И.В.</i> 4: 398–409	
Павлов А.Н. см. <i>Горбов М.И.</i> 4: 361–369	
Пантелеев И.А. см. <i>Левин Л.Ю.</i> 4: 439–451	
Плехов О.А. см. <i>Левин Л.Ю.</i> 4: 439–451	
Прытков А.С. см. <i>Василенко Н.Ф.</i> 3: 225–237	
Разжигаева Н.Г. см. <i>Кайстренко В.М.</i> 4: 370–386	
Романюк Ф.А. см. <i>Дегтерев А.В.</i> 4: 478–484	
Салюк П.А. см. <i>Горбов М.И.</i> 4: 361–369	
<i>Самаркина Н.К., Ермолинский А.Б., Зверева М.Л., Бутрис В., Нуждаев А.А., Григорьева С.Б., Кузнецов Р.А., Титов Ю.А.</i> Полевые работы в бухте Крашенинникова и на хребте Карпинского (остров Парамушир, Северные Курильские острова) в 2025 году.	4: 485–494
<i>Сафонов Д.А.</i> Новые переходные соотношения для энергетических характеристик землетрясений Сахалинского региона.	1: 22–36
<i>Сафонов Д.А., Семенова Е.П., Костылев Д.В., Щукин М.А.</i> Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2024 году.	2: 182–196
Семенова Е.П. см. <i>Сафонов Д.А.</i> 2: 182–196	
Семин М.А. см. <i>Левин Л.Ю.</i> 4: 439–451	
<i>Сенкевич Ю.И., Мищенко М.А.</i> Определение оптимальной длительности временного окна для выделения аномалий акустической эмиссии перед сильными землетрясениями на Камчатке.	4: 410–419
Сергеева И.В. см. <i>Косарев А.В.</i> 3: 286–298	
Сим Л.А. см. <i>Каменев П.А.</i> 1: 37–55	
<i>Сим Л.А., Гордеев Н.А., Сычева Н.А.</i> Неотектонические и современные напряжения Степного Крыма.	4: 345–360
Стасенко Л.В. см. <i>Александров П.Н.</i> 3: 265–276	
<i>Стовбун Н.С., Закупин А.С., Богомолов Л.М., Костылев Д.В., Дудченко И.П., Гуляков С.А.</i> Вариации вертикальной компоненты электротеллурического поля на Южно-Сахалинском геофизическом полигоне в 2024 году.	2: 125–144
Сырбу И.В. см. <i>Коренева Т.Г.</i> 1: 92–106	
Сырбу Н.С. см. <i>Дальний Восток...</i> 1: 107–111; Она же см. <i>Холмогоров А.О.</i> 2: 164–181	
Сычев В.Н., <i>Богомолов Л.М.</i> Динамические параметры очагов землетрясений на острове Сахалин в 1978–2024 гг.	3: 238–255
Сычева Н.А. см. <i>Сим Л.А.</i> 4: 345–360	
Тен А.С. см. <i>Василенко Н.Ф.</i> 3: 225–237	
Титов Ю.А. см. <i>Самаркина Н.К.</i> 4: 485–494	
<i>Тлячев В.Б., Ушхо Д.С.</i> О траекториях динамической системы Селькова, описывающей автоколебания источников микросейсм.	1: 66–72
Угольников М.В. см. <i>Левин Л.Ю.</i> 4: 439–451	
Ушхо Д.С. см. <i>Тлячев В.Б.</i> 1: 66–72	
Фролов Д.И. см. <i>Василенко Н.Ф.</i> 3: 225–237	
Харитонова Н.А. см. <i>Брагин И.В.</i> 4: 398–409	
<i>Холмогоров А.О., Сырбу Н.С., Лобанов В.Б., Жердев П.Д., Мальцева Е.В.</i> Геологические и гидрологические факторы формирования полей повышенных концентраций метана на восточном шельфе острова Сахалин.	2: 164–181
Челноков Г.А. см. <i>Брагин И.В.</i> 4: 398–409	
Челнокова Б.И. см. <i>Брагин И.В.</i> 4: 398–409	
Чибисова М.В. см. <i>Дегтерев А.В.</i> 2: 197–203; Она же см. <i>Кремнева И.П.</i> 3: 332–340	
Чумакова С.В. см. <i>Косарев А.В.</i> 3: 286–298	
Шакиров Р.Б. см. <i>Дальний Восток...</i> 1: 107–111	
Шевченко Г.В. см. <i>Кайстренко В.М.</i> 4: 370–386	
<i>Шевченко Ю.В.</i> Некоторые особенности морфологии сейсмофокальной зоны Камчатского региона.	1: 5–21
Щукин М.А. см. <i>Сафонов Д.А.</i> 2: 182–196	