

VI МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ПРИРОДНЫЕ КАТАСТРОФЫ»

г. Южно-Сахалинск, Сахалинская область

12–16 октября 2026 г.



На конференции будут обсуждаться учеными и специалистами, аспирантами и студентами актуальные научные проблемы, которые волнуют ученых не только Дальневосточного региона России. Среди них природные катастрофы, методы оценки их опасности и риска, а также современные технологии геофизического мониторинга в сейсмоактивных и цунамиопасных регионах.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ:

Исследования Земли: ответ на вызовы природных и техногенных катастроф

Секция посвящена вопросам:

- Геологическое строение земной коры и структур различного масштаба,
- Этапы и стадии развития земной коры и верхней мантии,
- Вещественный состав геологических сред и объектов,
- Поиск и прогнозирование месторождений полезных ископаемых.

Динамика моря и вопросы изменения климата

Секция посвящена вопросам:

- Потоки вещества и энергии в гидросфере,
- Генерация цунами и цунамиопасность,
- Моделирование и прогноз морских опасных явлений,
- Геолого-геоморфологические аспекты освоения морских побережий.

Живые системы и геологическая среда

Секция посвящена вопросам:

- Влияние природных и антропогенных факторов на живые организмы и экосистемы,
- Адаптивные стратегии живых организмов,
- Биологическое разнообразие и инвазии,
- Анализ состояния экосистем по данным аэрокосмических исследований.

Шаг в науку: технологии и практика

Секция посвящена вопросам:

- Инженерные проекты и прототипы для мониторинга природных процессов,
- Цифровые методы анализа геофизических и геозоологических данных,
- Моделирование природных опасностей и их последствий,
- Междисциплинарные студенческие исследования.

К началу работы конференции будут изданы тезисы докладов в авторской редакции. Объем тезисов не должен превышать одну страницу машинописного текста. Избранные доклады по решению Организационного комитета будут опубликованы в журнале ИМГиГ ДВО РАН «Геосистемы переходных зон» (БС-2, входит в Перечень ВАК).

УСЛОВИЯ УЧАСТИЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ ВЗНОС Оплата производится при регистрации.

Для участников конференции **5000 РУБ.** Для аспирантов и молодых учёных до 35 лет **3500 РУБ.**

В оргвзнос входит • организационный набор участника конференции • организация кофе-брейков в дни работы конференции •

ПРОЖИВАНИЕ, ПРОЕЗД И ПРОГРАММА

Проживание: Рекомендуемые гостиницы г. Южно-Сахалинск (вблизи маршрутов общественного транспорта): Lenina Hotel, Монерон, Лотос, Панорама, Командор, Юбилейная. **Проезд:** До Института морской геологии и геофизики можно добраться автобусами 10, 62, 71, 21. Остановка — «Институт морской геологии и геофизики».

Программа будет разослана участникам вместе с третьим циркуляром, а также размещена на сайте конференции.

Для участников конференции предусмотрено проведение экскурсий: посещение Ботанического сада; геологические экскурсии: Взморье или останец Лягушка; малая жемчужина Сахалина: Невельск – Холмск.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:

Долгих Григорий Иванович, академик РАН, профессор, ТОИ ДВО РАН

СОПРЕДСЕДАТЕЛИ:

Аленьков Вячеслав Владимирович, заместитель председателя Правительства Сахалинской области

Зайцев Андрей Иванович, д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, директор СКБ САМИ ДВО РАН

Огнев Алексей Вячеславович, д.ф.-м.н., ректор СахГУ

Ковалев Дмитрий Петрович, д.ф.-м.н., и. о. директора ИМГиГ ДВО РАН

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ:

Андреева Марина Юрьевна, к.ф.-м.н., с.н.с. ИМГиГ ДВО РАН

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ:

Прытков А.С., к.ф.-м.н., в.н.с., зам. директора ИМГиГ ДВО РАН

Верхотуров А.А., к.т.н., ученый секретарь ИМГиГ ДВО РАН

Коцуконь С.Н., операционный директор ПИШ СахГУ

Костылев Д.В., к.т.н., директор СФ ФИЦ ЕГС РАН

Кордюков А.В., к.б.н., директор СФ БСИ ДВО РАН

Деттерев А.В., к.г.-м.н., зав. лабораторией ИМГиГ ДВО РАН

Копанина А.В., к.б.н., зав. лабораторией ИМГиГ ДВО РАН

Борисов А.С., к.т.н., рук. лаборатории ИМГиГ ДВО РАН

Закупин А.С., к.ф.-м.н., в.н.с. ИМГиГ ДВО РАН

Ковтунович П.Ю., вед. инженер ИМГиГ ДВО РАН

АДРЕС ОРГКОМИТЕТА:

Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1 Б
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН
Телефон/факс: 8 (4242) 79-15-17

Web-страница конференции:

<https://imggconf.ru>

E-mail: info@imggconf.ru

ПАРТНЁРЫ И ОРГАНИЗАТОРЫ

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН



Дальневосточное отделение РАН



СФ ФИЦ ЕГС РАН



ФГБОУ ВО «СахГУ»



СКБ САМИ ДВО РАН



СахалинТех



Правительство Сахалинской области

**ОСНОВНЫЕ ДАТЫ:**

до 1 августа – подача регистрационной формы.

до 1 сентября – подача тезисов.

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ:

Заседание секций

г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б.

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 (адро 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 (*физико-математические; технические*).

The Journal is:

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

- 1.6.1. General and Regional Geology. Geotectonics and Geodynamics (*geological and mineralogical*)
- 1.6.3. Petrology and Volcanology (*geological and mineralogical*)
- 1.6.9. Geophysics (*geological and mineralogical; physical and mathematical*)
- 1.6.14. Geomorphology and Paleogeography (*geographical*)
- 1.6.17. Oceanology (*geographical; geological and mineralogical; physical and mathematical*)
- 1.6.20. Geoinformatics and Cartography (*physical and mathematical*)
- 1.6.21. Geoecology (*geographical; geological and mineralogical*)
- 1.5.15. Ecology (*biological*)
- 1.1.8. Mechanics of deformable solids (*physical and mathematical; engineering*).

Адрес учредителя и издателя

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

Postal address

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

© ИМГиГ ДВО РАН, 2026

Редакционная коллегия*Главный редактор*

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

Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

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

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

Editorial Board*Editor-in-Chief*

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Executive Secretary

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

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

Редакционная коллегия

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

Editorial Board

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

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

Переводчик **Чера Анастасия Дмитриевна**

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. 16.04.
 Тираж 150 экз. Заказ 8098. Свободная цена.
 Дата выхода в свет 30.06.2026.

Подписной индекс в Объединенном интернет-каталоге «Пресса России» (www.pressa-ru.ru) – 80882.

По вопросам распространения обращаться также в редакцию.

Translator **Anastasiya D. Chera**

Editor **Galina Ph. Nizyaeva**, Cand. Sci. (Phylology)
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 16.04.
 Number of copies 150. Order no. 8098. Free price.
 Date of publishing 30.06.2026.

Subscription index in the United web-catalogue "Press of Russia" (www.pressa-ru.ru) – 80882.

Please also contact the Editorial Office for distribution.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

Общая и региональная геология. Вулканология

Е.А. Глазырин. К разработке генетической классификации грязевого вулканизма: аналитический обзор. 127

А.В. Дегтерев, М.В. Чибисова. Позднеголоценовый вулканизм кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курильские о-ва): предварительные результаты по данным радиоуглеродного датирования. 158

Е.В. Кожевников, К.П. Казымов, Е.М. Томила, М.С. Турбаков, Е.П. Рябokon, З.Г. Иванов, М.А. Пшевлодский, П.А. Камeneв. Результаты минералого-петрографического исследования кремнистых пород южного Сахалина. 173

Океанология

Д.П. Ковалев, П.Д. Ковалев, А.С. Борисов, В.С. Зарочинцев. Особенности колебаний уровня моря и атмосферного давления на восточном шельфе острова Сахалин. 189

Геофизика, сейсмология

Д.А. Сафонов, Е.П. Семенова, Д.В. Костылев. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2025 году. 205

Ю.И. Сенкевич, Е.И. Малкин, Г.И. Дружин. Методика поиска информативных признаков перед землетрясениями в электромагнитном регулярном шумовом фоне ОНЧ-диапазона . . . 225

Геоинформатика и картография

С.А. Имашев. Методика восстановления пропусков в вариациях геомагнитного поля на основе алгоритмов kNN и MICE. 238

General and regional geology. Volcanology

E.A. Glazyrin. Towards the development of a genetic classification of mud volcanism: An analytical review 127

A.V. Degterev, M.V. Chibisova. Late Holocene volcanic activity in the Medvezhya caldera (Iturup Island, Southern Kuril Islands): preliminary results from radiocarbon dating data. 158

E.V. Kozhevnikov, K.P. Kazymov, E.M. Tomilina, M.S. Turbakov, E.P. Riabokon, Z.G. Ivanov, M.A. Pshevlodskiy, P.A. Kamenev. Results of mineralogical and petrographic study of siliceous rocks of southern Sakhalin. 173

Oceanology

D.P. Kovalev, P.D. Kovalev, A.S. Borisov, V.S. Zarochnitsev. Features of sea level and atmospheric pressure fluctuations on the eastern shelf of Sakhalin Island 189

Geophysics, Seismology

D.A. Safonov, E.P. Semenova, D.V. Kostylev. Seismicity of the south of the Russian Far East in 2025 205

Yu.I. Senkevich, E.I. Malkin, G.I. Druzhin. Methodology for detecting for informative features before earthquakes in the electromagnetic regular noise background of the VLF range. 225

Geoinformatics and cartography

S.A. Imashev. A methodology for imputing missing values in geomagnetic field variations using kNN and MICE algorithms 238

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



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

УДК 551.311.8

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.2.127-157>
<https://www.elibrary.ru/jqceii>

К разработке генетической классификации грязевого вулканизма: аналитический обзор

Е. А. Глазырин

*АО «Южное научно-производственное объединение по морским геологоразведочным работам»,
Геленджик, Россия*

Резюме. Для оценки и прогноза грязевулканической опасности, а также для изучения гео- и флюидодинамики осадочного разреза существенно важна генетическая характеристика грязевого вулканизма. С выявлением новых районов развития грязевого вулканизма мы получаем все больше данных о его гетерогенности, различных генетических особенностях. В настоящем обзоре на основе анализа значительного числа публикаций сделана попытка выделения и систематизации его генетических типов. Выделены классический, гигантских подводных оползней, газогидратный, серпентинитовый, дегляциальный, абиссальный и внутриплитных рифтогенных структур генетические типы. Приводится их характеристика и отличительные особенности. Классический тип грязевого вулканизма наиболее распространен и изучен. Его отличает наибольшее разнообразие морфологии и размеров грязевулканических построек, структурно-тектонического контроля, геодинамической позиции. В нем отмечены три эволюционных этапа – начальный, основной и заключительный, с выделением, соответственно, трех эволюционных типов. Начальный характеризуется неглубокими очагами флюидогенерации и отвечает периоду погружения бассейна седиментации с генерацией биогенного метана. Ему могут предшествовать и сопутствовать интенсивные разгрузки флюидов (метана и/или воды) с формированием покмарков. Основной этап наиболее длительный, соответствует погружению флюидогенерирующих толщ в зону катагенеза с генерацией термогенного метана и воды при иллитизации смектитов. Заключительный эволюционный этап развития классического грязевого вулканизма есть этап отмирания грязевулканической системы в результате ее воздымания и денудации, исчерпания ресурса генерации термогенного метана. Классический грязевой вулканизм можно дополнительно разделить по вкладу глубинных флюидных потоков, вплоть до мантийных, присутствию газогидратов и участию геотермальных флюидов. Газогидратный генетический тип может иметь разновидности по механизму генерации флюидной фазы. Серпентинитовый тип наиболее индивидуален по своим признакам. Проявлен в надсубдукционных зонах как результат прорыва флюидов, образующихся при дегидратации, декарбонизации и метаморфических реакциях, из субдуцирующей плиты в условиях высокого давления и низкой температуры. Дегляциальный, абиссальный и внутриплитных рифтогенных структур типы грязевого вулканизма наименее изучены и требуют верификации. Тип внутриплитных рифтогенных структур по результатам его изучения, возможно, будет отнесен к геотермальным системам в осадочных толщах. Наряду с выделяемыми генетическими типами грязевого вулканизма возможны его полигенные проявления. Предлагаемые подходы к генетической классификации могут подвергнуться критике, но это необходимо для стимулирования исследований в этом направлении.

Ключевые слова: грязевой вулканизм, грязевые вулканы, генетическая классификация, седиментационные бассейны, выходы газа, газогидраты

Towards the development of a genetic classification of mud volcanism: An analytical review

Evgeniy A. Glazyrin

Southern Scientific and Production Association for Marine Geological Explorations JSC, Gelendzhik, Russia

Abstract. Genetic characteristic of mud volcanism is essential for assessing and predicting mud volcanic hazard, as well as for studying the geo- and fluid dynamics of sedimentary sections. With the regular discovery of new areas of mud volcanism, more and more data is emerging on its heterogeneity and various genetic characteristics. This paper

attempts to identify and systematically organize its genetic types, based on an analysis of numerous publications. Following genetic types of mud volcanism were identified: classical, giant submarine landslide, gas hydrate, serpentinite, deglacial, abyssal, and intraplate rift structures. Their characteristics and distinctive features are presented. The classical type of mud volcanism is the most widespread and studied. It exhibits the greatest diversity in the morphology and size of mud volcanic edifices, as well as structural and tectonic controls and geodynamic position. Three evolutionary stages of mud volcanism – initial, main, and final – were distinguished, with three evolutionary types identified, respectively. The initial stage features small fluid-generation foci and corresponds to the stage of sedimentary basin subsidence, with biogenic methane generation. It may be preceded and accompanied by the intense discharge of fluids (methane and/or water), leading to the formation of pockmarks. The main stage is the longest and corresponds to the subsidence of fluid-generating strata into a catagenesis zone, with thermogenic methane generation and smectite illitization. The final evolutionary stage of classical mud volcanism marks the demise of the mud volcanic system as a result of its uplift and denudation, as well as the exhaustion of thermogenic methane generation. Classical mud volcanism can be further classified by the contribution of deep fluid flows, including those from the mantle, as well as the presence of gas hydrates, and the participation of geothermal fluids. Within the gas hydrate genetic type, varieties can be distinguished based on the mechanism of fluid phase generation. The serpentinite type is the most distinctive in its characteristics. It occurs in suprasubduction zones as a result of the breakthrough of fluids generated during dehydration, decarbonization, and metamorphic reactions from a subducting plate under high pressure and low temperature. Deglacial, abyssal, and intraplate rift structures are the least studied types of mud volcanism and require further study and verification. The intraplate rift structure type might be classified as a geothermal system in sedimentary strata based on further research. Along with the identified genetic types of mud volcanism, its polygenic manifestations are also possible. The proposed genetic classification may be subject to criticism, but it is a necessary step that will spur research into this area.

Keywords: mud volcanism, mud volcanoes, genetic classification, sedimentary basin, gas emission, gas hydrates

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность и признательность уважаемым рецензентам за полезный критический анализ рукописи, конструктивные рекомендации и замечания.

Acknowledgements

The author expresses gratitude to the respected Reviewers for the helpful critical analysis of the manuscript and the constructive suggestions and comments.

Для цитирования: Глазырин Е.А. К разработке генетической классификации грязевого вулканизма: аналитический обзор. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 2, с. 127–157. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.2.127-157>; <https://www.elibrary.ru/jqceii>

For citation: Glazyrin E.A. Towards the development of a genetic classification of mud volcanism: An analytical review. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 2, p. 127–157. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.2.127-157>; <https://www.elibrary.ru/jqceii>

Введение

Грязевой вулканизм (ГВ) широко распространен (рис. 1). Он служит одним из отражений динамики нелитифицированного осадочного разреза, его физико-механических и физико-химических преобразований. Последняя по времени наиболее полная обобщенная характеристика ГВ представлена в [1]. Грязевой вулканизм известен давно, но резкий скачок в его исследовании и выявлении все новых районов развития связан с морскими исследованиями.

Согласно общепринятой терминологии*, грязевой вулкан – центр извержения сопочной брекчии, образующейся и излившейся на поверхность в результате действия аномально высокого флюидного давления. Из грязевулканического канала выделяются газ (главным образом метан, тяжелые гомологи метана, в меньшей степени CO₂, N₂, H₂S), вода (иногда с пленками нефти) и грязевулканическая брекчия. Грязевулканическая (сопочная) брекчия сложена глинистой матрицей, образованной за счет дезинтеграции пород прорываемого разреза, и содержит захваченные обломки скальных и полускальных пород.

* Геологический словарь. В 3 т. Изд. 3-е, перераб. и доп. Т. 1. СПб.: ВСЕГЕИ, 2010, с. 300–301.

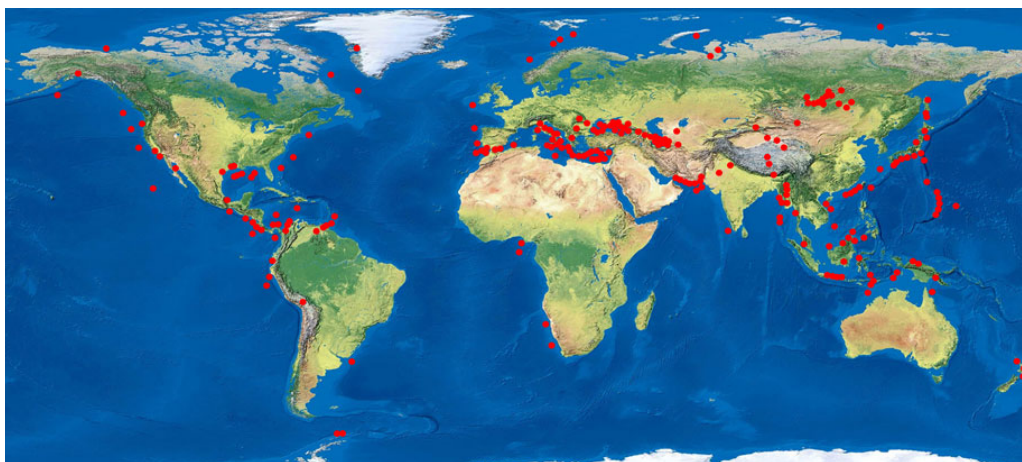


Рис. 1. Выявленные участки современного развития грязевого вулканизма (красные точки). Составлено на основе данных из публикаций, цитируемых в статье.

Fig. 1. Identified areas of modern development of mud volcanism (red dots). Compiled based on the data from publications cited in the article.

Грязевой вулкан служит частью и поверхностным проявлением грязевулканической системы, объединяющей (снизу вверх): питающую зону (корни), выводящий (подводящий по отношению к грязевулканической постройке) канал с грязевулканическими камерами (очагами) и геоморфологически выраженную грязевулканическую постройку, которая, как правило, описывается как грязевой вулкан в узком смысле термина (например, морфология грязевого вулкана, размеры грязевого вулкана и т.п.). В широком смысле термин «грязевой вулкан» охватывает всю грязевулканическую систему. В разрезе может присутствовать несколько погребенных грязевулканических построек друг над другом в виде «рождественской елки» [2].

Основной движущей силой ГВ является сочетание гравитационной неустойчивости глинистых пород и накопления в них, коллекторах или трещинах избыточного давления флюидов [1]. Прорыв избыточного давления инициируется использованием любых неоднородностей геологического разреза, как физико-механических, так и структурных.

Грязевой вулкан выражен в рельефе преимущественно в виде положительной постройки центрального типа. Постройка обычно имеет конусную форму различной степени уплощенности в зависимости от текучести/вязкости грязевулканического материала. Крупные грязевые вулканы могут представ-

лять собой сложные структуры с многочисленными жерлами и конусами, в то время как грязевые вулканы меньшего размера могут иметь только одно жерло [3]. Реже встречаются постройки типа «пирога» – низкие плосковершинные с крутыми стенками, образованные текучими продуктами извержений; структуры обрушения (кальдерные просадки или компенсационные впадины); диатремы; линейные постройки трещинного типа. Положительные структуры могут быть осложнены кальдерными ограничениями. В пределах постройки выделяется жерло (одно или несколько), могут присутствовать паразитические (боковые) постройки и второстепенные выводящие структуры – грифоны, сальзы и бассейны. Структуры обрушения формируются за счет периодического опорожнения и обрушения грязевулканической камеры. В результате грязевулканическая постройка с ее ближайшим окружением может трансформироваться в компенсационную впадину. На завершающем этапе своей активности, за счет компенсационного проседания структуры и запечатывания центрального выводящего канала, грязевулканическая деятельность может проявляться уже в виде небольших грязевых вулканов, грифонов и сальз преимущественно по периферии сформированной компенсационной впадины (пример на рис. 2), используя кальдерные разломы в качестве выводящих каналов.

Диатремы, как морфологическая производная взрывного типа извержений, описываются во многих публикациях, например в [1, 4–6]. В частности, К.М. Brown [5] показал, что диатремы могут образовываться в результате выбросов газа и/или воды в объектах, тесно связанных с грязевыми диапирами. Он предположил, что диапиры (или части диапиров) могут трансформироваться в диатремы. Однако он также отметил, что, хотя диатремы указывают на сфокусированный выброс флюида, они не обязательно могут быть связаны с грязевыми диапирами [5].

А. Judd и М. Novland [3] на основе собственных исследований и публикаций [5, 7] описали своеобразный тип извержений под термином «осадочные диатремы». По своим характеристикам эти диатремы занимают промежуточное положение между покмарками (оспины, воронки, кратеры) и грязевыми вулканами. Ключевой особенностью осадочных диатрем является то, что они образуются в результате взрывного прорыва флюида (вода и/или газ), который увлекает некоторое количество осадка, унося его вверх по трубчатому каналу [5].

Родственными грязевому вулканизму проявлениями служат покмарки, возникающие на морском дне при прорыве газов и/или воды [3]. От грязевых вулканов они отличаются отсутствием в продуктах прорыва породной составляющей грязевулканических построек. Тем не менее, в работах [8–10] приведены примеры переходных разновидностей между покмарками и грязевыми вулканами или эволюции покмарков в грязевые вулканы.

Не все природные проявления излияний грязи относят к грязевым вулканам. К ним не относятся так называемые грязевые котлы поствулканической деятельности (геотермальные или фумарольные «грязевые вулканы»), газовые выходы, напоминающие грязевой бассейн, и поверхностные грязевые проявления в результате выброса разжиженных подпочвенных грунтов при землетрясении или внезапных экзогенных событиях [1], таких как, например, резкое повышение уровня грунтовых вод, выжимание подпочвенного грунта оползневыми процессами (рис. 3).

Некоторые извержения, внешне напоминающие грязевулканические, также не следует рассматривать как ГВ, так как они в значитель-

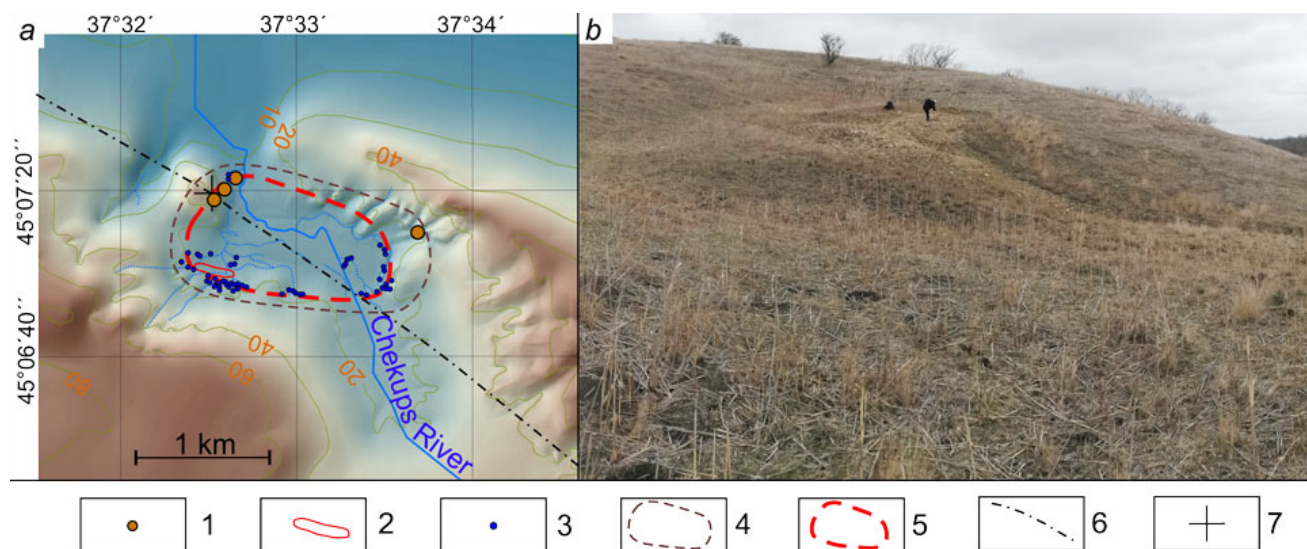


Рис. 2. Усть-Чекупское грязевулканическое поле (Краснодарский край): а – в рельефе местности; б – небольшой грязевой вулкан в левом борту долины р. Чекупс (фото автора). 1 – проявления грязевулканической деятельности; 2 – газовые источники; 3 – выходы подземных вод и сальзоподобные блюдца; 4 – граница Усть-Чекупского грязевулканического поля; 5 – компенсационная впадина; 6 – ось Джигинской антиклинали; 7 – замок Усть-Чекупской брахиантиклинали.

Fig. 2. Ust-Chekup mud volcanic field (Krasnodar Krai): a, in the terrain; b, a small mud volcano on the left side of the Chekups River valley (photo by the author). 1, manifestations of mud volcanic activity; 2, gas springs; 3, groundwater outlets and salsa-like saucers; 4, boundary of the Ust-Chekup mud volcanic field; 5, compensation depression; 6, axis of the Dzhiginskaya anticline; 7, lock of the Ust-Chekupskaya brachyanticline.

ной степени управляются и контролируются другими факторами. К таковым относят гибридные геотермальные системы, где магматические или гидротермальные богатые CO_2 и паром флюиды, связанные с магматическими интрузиями и высокотемпературными геотермальными флюидами, пересекают богатые органическими веществами и CH_4 осадочные породы, образуя на поверхности смесь газа и грязи различного происхождения. Эти гибридные системы предложено [1] объединять под названием «геотермальные системы, связанные с осадочными породами». В некоторых осадочных бассейнах могут встречаться системы горячих сухих горных пород или газообразные системы, богатые CO_2 . В геотермальных системах с высокой концентрацией CO_2 (как правило, $>90\%$), образующегося в результате термометаморфизма карбонатов или дегазации магмы и мантии, присутствует также переменное количество CH_4 , которое обычно выше, чем в чистых вулканических геотермальных флюидах. Метан геотермальных систем в осадочных породах обычно термогенный, из глубинных материнских пород и резервуаров, залегающих над богатой CO_2 геотермальной циркуляционной системой. Примерами геотермальных систем, связанных с осадочными породами,

могут служить геотермальное поле Солтон-Си в Калифорнии, рифтовая зона бассейна Гуаймас в Тихом океане, грязевое извержение LUSI в Индонезии, извержения в центральной Яве, газовой системе Тибр-Дельта недалеко от Рима и районах с крупными магматическими интрузиями, таких как Северо-Восточная Атлантика, Южная Африка и Австралия [1]. К проявлениям фреатического извержения в результате резкого повышения температуры водосодержащих пород при внедрении магмы в верхние горизонты земной коры отнесен известный Патомский кратер [11], ранее описываемый как грязевулканический (газолитокластитовый) [12].

Первоначально ГВ длительное время изучался в пределах суши. Последующие геологические исследования морского дна показали широкое распространение подводного ГВ, значительно превышающее его наземные ареалы. С вовлечением в обследование новых участков морского дна число выявленных грязевых вулканов неуклонно возрастает. Если на суше грязевых вулканов насчитывается около 1000 [13], то на морском дне их количество оценивается в $\sim 100\,000$ [14]. В связи с этим и все расширяющимся инженерно-хозяйственным освоением морского дна внимание к ГВ неуклонно



Рис. 3. Поверхностные грязевые проявления (Краснодарский край): а – выжимание обводненного подпочвенного грунта вдоль оползневой трещины выпирания; б – выжимание обводненного подпочвенного грунта в виде грифона. *Фото автора.*

Fig. 3. Surface mud manifestations (Krasnodar Krai): a, squeezing out of waterlogged subsoil along a landslide crack; b, squeezing out of waterlogged subsoil in the form of a gryphon. *Photo by the author.*

возрастает – не только как к распространенному геологическому явлению, но и как опасному геологическому процессу, а также важному экологическому фактору, в том числе поставщику парниковых газов.

На первом этапе своего изучения ГВ исследовался в пределах нефтегазоносных регионов, например Керченско-Таманского, юго-западного Туркменистана и Азербайджанского, как характерный поисковый признак. В результате ГВ генетически связывался с глиняным диапиризмом и нефтегазоносностью [15]. Так или иначе утвердилась парагенетическая связь ГВ с формированием углеводородных систем [1, 16, 17]. Это наложило отпечаток на развитие взглядов на его генезис.

Второй (морской) этап изучения связан с развитием подводных геолого-геофизических исследований. Оказалось, что подводный ГВ распространен гораздо шире и он разнообразнее, чем наземный.

По существу, наземный ГВ соответствует завершающему этапу эволюции ГВ. Если подводный ГВ формируется в осадочном бассейне на этапе накопления и погружения мощных преимущественно глинистых толщ, то наземный ГВ отражает уже этап воздымания этих толщ на фронте роста орогенного сооружения, с постепенным отмиранием по мере воздымания и денудации грязевулканической системы.

Исходным материалом для данного обзора и предлагаемой классификации послужил анализ обширной опубликованной литературы по грязевому вулканизму, насчитывающей сотни публикаций, основные из которых приведены в списке литературы к статье. Использованы также результаты государственного мониторинга состояния недр и геологического картирования масштаба 1: 200 000 Азовского, Черного и Каспийского морей; инженерных изысканий в районе развития ГВ, проводимых АО «ЮЖМОРГЕОЛОГИЯ» с участием автора [18–22]. Применялись различные методы морских исследований (сейсмоакустическое профилирование, гидролокация бокового обзора, эхолотирование, гидрогазогеохимическое профилирование, опробование грунтовыми труб-

ками и дночерпателями, лабораторный анализ грунтов на геохимические индикаторы ГВ, оперативное обследование последствий извержений); геологическое обследование наземных проявлений ГВ.

К настоящему времени, особенно с развитием морских геолого-геофизических исследований, накоплен большой объем данных по ГВ, свидетельствующих о его разнообразии и гетерогенности. Вместе с тем в публикациях, как правило, по умолчанию подразумевается один генетический тип ГВ – классический. Лишь в малом числе работ обосновываются и зачастую лишь кратко описываются другие генетические типы, без четкого выделения их отличительных признаков и критериев. Отсутствие разработанных генетических моделей ГВ составляет проблему при определении перспектив и направлений его изучения, выработке принципов и методов оценки и прогноза грязевулканической опасности. Автор считал своей задачей вычленить возможные генетические типы грязевого вулканизма, дать их относительно краткую характеристику на основе анализа собственных и литературных данных с целью активизировать дальнейшую разработку генетической классификации ГВ.

Предлагаемая генетическая типизация открыта для конструктивной критики, будет в дальнейшем корректироваться, дополняться и детализироваться по мере получения новых данных.

Генетические типы грязевого вулканизма

В классическом и исторически сложившемся понимании грязевой вулканизм парагенетически связывается с зонами нефтегазогенерации. Но по мере выявления все новых грязевых вулканов, особенно подводных, появляются иные взгляды на их генезис.

Авторы [23] отмечают, что грязевые вулканы не являются однородными объектами; их движущие силы, активность, материалы и морфология могут значительно различаться. Описаны [24] грязевые вулканы, которые

выбрасывают только бактериальный метан, в основном выделяют CO_2 или N_2 . Они встречаются в районах с тонким осадочным чехлом (~2 км) и в районах недавней магматической активности и могут быть не связаны с нефтегенерирующими системами. В статье [25] на основе анализа волновой картины сейсмических материалов по характеру глубинных проявлений выделено несколько типов грязевых вулканов в Черном море.

Существующие классификации ГВ касаются морфологии грязевулканических построек [1, 26, 27], вертикальной архитектуры грязевулканической системы [2], характера извержений [1, 28], состава флюидной фазы (газов и воды) [29–35], структурно-тектонического контроля.

По степени активности грязевые вулканы делят на активные, спящие, потухшие и погребенные (ископаемые по [1]) [36]. Среди подводных вулканов выделяют также слепые [37], которые представляют собой начальную стадию их образования. Для них также предложен [6] термин «грязевые диапиры». У слепых вулканов каналы движения грязевулканического материала не достигают дна и затухают в прорываемой осадочной толще.

Попытки же разработки генетической классификации ГВ единичны. Примером может служить монография Н.О. Назарова [38], где по генетическим признакам грязевые вулканы подразделены на пять групп: 1) связанные с газонефтяными месторождениями; 2) связанные с деятельностью и областью развития магматических вулканов; 3) грязевые сопки, возникающие в результате сейсмотектонических явлений; 4) грязевые сопки обвального происхождения; 5) грязевые сопки болотного происхождения. Исследования и выводы Н.О. Назарова основаны на изучении лишь наземных грязевых вулканов. К настоящему времени типы 2, 3 и 4-й уже не относят к грязевым вулканам [1], появились публикации по другим регионам, подводным грязевым вулканам с выделением других генетических типов ГВ.

Анализ имеющихся в распоряжении автора материалов позволяет наметить несколько генетических типов ГВ.

Классический тип грязевого вулканизма

Это наиболее распространенный и изученный генетический тип ГВ, который известен на примере Керченско-Таманской грязевулканической области, Туркмении и Азербайджана, Средиземного моря, Кадисского залива и других регионов. Его характеристика дана в ряде обобщающих публикаций [1, 6, 27, 34, 39–42].

Классический тип ГВ генетически связывают с элизионными системами [26, 41], для него характерен парагенез с бассейнами нефтегазогенерации [1, 4, 15, 27, 40].

Что касается размеров вулканов классического типа, то в поперечнике они варьируют от нескольких метров до нескольких километров, чаще всего от 1 до 2 км. Наиболее крупные грязевулканические постройки характерны для подводных вулканов, в поперечнике они достигают 12,4 км. Самые маленькие наземные вулканы, с активным воздыманием и денудацией геологического разреза, отражают этап завершения грязевулканического процесса. Примером могут служить вулканы Mascognano (15 м в поперечнике), Canalina (30 м) и Sassuno (30 м) в Апеннинах [43], вулканы размером до 20 м завершающего этапа развития Усть-Чекупского грязевулканического поля [22], вулкан Семигорский (40 м) на северо-западном погружении неотектонического поднятия Большого Кавказа и др.

В плане форма построек вулканов классического типа преимущественно субэллиптическая, до овальной, т.е. соответствует центральному типу вулканов. Соотношение максимального и минимального поперечника построек достигает значения 5,85 и соответствует значительно более редким вулканам трещинного морфологического типа.

Относительная высота грязевулканических построек (по выборке из более 1000 вулканов), как правило, не превышает 150 м (среднее значение 120 м), редко достигает 600 м. Присутствуют и отрицательные постройки с глубиной провала до 60 м (Menes Caldera), а также так называемые компенсационные впадины (вдавленные синклинали по [34]),

образованные за счет кальдерного обрушения при опорожнении грязевулканической камеры.

Основными причинами возникновения грязевого вулканизма классического типа признаются высокие скорости седиментации с накоплением мощных глинистых нелитифицированных и недоуплотненных толщ, боковое тектоническое сжатие. Это активные и пассивные окраины с современными мощными конусами выноса и аванделтами крупных рек, зоны сжатия аккреционных комплексов, надвиговые пояса, передовые, межгорные и периклинальные прогибы альпийских орогенных структур, задуговые бассейны, зоны погружения некомпенсированных осадочных бассейнов, совпадающие с активными границами плит [1, 6, 23, 27, 40–42, 44]. В этих толщах реликтовая вода удерживается, не имея возможности к эвакуации. По мере продолжения захоронения и литостатического давления вышележащих толщ формируется аномально высокое пластовое и поровое давление за счет генерации метана и его гомологов от разложения захороненного органического вещества и воды за счет минеральных преобразований.

Имея парагенетическую связь с мощными нефтегазогенерирующими толщами, данный генетический тип ГВ обладает характерными геохимическими особенностями – аномально высокими содержаниями в грязевулканической брекчии нефтепродуктов (до 16 274 мг/кг), вплоть до видимого присутствия нефти; фенолов (до 2.11 мг/кг); полиароматических углеводородов (до 5847 мкг/кг суммы бенз(а)пирена, флуорантена и хризена), а также ртути (до 0.31 мг/кг), кадмия, мышьяка [21], бора [45, 46]; в сопочных водах йода, брома, бора, мышьяка, лития и других элементов [6, 30, 31, 46, 47].

Выводящие каналы грязевых вулканов, по геофизическим данным, имеют столбообразную или же наклонную форму, поперечные размеры их достигают 3.5 км и прослеживаются на глубину до 10 км и ниже. Они содержат грязевулканические камеры на различных глубинах, преимущественно в верхней части разреза. Камеры рассматриваются как участки дробления вмещающих пород, заполненные флюидизированной (газо-, водонасыщенной)

глинистой массой. Питающие каналы грязевых вулканов проникают до 15 км в глубину, а у некоторых – до 25 км [4, 48–52].

Наличие грязевых камер фиксируется уже на глубине 50–100 м [1, 52]. При этом даже рядом расположенные грязевые вулканы могут иметь различные по глубине положения грязевулканические камеры [53].

Для классического ГВ выделяют три основных источника вод, которые могут смешиваться в процессе миграции грязевулканического материала к поверхности [36]: (1) морская или пресная поровая вода, захваченная в процессе быстрого захоронения донных осадков; (2) дегидратационная вода, вытесняемая в процессе диа- и катагенеза, преимущественно за счет иллитизации смектитов, обезвоживания опала; (3) метеорные воды. Может участвовать примесь воды от разложения газогидратов и вулканического происхождения. Основным типом вод является второй [26, 31, 47, 54]. Генерация этих вод начинается при температурах около 45 °С и почти завершается при 160 °С, как правило, на глубинах от ~1 до 5 км [31, 55].

Опубликованные данные по вариациям состава и изотопии газовой фазы ГВ классического типа дают основание для его дополнительной классификации.

Газовая фаза классического типа ГВ представлена типичным богатым углеводородами природным газом нефтегазоносных осадочных бассейнов. Основной объем газовой фазы занимает преимущественно метан (часто более 80 %), за ним следуют углекислый газ, азот, гомологи метана (от этана до бутана) и следовые количества гелия. По происхождению газ может быть термогенным, образующимся в зоне катагенеза при температурах, как правило, до 240 °С, или/и микробным, образующимся при более низкой температуре в более молодых или менее мощных отложениях в зоне диагенеза [1].

Концентрации CO₂ или N₂ в некоторых вулканах могут быть выше, чем концентрация CH₄. Это может быть результатом смешивания с геотермальными газами (особенно когда осадочный бассейн сопряжен с вулканизмом или зонами с высоким тепловым потоком)

или метабазита исходных пород. Данные разновидности классического ГВ могут быть контрвергентны так называемым «геотермальным системам, связанным с осадочными породами» по [1].

Богатые азотом газы выделяются на заключительном этапе их генерации, после прекращения образования CH_4 [1]. Большие количества N_2 также могут образовываться в результате метаморфизма глинистых, содержащих аммоний осадочных пород и магматических источников [1, 56]. На основе изучения состава газа и изотопии метана 143 наземных грязевых вулканов выявлено, что по меньшей мере 76 % из них выделяют термогенный газ, 4 % – биогенный, в остальных случаях газ имеет смешанный характер [57]. В некоторых вулканах присутствует заметная доля гелия с частично мантийной изотопией, отражающей региональные особенности проницаемости литосферы [46, 58].

Исходя из различного генетического состава газов, можно выделить минимум три эволюционных типа (этапов развития) классического ГВ с переходными разновидностями между ними (со смешанным составом газа).

Первый эволюционный тип отвечает начальному этапу проявления (зарождения) ГВ в подводных условиях, соответствуя этапу погружения бассейна седиментации. Данный тип связан с генерацией преимущественно биогенного метана в зоне диагенеза, его мобилизацией под флюидоупорами, достижением аномального флюидного давления и начальными выбросами. Как отмечено, например, для зал. Кадис [9, 59] и египетского шельфа [10, 60] по данным сейсмической 3Д-визуализации и моделирования, ему могут предшествовать и сопутствовать интенсивные разгрузки флюидов (метана и/или воды) с формированием покмарков, провалов, впадин и слепых долин. Диаметр покмарков для данного этапа достигает 3000 м (в среднем 800 м) [9]. Первоначально мобилизованный объем осадка транспортируется на поверхность, образуя холмы внутри покмарков [60]. Образование покмарков за счет интенсивного выброса преимущественно газовой-водной смеси рассматривается как первичная фаза ГВ [10].

В Керченско-Таманской грязевулканической области начальному развитию ГВ (мэотис – понт) соответствует появление в морских глинах раннесарматского возраста воронкообразных тел метановой разгрузки с поперечным размером в первые метры. Они имеют донный характер развития и сопровождаются вспышкой биоценоза. Сложены дезинтегрированными, брекчированными донными отложениями, сцементированными метаногенным кальцитом. Нижние границы «воронки» имеют постепенные контакты с вмещающими глинами [61].

Первому эволюционному типу, возможно, отвечают выделенные в дельте Миссисипи, Адриатическом море, Персидском заливе и Норвежском море «неглубокие» подводные грязевые вулканы и диапиры [3]. В отличие от типичных грязевых вулканов с вертикально протяженной питающей и выводящей структурой, «неглубокие» грязевые вулканы берут начало близко от поверхности морского дна. Они имеют несколько метров или десятков метров в диаметре и несколько метров в высоту.

В дельте Миссисипи их образование связывается с отложением водонасыщенных мелкозернистых отложений со значительным количеством органического вещества, за счет которого вероятен метаногенез. Последующее отложение грунтов и их нагрузка не позволяют уже погребенным мелкозернистым отложениям уплотняться за счет захороненной воды. Вода и газ задерживаются в них, поэтому происходит инверсия плотности и начинается миграция флюида, грязевой диапиризм и ГВ.

М. Hovland и Р. Curzi [62] описали проявления «неглубокого» ГВ в центральной части Адриатического моря, постройки которого составляют около 2–3 м в высоту и от 20 до 40 м в поперечнике. Они берут начало из отложений мощностью не более 10 м. В нижележащем грунтовом разрезе отсутствуют признаки флюидоподводящих газовых труб и разломов. По предложенной ими модели метан, получаемый из богатых органикой отложений, накапливается в близповерхностном разрезе под непроницаемым слоем глины в подошве самой верхней пачки отложений, снижая объемную плотность грунтов и придавая им гравитационную

неустойчивость. В результате локальная пластическая деформация и диапиризм, прорывы поровых жидкостей и газа образуют грязевулканические диапиры и постройки.

К первому эволюционному типу, вероятно, принадлежат и упомянутые выше грязевые сопки болотного происхождения в классификации Н.О. Назарова [38].

Молодые грязевые вулканы на континентальном склоне моря Бофорта, по данным [63], также имеют признаки формирования за счет преимущественно биогенного метана. Вода флюидной фазы представлена смесью морской воды, арктических метеорных вод и воды, образовавшейся в результате дегидратации глины на глубине 750 м. Отсутствие более высоких углеводородных газов и нефти заставляет предположить, что источник метана, вытесняющего осадок, также находится на меньшей глубине, чем окно для термогенной генерации углеводородов. Грязевулканические постройки в виде плоского «пирога» сложены жидкой грязью, диаметр их 600–1100 м, высота до 30 м.

Второй эволюционный тип связан с погружением мощных нефтегазоматеринских отложений в зону катагенеза с генерацией термогенного метана, а также выделением воды в результате иллитизации смектитов, дегидратации опала. Этот эволюционный тип классического ГВ наиболее распространен. Он отвечает основному и наиболее длительному этапу проявления ГВ.

Третий эволюционный тип характерен для заключительного этапа ГВ – воздымания и денудации грязевулканической системы. Для данного типа характерно высокое содержание азота, выделяющегося на заключительном этапе генерации газа с истощением ресурса термогенного образования CH_4 . Для заключительного этапа характерно также формирование компенсационных впадин за счет кальдерного обрушения истощенных грязевулканических камер (см. рис. 2).

Данный эволюционный ряд подтверждают сейсморазведочные данные [64], указывающие на проявление покмарков на первом этапе и компенсационных впадин на заключительном.

Первый эволюционный тип может не получить дальнейшего развития, если не продол-

жится накопление мощной осадочной толщи (некомпенсированное прогибание) с погружением ее в зону катагенеза.

Выделяемые эволюционные типы могут быть характерны и для других генетических типов ГВ, но для их выделения и характеристики недостаточно данных.

В качестве дополнительного классификационного разделения классического ГВ может служить вклад в его формирование глубинных флюидных потоков, присутствие газогидратов, гидротермальных флюидов.

Высказывались мнения об участии глубинных флюидов, вплоть до мантийных, как триггере формирования классического типа ГВ. Основанием для этого служило присутствие таких флюидов и характерных минеральных включений в продуктах грязевулканической деятельности [51, 58, 65, 66], а также геофизические данные [16, 51]. Так, на сейсморазведочных разрезах в пределах Черного моря в качестве источников генерации «флюидных потоков» у грязевых вулканов, помимо преобразования захороненного органического вещества (нефтегазогенерации) в осадочном чехле, указываются глубинные и коровые источники. Основная часть таких потоков приурочена к системе основных структурообразующих глубинных разломов [16]. Глубинный флюид (коровый, мантийный) в модели классического ГВ рассматривается как провоцирующий, но не обязательный, фактор, облегчающий разуплотнение глинистого разреза, вовлечение его в диапиризм и формирование грязевулканических камер [66].

Наиболее явно вклад глубинного флюида может быть замечен на заключительном этапе ГВ (в третьем эволюционном типе), когда заканчивается выработка термогенных газов, маскирующих его вклад. Примером служит грязевой вулкан Homorod [56, 58] в Румынии с содержанием в газовой фазе до 1.4 % гелия. Такое высокое содержание гелия и отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ указывают на вклад гелия, полученного из мантии. Вклад мантийных газов у вулкана Homorod оценивается авторами до 10 %. В его газовой фазе содержится >90 % азота, что обычно связано с конечным этапом газобразования после прекращения образования

метана [1]. Последнее косвенно подтверждает правомочность выделения эволюционных типов классического ГВ.

С подводными грязевыми вулканами классического типа часто ассоциируют скопления газогидратов. Образование этих скоплений связано с фильтрацией метана через термобарическую зону стабильности внутри грязевого вулкана [23, 67, 68]. Такой подтип классического типа грязевых вулканов представляет самостоятельный интерес, так как грязевулканический тип газогидратных скоплений рассматривается как перспективный для добычи метана, а также как опасный геологический объект, способный давать залповый выброс метана при нарушении стабильности газогидратов.

Грязевулканические скопления газогидратов могут иметь линзовидную или кольцевую форму. Кольцевая форма свойственна вулканам с активной газо-флюидной разгрузкой, препятствующей гидратообразованию за счет повышенной температуры в жерловой части. Линзовидная форма характерна для уснувших и потухших вулканов, где продолжается слабая дегазация метана. Внешняя граница развития газогидратов фиксируется на расстоянии 750 м от центра вулканов и определяется интенсивностью эманации газа [69, 70]. Грязевулканические скопления газогидратов склонны к разложению во время активизации ГВ [71], производя дополнительный вклад в извержение. В этом отношении классический тип ГВ с газогидратными залежами конвергентен рассматриваемому ниже газогидратному типу.

Можно выделить также подтип классического ГВ с опосредованным участием гидротермального флюида или геотермальной системы. Такие грязевые вулканы описываются в зонах с активным вулканизмом, высоким геотермальным градиентом и близостью крупных магматических тел. В составе флюидной фазы таких грязевых вулканов присутствует гидротермальная вода, связанная с магматическим очагом, или термально нагретая диа-, катагенетическая. Но основная флюидная фаза и генетические особенности соответствуют все же классическому ГВ. Так, отмечена [32] тенденция увеличения температур флюидогенера-

ции в сторону горного сооружения Большого Кавказа у грязевых вулканов Азербайджана. Для грязевых вулканов о. Сахалин и его шельфа предполагается связь с глубинным магматизмом в связи с аномальным прогревом и термодеструкцией рассеянного органического вещества [72].

Геотермальный подтип классического ГВ конвергентен грязевым проявлениям так называемых геотермальных систем в осадочных породах по [1], не относимых к ГВ. Нередко их трудно отличить друг от друга. Примером служит дискуссия о широко известном грязевом извержении LUSI в Индонезии на о. Ява [1, 73–75].

Также проблемным вопросом остается отнесение некоторых грязевых вулканов о. Сицилия к ГВ или геотермальной системе. Часть из них находится в непосредственной близости к вулкану Этна, с которым коррелирует их активность, а растворенные в воде газы в основном имеют магматическое происхождение. В частности, наиболее распространен углекислый газ с относительной долей в 80–90 % [76].

На современном этапе изученности выделяют различные структурно-тектонические типы классических грязевых вулканов. Вначале на основе изучения наземных вулканов классический тип структурно-генетически связывался с глиняными диапирами [6, 15]. В дальнейшем, уже при изучении подводных вулканов, было высказано мнение [25], что связь грязевых вулканов с глиняным диапризмом представляет собой частный случай. По мере изучения подводных вулканов выявилась их связь и с другими тектоническими структурами, которые обеспечивают пути выхода находящихся под давлением газов и воды с разжижением и захватом вмещающих пород [2, 77]. В частности, указывается связь ГВ с глиняными диапирами различной глубины заложения [77], с соляными диапирами [42, 78], тектоническими нарушениями [77, 79], в том числе тектоническими срывами (детachment-ми), надвигами [77, 80–83] и мегаолистостромами [83], растущими складками пропации надвиговых разломов [84, 85], с авандельтовыми системами пассивных окраин [1, 42, 81, 86].

Грязевой вулканизм гигантских подводных оползней

Основанием для выделения данного генетического типа ГВ послужило открытие [87] грязевых вулканов, связанных с погребенным плейстоценовым мегаоползнем в юго-западной части Баренцева моря. Гигантское оползневое событие мобилизовало $>11\,000\text{ км}^3$ ледникового материала, который был переотложен на площади $66\,000\text{ км}^2$.

Согласно предложенной модели [87], эти грязевые вулканы генетически связаны с накоплением избыточного давления (в том числе, возможно, вследствие разложения газогидратов) в подошве мегаоползня, где концентрируются наиболее грубозернистые отложения, играющие роль коллекторов. Наклонная геометрия подошвы мегаоползня и вышележащих отложений способствует латеральной миграции и накоплению избыточного флюидного давления в их тыловой зоне. Этот процесс при прорыве может обеспечить вертикальную миграцию флюидизированного, богатого газом ила к морскому дну с формированием грязевулканических построек (рис. 4).

Грязевые вулканы данного типа имеют неглубокую корневую систему, определяемую подошвой декливиальных отложений. Для них характерна плоская морфология типа «пирог» и округлая до эллипсовидной форма в плане,

образованная выдавливанием грязи низкой вязкости, легко растекающейся по морскому дну. Размеры вулканов в поперечнике составляют $0.2\text{--}0.9\text{ км}$, высота $2\text{--}13\text{ м}$. Выводящие каналы диаметром до 1 км идут от погребенной верхней границы тела оползня, расположенной на глубине $200\text{--}250\text{ м}$ от морского дна. Геохимический и изотопный состав метана соответствуют микробному газу [87].

Другим примером ГВ гигантских подводных оползней служит грязевой вулкан Хаакон Мосби (Hakon Mosby) в Норвежском море, связываемый с гигантским позднеплейстоценовым подводным оползнем Bjornoyrenna [68]. Этот вулкан также имеет круглую плоскую грязевулканическую постройку типа «пирог» диаметром 1.4 км и высотой 15 м , сложенную текучим тонкозернистым шламом с небольшой долей ($10\text{--}15\%$) песка.

В связи с широким распространением гигантских оползневых отложений вдоль палеоледниковых континентальных окраин, открытие грязевых вулканов данного типа требует переоценки потенциала ГВ в арктическом регионе [87].

К ГВ гигантских подводных оползней, но другой морфологии и механизма может быть отнесено скопление крупных (от 100 до 700 м в диаметре) кратеров в глубоководном районе близ Нигерии, описанных в [7, 88]. Пространственное распределение кратеров контролируется

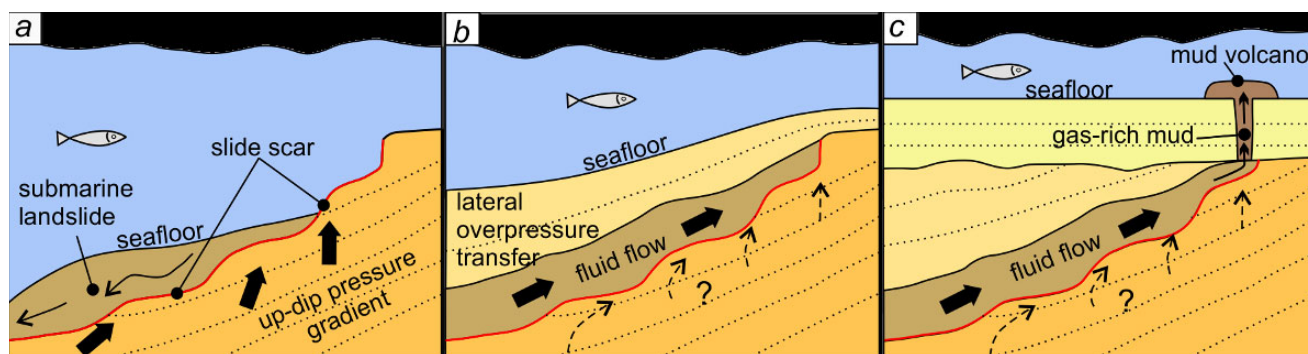


Рис. 4. Концептуальная модель образования грязевого вулканизма гигантских подводных оползней (по [87] с изменениями): а – гигантские оползни вдоль континентального склона (для простоты показан только один, связанный с грязевым вулканизмом) с образованием градиента давления; б – седиментационная нагрузка и уплотнение с повышением флюидного давления и его латеральным перетоком; в – прорыв флюидного давления с образованием грязевого вулкана.

Fig. 4. Conceptual model of formation of mud volcanism of giant submarine landslides based on [85] with modifications: a, giant landslides along the continental slope (for simplicity, only one associated with mud volcanism is shown) with formation of a pressure gradient; b, sedimentation load and compaction with increase of fluid pressure and its lateral flow; c, breakthrough of fluid pressure with formation of a mud volcano.

ется периметром крупного оползня, содержащего в своем основании и каналах флюидной миграции коллекторы и проницаемые зоны – песчано-алевритовые грунты, разрывы сплошности и зеркала скольжения. Глубина кратеров в большинстве своем составляет от 15 до 25 м, максимальная – около 30 м. Вертикальные подводящие трубчатые каналы шириной 50–150 м прослеживаются на глубину от 1000 до 1300 м ниже морского дна в интерпретируемые песчаные коллекторские зоны подошвы оползня. Они содержат обломки отложений или горных пород, захваченных с глубины.

По своим параметрам и механизму образования структуры описанных флюидных прорывов близ Нигерии соответствуют выделяемым К.М. Brown [5] так называемым «осадочным диатремам», занимающим промежуточное положение между покмарками (оспины, кратеры) и грязевыми вулканами. Согласно модели [7], образование «осадочных диатрем» в подводном оползне близ Нигерии происходило по схеме: создаваемое высокое флюидное давление в пласте-коллекторе вызывало гидроразрывы от пласта до морского дна, где высокоскоростной поток газа формировал трубы, конусы и кратеры на морском дне. После выброса заполненная обломками грязевая

суспензия оседала обратно в трубу и закупоривала выводящий канал. Эта закупорка препятствует образованию новых труб в том же месте и объясняет большое количество трубчатых каналов с кратерами («осадочных диатрем»).

Газогидратный (байкальский) тип грязевого вулканизма

Выделен [89] под термином «байкальский» в противопоставление классическому на основе изучения ГВ оз. Байкал. Исходя из генетической связи байкальских грязевых вулканов с разложением газогидратов [89–92], данный тип ГВ можно назвать газогидратным. Несколько ранее связь ГВ с газогидратной системой обосновали U. Tinivella и M. Giustiniani [23].

Согласно предложенной модели [89–92], а также [23], газогидратный тип ГВ генетически связывается с диссоциацией подводных газогидратов метана под действием восходящей миграции теплых флюидов по тектоническим разломам (рис. 5 а). Разложение газогидратов в свою очередь вызывает разжижение вмещающих глинистых отложений и образование небольших грязевых камер с избыточным давлением. Сброс избыточного давления с вытеснением разжиженных отложений приводит к формированию грязевого вулкана на дне.

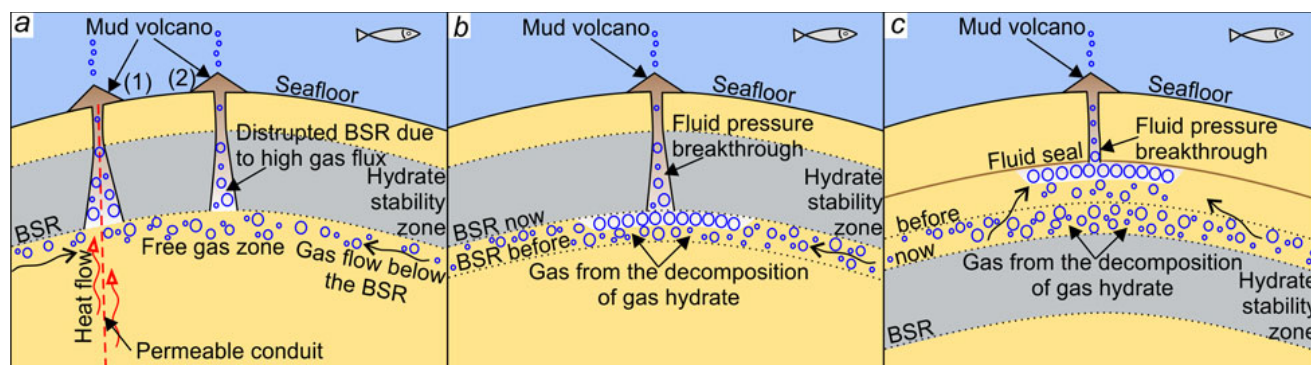


Рис. 5. Концептуальные модели образования грязевого вулканизма газогидратного генетического типа (пояснения в тексте): а – трехфазный прорыв за счет диссоциации газогидратов метана под действием сфокусированного потока теплых флюидов по проницаемым каналам (1) по [23, 89–92] или за счет накопления под сводом зоны стабильности газогидратов мигрирующего газа (2) по [23]; б и с – трехфазный прорыв за счет накопленного высокого флюидного давления от разложения газогидратов при повышении нижней границы зоны стабильности газогидратов (б) и понижении верхней границы зоны стабильности газогидратов (с).

Fig. 5. Conceptual models of formation of mud volcanism of gas hydrate genetic type (explained in the text): a, three-phase breakthrough due to dissociation of methane gas hydrates under the influence of focused flow of warm fluids through permeable channels (1) according to [23, 87–90] or due to accumulation of migrating gas within the gas hydrate stability zone (2) according to [23]; b, three-phase breakthrough due to accumulated high fluid pressure from the decomposition of gas hydrates with an increase in the lower boundary of the gas hydrate stability zone; c, three-phase breakthrough due to accumulated high fluid pressure from decomposition of gas hydrates with a decrease in the upper boundary of the gas hydrate stability zone.

По модели U. Tinivella и M. Giustiniani [23], избыточное флюидное давление с последующим его прорывом образуется за счет накопления под сводовой частью газогидратной залежи мигрирующего газа (рис. 5 а).

Особенностью газогидратного типа ГВ служат неглубокие корни, определяемые термодинамическими условиями образования газогидратов метана (на оз. Байкал корни таких вулканов прослежены до глубины 400 м ниже дна [90, 92]), отсутствие литифицированных пород среди обломков грязевой брекчии, умеренно повышенный тепловой поток. Вулканы этого типа отличаются менее интенсивным характером извержений, чем вулканы классического типа, так как накопленного избыточного давления вследствие неглубокого заложения недостаточно для запуска мощных взрывных извержений. В них отсутствуют такие типичные для классического типа ГВ особенности, как радиальные грязевые потоки, четко очерченная кальдера вокруг кратера, структуры формы «рождественская елка» в подводящем канале. Для грязевулканических отложений нехарактерны химические компоненты нефтяного ряда, свойственные классическому типу [93].

Вулканические постройки состоят из одиночной возвышенности с невыраженным или плохо выраженным кратером либо представлены группой небольших возвышенностей-холмов [92]. Форма грязевых вулканов газогидратного типа оз. Байкал (по 26 вулканам из [89, 94]) преимущественно округлая, овальная до вытянутой, со средним поперечным размером от 0.43 до 3.85 км, в среднем 1.2 км. Высота от 10 до 220 м, в среднем 63 м.

Предложенная модель применима и для многих других осадочных бассейнов [89]. Например, в Черном море РТ-условия допускают существование гидратов метана начиная с глубин моря около 600–650 м [69, 70]. С увеличением глубины моря мощность зоны гидратообразования растет и достигает 350–500 м в глубоководной части в зонах с низким тепловым потоком (25–30 мВт/м²). При

увеличении теплового потока до 60 мВт/м² и более она сокращается до десятков метров. На вероятность присутствия в Черном море ГВ газогидратного типа указывает и анализ сейсмических данных [95].

Возможно, к этому генетическому типу ГВ относятся слабо изученные так называемые «холмы просачивания», описанные [96] на норвежском шельфе. Не исключена также и их принадлежность к первому эволюционному типу классического ГВ. Морфологически эти структуры больше похожи на небольшие морские холмы (выступающие грязевые диапиры) высотой до 10–15 м и шириной до 300 м с метаногенными карбонатными литификатами, окруженные осадочным проседанием. Под положительной формой находятся трубообразные газо-флюидные структуры шириной 150–500 м. Они обычно проникают в BSR (bottom simulating reflection)* и расширенные отражатели, которые соответствуют скоплениям свободного газа.

Развитие газогидратного типа ГВ возможно по двум другим моделям – за счет накопления и прорыва высокого флюидного давления (по аналогии с [8]), образующегося от разложения газогидратов метана при вертикальной миграции верхней или нижней границы их термодинамического существования (рис. 5 б, с). Возможна также комбинация этих двух моделей с моделью [89–92] воздействия восходящей миграции теплых флюидов по тектоническим разломам.

В первом случае ГВ будет генерироваться высоким флюидным давлением, образующимся под зоной развития газогидратов за счет их разложения при продвижении вверх по разрезу зоны стабильности газогидратов (рис. 5 б). В этом случае корни грязевых вулканов будут наиболее глубокими, а извержения будут носить более интенсивный и взрывной характер за счет большей мощности экранирующей зоны стабильности газогидратов, перекрывающей грязевулканический очаг, и, соответственно, достижения большего аномального флюидного

* Имитация отражения дна на сейсморазведочных разрезах, рассматриваемая как фазовая граница между стабильными газовыми гидратами и свободным газом ниже.

давления, необходимого для преодоления литостатической нагрузки и прорыва флюидоупора. Наиболее подвержены прорыву флюидного давления сводовые залежи газогидратов за счет их аккумулирующего потенциала. Данный сценарий (повышение нижней границы стабильности газогидратов) возможен, например, при повышении уровня моря, тектоническом проседании, изменении температуры, увеличении мощности вышележащего осадочного слоя за счет интенсивной седиментации или поступления декливиального материала.

Во втором случае (рис. 5 с) ГВ также генерируется за счет разложения газогидратов, но при миграции верхней границы их существования вниз по разрезу. В этом случае корни грязевых вулканов будут наименее глубокими, а извержения будут носить более спокойный характер в связи с малой мощностью перекрывающего слоя грязевулканического очага и, соответственно, меньшим аномальным флюидным давлением, необходимым для преодоления литостатической нагрузки. Накоплению аномального флюидного давления и ГВ по данному сценарию будет способствовать наличие флюидоупора выше зоны разложения газогидратов. Миграция вниз верхней границы стабильности газогидратов возможна, например, при понижении уровня моря, уменьшении мощности вышележащего осадочного слоя за счет его эрозии или оползневой эвакуации, тектонического воздымания, изменения температуры. Однако данный механизм более характерен для формирования метановых сипов, покмарков [3, 9] с возможным их преобразованием в грязевые вулканы [8].

Согласно другой модели, миграция метана по зонам надвигов во фронтальные складки пропагации, выраженные в рельефе дна как антиклинальные хребты [83], или в антиформно выраженные термодинамические барьеры [24] приводит к возникновению в них газогидратной покрывки, которая может удерживать дополнительный метан. Это способствует развитию под антиформно выраженными газогидратными покрывками высокого давления порового флюида, приводящего при их прорыве к ГВ [24, 85].

Разложение газогидратов во время четвертичных ледниково-межледниковых циклов рассматривается как возможный источник флюидов в грязевом вулканизме Средиземного моря и зал. Кадис [42]. Разложение газогидратов может приводить и к образованию покмарков (оспины, кратеры) [9].

Газогидратному ГВ, как указывалось выше, может быть конвергентен классический тип в случае формирования в пределах построек последнего газогидратных залежей за счет фильтрации метана и их последующего интенсивного разложения при увеличении потока теплого флюида в результате активизации вулкана. Газогидратные залежи известны во многих глубоководных грязевых вулканах классического типа, как наиболее благоприятные обстановки для гидратообразования.

Серпентинитовый грязевой вулканизм

Серпентинитовый ГВ охарактеризован в ряде публикаций, например в [97–100]. Он резко отличен от всех других. Выделен в глубоководных Марианской и Идзу-Бонинской надсубдукционных зонах как результат прорыва богатых H_2O и метаном флюидов, образующихся при дегидратации, декарбонизации и метаморфических реакциях из субдуцирующей плиты в условиях высокого давления и низкой температуры [97–100]. Сдвиговые разломы, связанные с растяжением вдоль простирания, и вертикальная тектоника, связанная с субдукцией, обеспечивают пути для подъема флюидов, образующихся из плиты, и тектонических брекчий как из зоны субдукции, так и из литосферы перекрывающей плиты (рис. 6).

Грязевые вулканы серпентинитового генетического типа отличаются на порядок большими размерами, чем у других типов, с зонами флюидогенерации глубиной от ~15 до 20 км, реже до 50 км. На основе данных [98, 101] по 20 вулканам, их поперечные размеры колеблются от 11 до 42 км, в среднем около 20 км, высота построек от 300 до 2364 м. Постройки субизометричные, конусовидные, с грязевыми потоками, достигающими в длину 70 км. Вулканы располагаются на глубинах

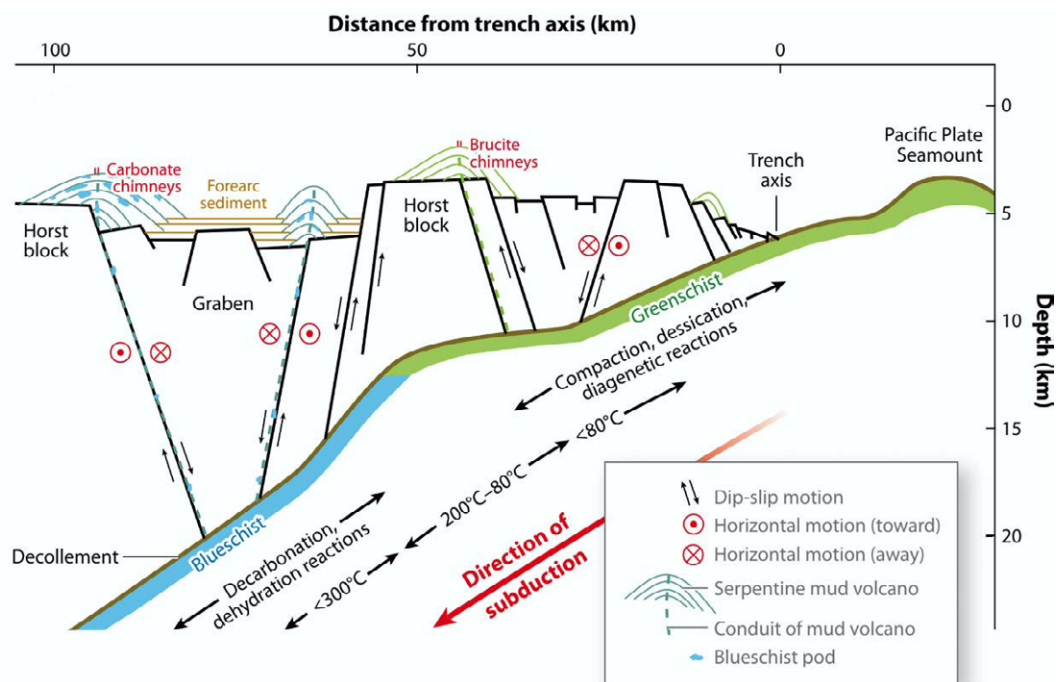


Рис. 6. Схематический поперечный разрез Марианской системы, показывающий различные типы ассоциаций серпентинитовых грязевых вулканов с разломами в клине преддуговой зоны (из [98] с упрощениями).

Fig. 6. Schematic cross-section of the Mariana system showing different types of associations of serpentinite mud volcano with faults in the fore-arc wedge (from [96] with simplifications).

моря в 3–7 км, занимая пространственное положение между океаническим желобом и вулканической дугой.

Грязевулканическая брекчия состоит из плохо отсортированной серпентинитовой брекчии, обломки в которой достигают метра в поперечнике. Они представлены в основном в различной степени серпентинизированными мантийными перидотитами (преимущественно гарцбургитами, реже дунитами). В подчиненном количестве встречаются обломки метаморфических пород голубосланцевой и зеленосланцевой фации метаморфизма (глаукофановые, кроссит-мусковит-хлоритовые, хлоритовые, мусковитовые, амфиболовые сланцы), базальты океанических островов, обычные базальты срединно-океанических хребтов, гемипелагические кремни [98, 99].

Дегляциальный грязевой вулканизм

Описан в районах деградации вечной мерзлоты, как на суше, в термокарстовых озерах [8, 100], так и на шельфе полярных морей [103].

Генетически образование дегляциального ГВ связывается со взрывным прорывом флюидов (преимущественно газов), скопившихся под слоем многолетней мерзлоты как в результате ее деградации, так и вследствие повышения порового давления газов, в том числе при разложении мерзлотных газогидратов метана [8, 102, 104]. Вечномерзлые грунты выступают в качестве эффективного флюидоупора, однако в результате их деградации при потеплении климата (дегляциации) они уже могут не удерживать аномальное давление флюидов. Ярким примером такого прорыва флюидов служит Бованенковский кратер.

Согласно модели [102, 105], на первой стадии происходит формирование газонасыщенных полостей в массивах подземного льда. Очаги дегазации, видимо, имеют связь с субвертикальной миграцией глубинного газа по проницаемым разломам и/или диссоциацией газогидратов в процессе дегляциации. При этом под газодинамическим воздействием аномально высоких и сверхлитостатических давлений формируются бугры пучения. Вторая стадия эруптивная, характеризуется разруше-

нием бугров пучения мощными импульсными выбросами газа с образованием кратеров («осадочных диатрем», покмарков, оспин) диаметром в десятки и сотни метров. На суше кратеры преобразуются в термокарстовые озера. На третьей стадии в пределах сформированных отрицательных структур за счет газо-флюидной разгрузки образуются грязевулканические постройки.

С отступлением арктического ледяного щита около 15–12 тыс. лет до н.э. и разложением за счет этого газогидратных залежей связывают образование многочисленных покмарков (кратеров) диаметром 0.05–1 км и глубиной до 35 м на дне арктических [106–108] и антарктических [109] морей. Внутри кратеров установлены округлые и удлиненные до неправильной формы холмы, интерпретируемые как грязевулканические (?) постройки [108].

Размер зафиксированных [102] грязевулканических построек на дне термокарстовых озер достигает нескольких сотен метров. Форма их округлая и эллиптическая с центральной впадиной – кратером (кальдерой) эллиптической формы размером в десятки метров. Нередко они обнаруживают связь с дизъюнктивными нарушениями.

Вероятно, к данному типу относятся и грязевулканические структуры, обнаруженные [103] в западной части Карского моря на площади структуры «Университетская». Это круглые постройки диаметром до 400 м и высотой до 30 м. В центре может прослеживаться жерло диаметром около 30 м, валики выброшенной сопочной массы и излившиеся потоки «грязи». В отличие от классических грязевых вулканов с глубокими корнями, у изученных здесь на геофизических разрезах не прослеживаются подводящие флюидные каналы. Высказано предположение, что их возникновению предшествует формирование домов. На месте домов со временем, по мере роста давления в структуре, могут возникнуть в зависимости от состава флюида небольшие грязевые сопки или покмарки [103].

Результаты исследований грязевулканических построек на дне термокарстовых озер п-ова Ямал с учетом ряда ранее открытых грязевых вулканов на суше Аляски, Гренландии

и Исландии, а также на дне морей Бофорта, Норвежского и Карского позволяют говорить о широком распространении дегляциального грязевого вулканизма в Циркумарктическом мегарегионе [8].

Абиссальный грязевой вулканизм

Слабо изученный тип ГВ, выделяемый на основе единичных публикаций. При более детальном изучении его генетическая природа будет уточнена и детализирована. Проявляется он в пределах абиссальных океанских равнин на глубинах более 4 км с океаническим типом коры и с относительно маломощным (<1 км) осадочным чехлом, т.е. вне геологических условий образования классического ГВ. Осадочный разрез представлен преимущественно известняками, вулканогенно-осадочными и вулканокластическими породами, глубоко-водными глинами, а также эффузивными породами. В настоящее время сообщения о грязевых вулканах в подобных условиях редки, но, учитывая, что площадь абиссальных равнин исследована весьма слабо, ГВ данного типа может быть широко распространен.

Абиссальный ГВ выделен на основе грязевых вулканов, описанных [110] в абиссальной зоне (глубины около 4500 м) восточной части Атлантического океана близ зал. Кадис за пределами областей быстрого накопления осадков и нефтегазогенерации. Грязевые вулканы данного типа в форме конусов, обычно <100 м в диаметре, выстроены по простиранию трансформных разломов. Грязевулканические отложения обычно состоят из оливково-серых грязевых брекчий с обломками аргиллитов размером от миллиметра до сантиметра и сильно обогащены H_2S и метаном.

Положение грязевых вулканов вдоль разлома совпадает с сейсмически активной зоной с землетрясениями магнитудой $M \leq 6$, зарождающимися в верхней мантии на глубине от 40 до 60 км. Сейсмогенные трансформные (сдвиговые) разломы обеспечивают пути для глубинных флюидов из океанической коры, но механизм, управляющий потоком флюидов, остается неясным. Геохимические данные (Cl, B, Sr, $^{87}Sr/^{86}Sr$, $\delta^{18}O$, δD) показывают, что

флюиды зарождаются в океанической коре, возраст которой превышает 140 млн лет. Поднимаясь на поверхность, эти флюиды получают сильные геохимические сигналы от перекристаллизации верхнеюрских пелагических известняков (обогащение стронцием) и в гораздо меньшей степени от дегидратации глинистых минералов более молодых и маломощных терригенных отложений [110].

Заслуживает внимания тот факт, что описанные трансформные разломы продолжают в зал. Кадис, где широко развит классический тип ГВ. При этом в грязевых вулканах классического типа в зал. Кадис флюиды, по данным [54, 110], несут геохимический сигнал и из систем разломов, глубоко врезающихся в подстилающий фундамент. Наличие во флюидах грязевых вулканов Кадисского залива геохимического сигнала из трансформных разломов подтверждает участие в формировании классического ГВ глубинных флюидов и возможности на этой основе дополнительной его генетической классификации.

Вероятно, к абиссальному ГВ принадлежат и выявленные [111] четыре грязевых вулкана в абиссальной зоне Магеллановых гор (Восточно-Марианская котловина Тихого океана) на глубинах моря около 6 км. По геофизическим данным, поперечные размеры грязевулканических построек составляют 1.3–3.5 км, высота 35–130 м.

Грязевой вулканизм внутриплитных рифтогенных структур

Описан [112] на юге Восточной Сибири с выделением Южно-Сибирской грязевулканической области, где проявлен преимущественно в пределах мезозойских и кайнозойских рифтогенных впадин Прибайкалья и Забайкалья, в том числе в Байкальской рифтогенной зоне.

Согласно [112], ГВ внутриплитных рифтогенных структур обусловлен флюиодинамическими процессами плюмовой природы, которые сопровождали формирование рифтов. Современные процессы данного ГВ наиболее интенсивно проявляются в периоды сильных землетрясений, с образованием многочислен-

ных мелких грифонно-сальзовых конусовидных построек в пределах грязевулканических компенсационных впадин. Каналы грязевых вулканов проникают глубоко в фундамент, в том числе докембрийский. Глубина их очагов оценивается в 3.5–15 км. Очаги приурочены к зонам разрывных тектонических нарушений среди древних кристаллических образований. Продукты грязевулканических извержений представлены в основном литокомплексами псаммо-псефитовой размерности, с обилием грифонных песков. Они образуют мелкие конусы, валообразные поднятия, округлые и овалоподобные массивы грифонных песков высотой до 200 м, площадью до 400 км² и более, занимают до 75 % территории Тункинской, Баргузинской, Чарской впадин. В более древней (K₁) Ундино-Даинской впадине разрез сопочных литокомплексов венчают гейзеритовые купола.

Температуры в очаговых зонах грязевых вулканов внутриплитных рифтогенных структур оцениваются в 150–600 °С. Газовые компоненты флюидов в основном представлены CH₄, N₂, CO₂ и H₂ с различными соотношениями между ними. По преобладанию того или иного газа они подразделяется на несколько типов: метановый, азотный, углекислый, метано-азотный, азотно-углекислый, водородно-азотный, углекисло-водородный. Водный компонент представлен преимущественно термальными водами с изменчивыми физико-химическими и термодинамическими показателями, обусловленными гетерогенизацией (вскипанием) восходящих гидротермальных растворов, их разбавлением поверхностными и атмосферными водами [112].

Исходя из описания [1], данный генетический тип трудно отнести к собственно ГВ, так как он имеет признаки грязевых проявлений геотермальных систем.

Полигенные грязевые вулканы

Наряду с грязевыми вулканами выделенных генетических типов возможны полигенные грязевые вулканы. Примером полигенности может служить вулкан Borealis, описанный [113] в арктической зоне Атлантики. Согласно

модели авторов, образование грязевого вулкана Borealis соответствует комбинации дегляциального и газогидратного генетических типов. Дегляциальный механизм рассматривается как начальный триггер. При отступлении последнего ледникового щита произошла дестабилизация метановых гидратов за счет повышения температуры и снижения давления. Внезапная диссоциация этих газогидратов высвободила большое количество метана, что спровоцировало образование покмарков на морском дне (первый эволюционный тип). Сформированные метаногенные карбонатные литификаты образовали пластовые флюидные барьеры, которые периодически препятствуют восходящей миграции углеводородов, позволяя газу накапливаться под ними и заставляя газ искать альтернативные пути к морскому дну. Это отклонение потока флюидов способствовало образованию четырех наблюдаемых кратеров в результате взрывных событий. Система каналов грязевого вулкана Borealis связана с более глубокими и теплыми слоями, из которых флюиды мигрируют к поверхности. В дополнение к модели дегляциации авторами предложен сценарий газогидратного типа ГВ подобно тому, что предложен для оз. Байкал [89, 91], – периодический подъем теплых флюидов, разложение под их действием газогидратов на меньшей глубине, прорыв образованных от разложения газогидратов флюидов с множеством поверхностных извержений.

Комбинации дегляциальной и газогидратной модели с быстрым разложением газогидратов и выбросами метана при отступлении ледникового щита около 15–12 тыс. лет до н.э. соответствует образованию покмарков (кратеров) диаметром 0.05–1 км и глубиной до 35 м с холмами внутри кратеров на морском дне Арктики [106, 108] и Антарктики [109].

Заключение

Грязевой вулканизм – широко распространенное геологическое явление, особенно на морском дне с мощным нелитифицированным преимущественно глинистым разрезом. Для решения проблем оценки и прогноза гря-

зевулканической опасности, а также изучения гео- и флюидодинамики осадочного разреза существенно важна разработка генетических моделей грязевого вулканизма. В обзоре на основе анализа значительного числа публикаций предпринята попытка выделения и систематизации генетических типов грязевого вулканизма, определения их отличительных признаков. Выделены следующие генетические типы ГВ: классический, гигантских подводных оползней, газогидратный, серпентинитовый, дегляциальный, абиссальный, внутриплитных рифтогенных структур.

Наиболее распространен и изучен классический ГВ. Он обладает наибольшим разнообразием морфологии и размеров грязевулканических построек, структурно-тектонического контроля, геодинамической позиции. В нем можно выделить три этапа развития – начальный, основной и заключительный, соответствующие определенным эволюционным типам.

Первый эволюционный тип обладает неглубокими корнями и отвечает начальному периоду погружения бассейна седиментации с генерацией биогенного метана. Ему могут предшествовать и сопутствовать интенсивные разгрузки флюидов (метана и/или воды) с формированием покмарков. Второй, основной этап эволюции наиболее длительный, соответствует погружению флюидогенерирующих толщ в зону катагенеза с генерацией термогенного метана и воды при иллитизации смектитов. Третий эволюционный тип классического грязевого вулканизма отвечает его завершению в результате воздымания и денудации грязевулканической системы, истощения ресурса генерации термогенного метана.

Классический ГВ дополнительно может быть классифицирован по вкладу в его формирование глубинных флюидных потоков, вплоть до мантийных, присутствию газогидратов и участию гидротермальных или геотермальных флюидов. Может быть конвергентен так называемым геотермальным системам в осадочных толщах.

В газогидратном генетическом типе ГВ могут быть выделены разновидности по механизму генерации высокого флюидного давления: от разложения газогидратов метана под

действием сфокусированного потока теплых флюидов по проницаемым каналам; за счет мигрирующего газа под сводом зоны стабильности газогидратов; от разложения газогидратов при повышении нижней границы зоны их стабильности; под флюидоупором от разложения газогидратов при понижении верхней границы зоны их стабильности.

С газогидратным генетическим типом ГВ конвергентен классический при формировании в пределах построек последнего газогидратных залежей за счет фильтрации метана и их последующего интенсивного разложения при дестабилизации.

Серпентинитовый тип ГВ формируется в надсубдукционных зонах как результат прорыва флюидов, образующихся при дегидратации, декarbonизации и метаморфических реакциях из субдуцирующей плиты в условиях высокого давления и низкой температуры.

Дегляциальный, абиссальный и внутриплитных рифтогенных структур типы ГВ наименее изучены и требуют дополнительных исследований, верификации. Тип внутриплитных рифтогенных структур по результатам его изучения, возможно, будет отнесен к геотермальным системам в осадочных толщах.

Наряду с выделяемыми генетическими типами ГВ возможны его полигенные проявления.

Автор не считает выделенные им генетические типы грязевого вулканизма завершённой классификацией. Он надеется, что данная работа послужит стимулом для дальнейших исследований в этом направлении.

Список литературы

- Mazzini A., Etiope G. Mud volcanism: an updated review. *Earth-Science Reviews*. 2017,168:81–112. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.03.001>
- Somoza L., Medialdea T., Leon R., Ercilla G., Vazquez J.T., Farran M.I., Hernandez-Molina J., Gonzalez J., Juan C., Fernandez-Puga M.C. Structure of mud volcano systems and pockmarks in the region of the Ceuta Contourite Depositional System (Western Alborán Sea). *Marine Geology*. 2012,332-334:4–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2012.06.002>
- Judd A., Hovland M. *Seabed fluid flow: the impact on geology, biology and the marine environment*. Cambridge University Press, 2009, 492 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535918>
- Юсубов Н.П., Гулиев И.С. *Грязевой вулканизм и углеводородные системы Южно-Каспийской впадины (по новейшим данным геофизических и геохимических исследований)*. Баку: Элм, 2022, 168 с.
- Brown K.M. The nature and hydrogeologic significance of mud diapirs and diatremes for accretionary systems. *Journal of Geophysical Research*. 1990,95:8969–8982. <https://doi.org/10.1029/jb095ib06p08969>
- Kopf A.J. Significance of mud volcanism. *Reviews of Geophysics*. 2002,40(2):52. doi:10.1029/2000RG000093
- Loseth H., Wensaas L., Arntsen B., Hanken N.-M., Basire C., Graue K. 1000 m long gas blow-out pipes. *Marine and Petroleum Geology*. 2011,28:1047–1060. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.10.001>
- Богоявленский В.И. Новые данные о грязевом вулканизме в Арктике на полуострове Ямал. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2023,512(1):92–99. <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>
- Leon R., Somoza L., Medialdea T., Maestro A., Diaz-del-Rio V., Fernandez-Puga M.C. Classification of sea-floor features associated with methane seeps along the Gulf of Cadiz continental margin. *Deep-Sea Research*. 2006,53(11-13):1464–1481. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2006.04.009>
- Pryce E., Kirkham C., Cartwright J. Crater formation during the onset of mud volcanism. *Geology*. 2023,51(3):252–256. <https://doi.org/10.1130/G50713.1>
- Антипин В.С., Покровский Б.Г., Федоров А.М. Патомский кратер – результат фреатического взрыва: геологические и изотопно-геохимические свидетельства. *Литология и полезные ископаемые*. 2015,6:538–548. <https://doi.org/10.7868/S0024497X15060026>
- Исаев В.П., Исаев П.В., Развозжаева Э.А. Патомский газолитокластический вулкан. *Геология нефти и газа*. 2012,3:77–83. EDN: OZEOVB
- Judd A. Gas emissions from mud volcanoes. Significance to global climate change. In: Martinelli G., Panahi B. (eds) *Mud volcanoes, geodynamics and seismicity: NATO Science Series, Series IV: Earth and Environmental Series*. Dordrecht: Springer, 2005, 51, p. 147–157. <https://doi.org/10.1007/1-4020-3204-8>
- Milkov A.V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. *Marine Geology*. 2000,167(1-2):29–42. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(00\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00022-0)
- Губкин И.М., Федоров С.Ф. *Грязевые вулканы Советского Союза и их связь с генезисом нефтяных месторождений Крымско-Кавказской геологической провинции*. М.: Изд-во АН СССР, 1938, 44 с.
- Глумов И.Ф., Гулев В.Л., Карнаухов С.М., Сенин Б.В. *Региональная геология и перспективы нефтегазоносности Черноморской глубоководной*

- впадины и прилегающих шельфовых зон. Ч. 2. М.: Недра, 2014, 181 с.
17. Гулиев И.С., Юсубов Н.П., Гусейнова Ш.М. О механизме образования грязевых вулканов в Южно-Каспийской впадине по данным 2D- и 3D-сейсморазведки. *Физика Земли*. 2020,5:131–138. <https://doi.org/10.31857/S0002333720050026>
 18. Глазырин Е.А. Основные результаты изучения подводного грязевого вулканизма Керченско-Таманского региона. В кн.: *Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа*. М.: ИИЕТ РАН, 2017, т. 7, ч. 2: 39–48.
 19. Глазырин Е.А. К прогнозированию извержений грязевых вулканов и оценке опасности грязевулканической деятельности на Керченско-Таманском шельфе. В кн.: *Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления»): материалы Междунар. науч. конф., г. Ростов-на Дону, 13–23 июня, 2019*. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2019, с. 37–39.
 20. Глазырин Е.А. Государственный мониторинг состояния недр прибрежно-шельфовой зоны Азовского, Черного и Каспийского морей – основные итоги и перспективы развития. В кн.: *Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа*. М.: ИИЕТ РАН, 2020, т. 10, ч. 2, с. 325–332.
 21. Глазырин Е.А., Карпенко А.Н., Карпенко Г.Е., Лещенко Д.П., Марфин А.А., Прокопцев Г.Н., Сильченко А.Ю. Информационный бюллетень о состоянии недр прибрежно-шельфовых зон Азовского, Черного и Каспийского морей в 2023 г. М.: Науч. библиотека, 2024, 112 с. <https://doi.org/10.36871/978-5-907823-32-7>
 22. Глазырин Е.А., Глазырина Н.В. Усть-Чекупское грязевулканическое поле Керченско-Таманской грязевулканической области. В кн.: *Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа*. М.: ИИЕТ РАН, 2025, т. 15, с. 260–265.
 23. Tinivella U., Giustiniani M. An overview of mud volcanoes associated to gas hydrate system. In: Nemeth K. (ed.) *Updates in volcanology – New advances in understanding volcanic systems*. 2012, p. 225–267. <http://dx.doi.org/10.5772/51270>
 24. Milkov A.V. Global distribution of mud volcanoes and their significance in petroleum exploration as a source of methane in the atmosphere and hydrosphere and as a geohazard. In: Martinelli G., Panahi B. (eds) *Mud volcanoes, geodynamics and seismicity: NATO Science Series, Series IV: Earth and Environmental Series*, vol. 51. Dordrecht: Springer, 2005, p. 29–34. https://doi.org/10.1007/1-4020-3204-8_3
 25. Исмагилов А.Ф., Козлов В.Н., Терехов А.А., Хортов А.В. Глиняный диапиризм и грязевой вулканизм при формировании локальных структур в российской части Черного моря. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2006,2:4–10. EDN: HSNKKL
 26. Холодов В.Н. Грязевые вулканы: распространение и генезис. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2012,4(30):5–27. EDN: PJWOIL
 27. Dimitrov L.I. Mud volcanoes – the most important pathway for degassing deeply buried sediments. *Earth-Science Reviews*. 2002,59:49–76. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00069-7](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00069-7)
 28. Калинин М.К. Грязевые вулканы, причины их возникновения, развития и затухания. *Труды ВНИГНИ*. 1964,40:30–54.
 29. Киквадзе О.Е., Лаврушин В.Ю., Покровский Б.Г., Поляк Б.Г. Изотопный и химический состав грязевулканических газов Таманского полуострова и проблемы их генезиса. *Литология и полезные ископаемые*. 2014,6:525–538. <https://doi.org/10.7868/S0024497X14060068>
 30. Куришко В.А., Месяц И.А., Тердовидов А.С. Гидрогеология грязевого вулканизма Керченского полуострова. *Геологический журнал*. 1968,28(1):49–59.
 31. Лаврушин В.Ю., Айдаркожина А.С., Сокол Э.В., Челноков Г.А., Петров О.Л. Грязевулканические флюиды Керченско-Таманской области: геохимические реконструкции и региональные тренды. Сообщение 1. Геохимические особенности и генезис грязевулканических вод. *Литология и полезные ископаемые*. 2021,6:485–512. <https://doi.org/10.31857/S0024497X21060045>
 32. Лаврушин В.Ю., Гулиев И.С., Киквадзе О.Е., Алиев Ад.А., Покровский Б.Г., Поляк Б.Г. Воды грязевых вулканов Азербайджана: изотопно-химические особенности и условия формирования. *Литология и полезные ископаемые*. 2015,1:3–29. <https://doi.org/10.7868/S0024497X15010036>
 33. Лаврушин В.Ю., Киквадзе О.Е., Покровский Б.Г., Алиев Ад.А., Поляк Б.Г. Воды грязевых вулканов Кавказского региона: геохимические особенности и условия формирования. *Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН*. 2011,57:217–221. EDN: PXNDYV
 34. Шнюков Е.Ф., Соболевский Ю.В., Гнатенко Г.К., Науменко П.И., Кутний В.А. *Грязевые вулканы Керченско-Таманской области*: атлас. Киев: Наукова думка, 1986, 152 с.
 35. Milkov A.V., Sassen R., Apanasovich T.V., Dadashev F.G. Global gas flux from mud volcanoes: a significant source of fossil methane in the atmosphere and the ocean. *Geophysical Research Letters*. 2003,30(2):1037. <https://doi.org/10.1029/2002GL016358>
 36. Mazzini A., Svensen H., Planke S., Guliyev I., Akhmanov G.G., Fallik T., Bank D. When mud

- volcanoes sleep: Insight from seep geochemistry at the Dashgil mud volcano, Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*. 2009,26:1704–1715. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.11.003>
37. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П. Слепые грязевые вулканы Черного моря. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2020,16(2):49–65. <https://doi.org/10.15407/gpimo2020.02.049>
 38. Назаров Н.О. Назаров Н.О. *Грязевые вулканы Кеймир-Чикишлярского района юго-западного Туркменистана*. Ашхабад: АН ТССР, 1957, 117 с.
 39. Aliyev Ad.A., Guliyev I.S., Dadashov F.H., Rahmanov R.R. *Atlas of world mud volcanoes*. Baku: Naf-ta-Press, 2015, 321 p.
 40. Лимонов А.Ф. Грязевые вулканы. *Соросовский образовательный журнал*. 2004,8(1):63–69.
 41. Холодов В.Н. Грязевые вулканы: закономерности размещения и генезис. Сообщение 1. Грязевулканические провинции и морфология грязевых вулканов. *Литология и полезные ископаемые*. 2002,3:227–241.
 42. Mascle J., Mary F., Praeg D., Brosolo L., Camera L., Ceramicola S., Dupré S. Distribution and geological control of mud volcanoes and other fluid/free gas seepage features in the Mediterranean Sea and nearby Gulf of Cadiz. *Geo-Marine Letters*. 2014,34(2–3):89–110. <https://doi.org/10.1007/s00367-014-0356-4>
 43. Bonini M. Mud volcanoes: Indicators of stress orientation and tectonic controls. *Earth-Science Reviews*. 2012,115:121–152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2012.09.002>
 44. Feyzullayev A.A. Mud volcanoes in the South Caspian basin: Nature and estimated depth of its products. *Natural Science*. 2012,4(7):445–453. <http://dx.doi.org/10.4236/ns.2012.47060>
 45. Huseynov D.A., Guliyev I.S. Mud volcanic natural phenomena in the South Caspian Basin: geology, fluid dynamics and environmental impact. *Environmental Geology*. 2004,46:1012–1023. <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1088-y>
 46. Kopf A., Deyhle A., Lavrushin V.Y., Polyak B.G., Gieskes J.M., Buachidze G.I., Wallmann K., Eisenhauer A. Isotopic evidence (He, B, C) for deep fluid and mud mobilization from mud volcanoes in the Caucasus continental collision zone. *International Journal of Earth Sciences*. 2003,92:407–425. <https://doi.org/10.1007/s00531-003-0326-y>
 47. Vanneste H., Kelly-Gerrey B.A., Connelly D.P., James R.H., Haackel M., Fisher R.E., Heeschen K., Mills R.A. Spatial variation in fluid flow and geochemical fluxes across the sediment–seawater interface at the Carlos Ribeiro mud volcano (Gulf of Cadiz). *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2011,75:1124–1144. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.11.017>
 48. Ершов В.В., Собисевич А.Л., Пузич И.Н. Глубинное строение грязевых вулканов Тамани по данным натурных исследований и математического моделирования. *Геофизические исследования*. 2015,16(2):69–76. EDN: TVTUBJ
 49. Собисевич А.Л., Горбатилов А.В., Овсяченко А.Н. Глубинное строение грязевого вулкана горы Карабетова. *Доклады Академии наук*. 2008,422(4):542–546.
 50. Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Тверитинова Т.Ю. О грязевом вулканизме в позднеальпийском складчатом сооружении Северо-Западного Кавказа (на примере изучения глубинного строения грязевого вулкана Шуго). *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2014,2(36):80–93.
 51. Шнюков Е.Ф., Алиев Ад.А., Рахманов Р.Р. Грязевой вулканизм Средиземного, Черного и Каспийского морей: специфика развития и проявления. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2017,2(48):5–25. EDN: ZJSTKD
 52. Шнюков Е.Ф., Нетребская Е.Я. О глубинном строении эруптивного канала грязевых вулканов. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2016,4(46):54–66. EDN: XSBZAR
 53. Stadnitskaia A., Blinova V., Ivanov M.K., Baas M., Hopmans E., van Weering T.C.E., Sinninghe Damste J.S. Lipid biomarkers in sediments of mud volcanoes from the Sorokin Trough, NE Black Sea: Probable source strata for the erupted material. *Organic Geochemistry*. 2007,38(1):67–83. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2006.08.012>
 54. Hensen C., Nuzzo M., Hornibrook E., Pinheiro L.M., Bock B., Magalhaes V.H., Bruckmann W. Sources of mud volcano fluids in the Gulf of Cadiz – indications for hydrothermal imprint. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2007,71(5):1232–1248. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.11.022>
 55. Лаврушин В.Ю., Kopf A., Deyhle A., Степанец М.И. Изотопы бора и формирование грязевулканических флюидов Тамани (Россия) и Кахетии (Грузия). *Литология и полезные ископаемые*. 2003,2:147–182. EDN: ONUADJ
 56. Etiope G., Baciuc C.L., Schoell M. Extreme methane deuterium, nitrogen and helium enrichment in natural gas from the Homorod seep (Romania). *Chemical Geology*. 2011,280(1–2):89–96. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.10.019>
 57. Etiope G., Feyzullayev A., Baciuc C.L. Terrestrial methane seeps and mud volcanoes: A global perspective of gas origin. *Marine and Petroleum Geology*. 2009,26(3):333–344. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.03.001>
 58. Baciuc C., Caracausi A., Etiope G., Italiano F. Mud volcanoes and methane seeps in Romania: main features and gas flux. *Annals of Geophysics*. 2007,50(4):501–511. <https://doi.org/10.4401/ag-4435>

59. Leon R., Somoza L., Medialdea T., Hernandez-Molina F.J., Vazquez J.T., Diaz-del-Rio V., Gonzalez F.J. Pockmarks, collapses and blind valleys in the Gulf of Cádiz. *Geo-Marine Letters*. 2010,30(3-4):231–247. <https://doi.org/10.1007/s00367-009-0169-z>
60. Cartwright J., Kirkham C., Espinoza D.N., James D., Hodgson N. The evolution of depletion zones beneath mud volcanoes. *Marine and Petroleum Geology*. 2023,155(7):106351. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106351>
61. Глазырин Е.А., Глазырина Н.В. Неоген-четвертичные карбонатные постройки и образования подводных газо-флюидных разгрузок Азово-Таманского региона. В кн.: *Геология рифов: Материалы Всерос. литологического совещ., 15–17 июня 2015 г., Сыктывкар*. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2015, с. 32–33. EDN: XRASDX
62. Hovland M., Curzi P. Gas seepage and assumed mud diapirism in the Italian Central Adriatic Sea. *Marine and Petroleum Geology*. 1989,6(2):161–169. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(89\)90019-6](https://doi.org/10.1016/0264-8172(89)90019-6)
63. Paull C.K., Dallimore S.R., Caress D.W., Gwiazda R., Melling H., Riedel M., Jin Y.K., Hong J.K., Kim Y.-G., et al. Active mud volcanoes on the continental slope of the Canadian Beaufort Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2015,16(9):3160–3181. <https://doi.org/10.1002/2015GC005928>
64. Jiangxin C., Haibin S., Yongxian G., Shengxiong Y., Luis M.P., Yang B., Boran L., Minghui G. Morphologies, classification and genesis of pockmarks, mud volcanoes and associated fluid escape features in the northern Zhongjiannan basin, South China Sea. *Deep Sea Research. Pt II: Topical Studies in Oceanography*. 2015,122:106–117. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2015.11.007>
65. Шнюков Е.Ф., Иванченко В.В., Пермяков В.В. Акцессорная минерализация сопочной брекчии грязевых вулканов Черного моря. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2014,1(35):45–68. EDN: SJTLHP
66. Шнюков Е.Ф., Нетребская Е.Я. Глубинное геологическое строение грязевых вулканов Черного моря. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2014,2(36):66–79. EDN: SJTLTX
67. Гинсбург Г.Д., Кремлев А.Н., Григорьев М.Н., Ларкин Г.В., Павленкин А.Д., Салтыкова Н.А. Фильтрогенные газовые гидраты в Черном море (21-й рейс НИС «Евпатория»). *Геология и геофизика*. 1990,31(3):10–20.
68. Milkov A.V., Vogt P.R., Crane K., Lein A.Y., Sassen R., Cherkashev G.A. Geological, geochemical, and microbial processes at the hydrate-bearing Håkon Mosby mud volcano: a review. *Chemical Geology*. 2004,205(3-4):347–366. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.12.030>
69. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П. Грязевулканические залежи газогидратов метана в Черном море. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2018,1(51):5–34. EDN: XOOQEP
70. Shnyukov Y., Koboлев V., Yanko V. Mud-volcanic deposits of methane gas hydrates in the Black Sea. In: *Gas Hydrate Technologies: Global Trends, Challenges and Horizons – 2020*: E3S Web of Conferences. 2021,230(7):01005. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202123001005>
71. Loher M., Pape T., Marcon Y., Römer M., Wintersteller P., Praeg D., Torres M., Sahling H., Bohrmann G. Mud extrusion and ring-fault gas seepage – upward branching fluid discharge at a deep-sea mud volcano. *Scientific Reports*. 2018,8(1):6275. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24689-1>
72. Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С., Обжиров А.И. Изотопно-газгеохимические особенности распределения метана и углекислого газа на о. Сахалин и прилегающем шельфе Охотского моря. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2012,2(20):100–113. EDN: PWRAPZ
73. Ершов В.В. Грязевые вулканы на планете Земля. О книге «Атлас грязевых вулканов мира». *Геосистемы переходных зон*. 2018,2(4):419–421. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.419-421>
74. Istadi B.P., Wibowo H.T., Sunardi E., Hadi S., Sawolo N. Mud volcano and its evolution. In: I.A. Dar (ed.). *Earth Sciences*. Publ.: InTechOpen, 2012, p. 375–434. <https://doi.org/10.5772/24944>
75. Mazzini A., Svensen H., Akhmanov G.G., Aloisi G., Planke S., Malthé-Sørensen A., Istadi B. Triggering and dynamic evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia. *Earth and Planetary Science Letters*. 2007,261(3-4):375–388. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.07.001>
76. Imposa S., Grassi S., De Guidi G., Battaglia F., Lanna G., Scudero S. 3D subsoil model of the San Biagio ‘Salinelle’ mud volcanoes (Belpasso, Sicily) derived from geophysical surveys. *Surveys in Geophysics*. 2016,37(4):1117–1138. <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9380-4>
77. Medialdea T., Somoza L., Pinheiro L.M., Fernandez-Puga M.C., Vazquez J.T., Leon R., Ivanov M.K., Magalhaes V., Diaz-del-Rio V., Vegas R. Tectonics and mud volcano development in the Gulf of Cadiz. *Marine Geology*. 2009,261(1):48–63. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.10.007>
78. Huguen C., Foucher J.P., Mascle J., Ondréas H., Thouement M., Gontharet S., Stadnitskaia A., Pierre C., Bayon G., et al. Menes caldera, a highly active site of brine seepage in the Eastern Mediterranean Sea: In situ observations from the NAUTINIL expedition (2003). *Marine Geology*. 2009,261(1-4):138–152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2009.02.005>

79. Robertson A.H.F., Kopf A. Tectonic setting and processes of mud volcanism on the Mediterranean Ridge accretionary complex: evidence from Leg 160. In: Robertson A.H.F. et al. (eds.) *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*. 1998,160:665–680.
80. Юдин В.В. Грязевой вулканизм в Горном Крыму. *Доклады Академии наук*. 1995,341(3):395–398.
81. Huguen C., Mascle J., Woodside J., Zitter T., Foucher J.P. Mud volcanoes and mud domes of the Central Mediterranean Ridge: near-bottom and in situ observations. *Deep-Sea Research. Part I*. 2005,52:1911–1931. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2005.05.006>
82. Kioka A., Ashi J., Sakaguchi A., Sato T., Muraoka S., Yamaguchi A., Hamamoto H., Wang K., Tokuyama H. Possible mechanism of mud volcanism at the prism-backstop contact in the western Mediterranean Ridge accretionary complex. *Marine Geology*. 2015,363:52–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2015.01.014>
83. Somoza L., Diaz-del-Rio V., Leon R., Ivanov M., Fernandez-Puga M.C., Gardner J.M., Hernandez-Molina F.J., Pinheiro L.M., Rodero J., et al. Seabed morphology and hydrocarbon seepage in the Gulf of Cadiz mud volcano area: acoustic imagery, multibeam and ultra-high resolution seismic data. *Marine Geology*. 2003,195(1-4):153–176. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00686-2](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00686-2)
84. Шельтинг С.К., Шейков А.А., Прокопцева С.В. О механизмах формирования складчатости и грязевого вулканизма в прогибе Сорокина. *ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти*. 2023,8(3):62–72. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2023-8-3-62-72>
85. Reed D.L., Silver E.A., Tagudin J.E., Shipley T.H., Vrolijk P. Relations between mud volcanoes, thrust deformation, slope sedimentation, and gas hydrate, offshore north Panama. *Marine and Petroleum Geology*. 1990,7(1):44–54. doi:10.1016/0264-8172(90)90055-1
86. Ben-Avraham Z., Reshef M., Smith G. Seismic signature of gas hydrate and mud volcanoes of the South African continental margin. In: Martinelli G., Panahi B. (eds.) *Mud volcanoes, geodynamics and seismicity: NATO Science Series, Series IV: Earth and Environmental Series*. Dordrecht: Springer, 2005, 51, p.17–27.
87. Argentino C., Mattingdal R., Eidvin T., Ohm S.E., Panier G. A constellation of mud volcanoes originated from a buried Arctic mega-slide, Southwestern Barents Sea. *Scientific Reports*. 2025,15(1):15161. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99578-5>
88. Riboulot V., Cattaneo A., Sultan N., Garziglia S., Ker S., Imbert P., Voisset M. Sea-level change and free gas occurrence influencing a submarine landslide and pockmark formation and distribution in deepwater Nigeria. *Earth and Planetary Science Letters*. 2013,375:78–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.05.013>
89. Khlystov O.M., Poort J., Mazzini A., Akhmanov G.G., Minami H., Hachikubo A., Khabuev A.V., Kazakov A.V., De Batist M., et al. Shallow-rooted mud volcanism in Lake Baikal. *Marine and Petroleum Geology*. 2019,102:580–589. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.01.005>
90. Беляева А.А., Ахманов Г.Г., Корост С.Р., Хлыстов О.М. Состав и строение грязевулканических отложений грязевого вулкана Большой (озеро Байкал). В кн.: *Морские исследования и образование: (MARESEDU-2017): Труды VI Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 2017*. Тверь: ПолиПРЕСС, 2017, с. 292–293. EDN: YPCYYK
91. Batist M.De, Rensbergen P.V., Vanneste M., Poort J., Klerkx J., Golmshtok A.Y., Kremlev A.N., Khlystov O.M., Krinitsky P. Active hydrate destabilization in Lake Baikal, Siberia? *Terra Nova*. 2002,14(6):436–442. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2002.00449.x>
92. Rensbergen P.V., Batist M.De, Klerkx J., Hus R., Poort J., Vanneste M., Granin N., Khlystov O., Krinitsky P. Sublacustrine mud volcanoes and methane seeps caused by dissociation of gas hydrates in Lake Baikal. *Geology*. 2002,30:631–634. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0631:SMVAMS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0631:SMVAMS>2.0.CO;2)
93. Богданов А.А., Видищева О.Н., Рязанцева К.Ю., Немченко Н.В., Ахманов Г.Г., Соловьева М.А. Результаты исследования углеводородных газов и органического вещества в донных отложениях грязевого вулкана «МГУ» в экспедиции Class@Baikal-2022. В кн.: *Морские исследования и образование (MARESEDU-2022): Труды XI Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 2022*. Тверь: ПолиПРЕСС, 2022, с. 171–174. EDN: CDZFDW
94. Пятилова А.М., Ахманов Г.Г., Соловьева М.А., Хлыстов О.М. Грязевые вулканы озера Байкал (по материалам Class@Baikal). В кн.: *Морские исследования и образование (MARESEDU-2022): Труды XI Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 2022*. Тверь: ПолиПРЕСС, 2022, с. 41–44. EDN: AGPFWQ
95. Xing Ju., Spiess V. Shallow gas transport and reservoirs in the vicinity of deeply rooted mud volcanoes in the central Black Sea. *Marine Geology*. 2015,369:67–78. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.08.005>
96. Ivanov M., Mazzini A., Blinova V., Kozlova E., Laberg J.-S., Matveeva T., Taviani M., Kaskov N. Seep mounds on the Southern Vøring Plateau (offshore Norway). *Marine and Petroleum Geology*. 2010,27(6):1235–1261. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.11.009>
97. Fryer P., Wheat C.G., Mottl M.J. Mariana blueschist mud volcanism: implications for conditions within the subduction zone. *Geology*. 1999,27(2):103–106. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027<0103:MBMVIF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<0103:MBMVIF>2.3.CO;2)

98. Fryer P. Serpentinite mud volcanism: Observations, processes, and implications. *Annual Review of Marine Science*. 2012,4(1):345–373. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120710-100922>
99. Savov I.P., Ryan J.G., D'Antonio M., Fryer P. Shallow slab fluid release across and along the Mariana arc-basin system: insights from geochemistry of serpentinized peridotites from the Mariana fore arc. *Journal of Geophysical Research*. 2007,112(B9):B09205. <https://doi.org/10.1029/2006JB004749>
100. Wheat C.G., Fryer P., Fisher A.T., Hulme S., Janasch H., Mottl M.J., Becker K. Borehole observations of fluid flow from South Chamorro Seamount, an active serpentinite mud volcano in the Mariana forearc. *Earth and Planetary Science Letters*. 2008,267(3):401–409. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.11.057>
101. Napoli S., Spatola D., Casalbore D., Lombardo L., Tanyas H., Chiocci F.L. Comprehensive global inventory of submarine mud volcanoes. *Scientific Data*. 2025,12(1):382. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04726-1>
102. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Кишанков А.В. Геофизические методы обеспечения технологического суверенитета и национальной безопасности России в Арктике. *Вестник РАН*. 2024,94(10):896–914. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869587324100055>; <https://elibrary.ru/ervsfe>
103. Миронюк С.Г., Коллюбакин А.А., Голенок О.А., Росляков А.Г., Терехина Я.Е., Токарев М.Ю. Грязе-вулканические структуры (вулканоиды) Карского моря: морфологические особенности и строение. В кн.: *Геология морей и океанов: Материалы XXII Междунар. науч. конф. (Школы) по морской геологии*, М.: ИО РАН, 2019, т. 5, с. 192–196. <https://doi.org/10.29006/978-5-9901449-9-6.ICMG-2019-5>
104. Богоявленский В.И. Фундаментальные аспекты генезиса катастрофических выбросов газа и образования гигантских кратеров в Арктике. *Арктика: экология и экономика*. 2021,11(1):51–66. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-1-51-66>
105. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Кишанков А.В., Казанин А.Г. Новая информация о субаквальной мерзлоте, газогидратах и взрывной дегазации Земли на шельфе и суше Арктики. В кн.: *Геология морей и океанов: Материалы XXVI Междунар. науч. конф. (Школы) по морской геологии*. М.: ИО РАН, 2025, т. 1, с. 47–51. <https://doi.org/10.29006/978-5-6051054-7-3>
106. Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M., Patton H., Vadakkepuliambatta S., Plaza-Faverola A., Gudlaugsson E., Serov P., Deryabin A., et al. Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor. *Science*. 2017,356(6341):948–953. <https://doi.org/10.1126/science.aal4500>
107. Solheim A., Elverhoi A. Gas-related sea floor craters in the Barents Sea. *Geo-Marine Letters*. 1993,13(4):235–243. <https://doi.org/10.1007/bf01207753>
108. Waage M., Serov P., Andreassen K., Waghorn K.A., Bünz S. Geological controls of giant crater development on the Arctic seafloor. *Scientific Reports*. 2020,10(1):8450. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65018-9>
109. Somoza L., Leon R., Medialdea T., Perez L.F., Gonzalez F.J., Maldonado A. Seafloor mounds, craters and depressions linked to seismic chimneys breaching fossilized diagenetic bottom simulating reflectors in the central and southern Scotia Sea, Antarctica. *Global and Planetary Change*. 2014,123:359–373. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.08.004>
110. Hensen C., Scholz F., Nuzzo M., Valadares V., Gràcia E., Terrinha P., Liebetrau V., Kaul N., Silva S., et al. Strike-slip faults mediate the rise of crustal-derived fluids and mud volcanism in the deep sea. *Geology*. 2015,43(4):339–342. <https://doi.org/10.1130/G36359.1>
111. Ломтев В.Л., Ильев А.Я., Гуринов М.Г. Новые данные о строении Магеллановых гор (Восточно-Марианская котловина, ЮЗ Пацифика). *Литосфера*. 2007,6:125–136. EDN: JVYRNZ
112. Татаринев А.В., Ялович Л.И., Канакин С.В. Особенности формирования и минеральные ассоциации литокомплексов грязевых вулканов на юге Восточной Сибири. *Вулканология и сейсмология*. 2016,4:34–49. <https://doi.org/10.7868/S0203030616030056>
113. Panieri G., Argentino C., Savini A., Ferré B., Hemmateenejad F., Eilertsen M.H., Mattingsdal R., Ramalho S.P., Eidvin T., et al. Sanctuary for vulnerable Arctic species at the Borealis Mud Volcano. *Nature Communications*. 2025,16(1):1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-55712-x>

References

1. Mazzini A., Etiope G. Mud volcanism: an updated review. *Earth-Science Reviews*. 2017,168:81–112. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.03.001>
2. Somoza L., Medialdea T., Leon R., Ercilla G., Vazquez J.T., Farran M.I., Hernandez-Molina J., Gonzalez J., Juan C., Fernandez-Puga M.C. Structure of mud volcano systems and pockmarks in the region of the Ceuta Contourite Depositional System (Western Alborán Sea). *Marine Geology*. 2012,332-334:4–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2012.06.002>
3. Judd A., Hovland M. *Seabed fluid flow: the impact on geology, biology and the marine environment*. Cambridge University Press, 2009, 492 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535918>

4. Yusubov N.P., Guliyev I.S. [*Mud volcanism and hydrocarbon systems of the South Caspian Basin (based on the latest data from geophysical and geochemical studies)*]. Baku: Elm, 2022, 168 p. (In Russ.).
5. Brown K.M. The nature and hydrogeologic significance of mud diapirs and diatremes for accretionary systems. *Journal of Geophysical Research*. 1990,95:8969–8982. <https://doi.org/10.1029/jb095ib06p08969>
6. Kopf A.J. Significance of mud volcanism. *Reviews of Geophysics*. 2002,40(2):52. doi:10.1029/2000RG000093
7. Loseth H., Wensaas L., Arntsen B., Hanken N.-M., Basire C., Graue K. 1000 m long gas blow-out pipes. *Marine and Petroleum Geology*. 2011,28:1047–1060. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.10.001>
8. Bogoyavlensky V.I. New data on mud volcanism in the Arctic on the Yamal peninsula. *Doklady Earth Sciences*. 2023,512:847–853. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23601116>
9. Leon R., Somoza L., Medialdea T., Maestro A., Diazdel-Rio V., Fernandez-Puga M.C. Classification of sea-floor features associated with methane seeps along the Gulf of Cadiz continental margin. *Deep-Sea Research*. 2006,53(11-13):1464–1481. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2006.04.009>
10. Pryce E., Kirkham C., Cartwright J. Crater formation during the onset of mud volcanism. *Geology*. 2023,51(3):252–256. <https://doi.org/10.1130/G50713.1>
11. Antipin V.S., Fedorov A.M., Pokrovsky B.G. Formation of the Patom crater by phreatic explosion: geological and isotope-geochemical evidence. *Lithology and Mineral Resources*. 2015,50(6):478–487. <https://doi.org/10.1134/S0024490215060024>
12. Isayev V.P., Isayev P.V., Rasvoszhaeva E.A. [Patomsky gaslithoclastite volcano]. *Oil and Gas Geology*. 2012,3:77–83. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/ozeovb>
13. Judd A. Gas emissions from mud volcanoes. Significance to global climate change. In: Martinelli G., Panahi B. (eds) *Mud volcanoes, geodynamics and seismicity: NATO Science Series, Series IV: Earth and Environmental Series*. Dordrecht: Springer, 2005, 51, p. 147–157. <https://doi.org/10.1007/1-4020-3204-8>
14. Milkov A.V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. *Marine Geology*. 2000,167(1-2):29–42. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(00\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00022-0)
15. Gubkin I.M., Fedorov S.F. [*Mud volcanoes of the Soviet Union and their connection with the genesis of oil fields of the Crimean-Caucasian geological province*]. Moscow: Publ. of the USSR Academy of Sciences, 1938, 44 p. (In Russ.).
16. Glumov I.F., Gulev V.L., Karnaukhov S.M., Senin B.V. [*Regional geology and oil and gas potential of the Black Sea deep-sea basin and adjacent shelf zones*]. Pt. 2. Moscow: Nedra, 2014, 181 p. (In Russ.).
17. Guliev I.S., Yusubov N.P., Guseynova S.M. On the formation mechanism of mud volcanoes in the South Caspian basin according to 2D and 3D seismic data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2020,56(5):721–727. <https://doi.org/10.1134/S106935132005002X>
18. Glazyrin E.A. [Main results of the study of underwater mud volcanism of the Kerch-Taman region]. In: *Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus*. Moscow: IIET RAN, 2017, vol. 7, pt. 2: 39–48. (In Russ.).
19. Glazyrin E.A. [On forecasting mud volcano eruptions and assessing the hazard of mud volcanic activity on the Kerch-Taman shelf]. In: [*Patterns of formation and impact of marine and atmospheric hazardous phenomena and disasters on the coastal zone of the Russian Federation in the context of global climatic and industrial challenges ("Hazardous Phenomena")*]: Proceedings of the International Scientific Conf., Rostov-on-Don, June 13–23, 2019]. Rostov-on-Don: Publ. of the Southern Scientific Center of RAS, 2019, p. 37–39 (In Russ.).
20. Glazyrin E.A. [State monitoring of the subsoil condition of the coastal-shelf zone of the Azov, Black and Caspian seas – main results and development prospects]. In: *Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus*. Moscow: IIET RAN, 2020, vol. 10, pt. 2: 325–332. (In Russ.).
21. Glazyrin E.A., Karpenko A.N., Karpenko G.E., Leshchenko D.P., Marfin A.A., Prokoptsev G.N., Silchenko A.Y. [*Information bulletin on the state of the subsoil of the coastal-shelf zones of the Azov, Black and Caspian seas in 2023*]. Moscow: Nauchnaya biblioteka [Scientific library], 2024, 122 p. (In Russ.).
22. Glazyrin E.A., Glazyrina N.V. [Ust-Chekupskoe mud volcanic field of the Kerch-Taman mud volcanic region]. In: *Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus*. Moscow: IIET RAS, 2025, vol. 15: 260–265. (In Russ.).
23. Tinivella U., Giustiniani M. An overview of mud volcanoes associated to gas hydrate system. In: Nemeth K. (ed.) *Updates in volcanology – New advances in understanding volcanic systems*. 2012, p. 225–267. <http://dx.doi.org/10.5772/51270>
24. Milkov A.V. Global distribution of mud volcanoes and their significance in petroleum exploration as a source of methane in the atmosphere and hydrosphere and as a geohazard. In: Martinelli G., Panahi B. (eds) *Mud volcanoes, geodynamics and seismicity: NATO Science Series, Series IV: Earth and Environmental Series*. Dordrecht: Springer, 2005, 51, p. 29–34. https://doi.org/10.1007/1-4020-3204-8_3
25. Ismagilov A.F., Kozlov V.N., Terekhov A.A., Khortov A.V. [Clay diapirism and mud volcanism in the formation of local structures in the Russian part of the Black

- Sea]. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2006,2:4–10. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/hsnkk1>
26. Kholodov V.N. [Mud volcanoes: distribution and genesis]. *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*. 2012,4(30):5–27. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/pjwoil>
27. Dimitrov L.I. Mud volcanoes – the most important pathway for degassing deeply buried sediments. *Earth-Science Reviews*. 2002,59:49–76. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00069-7](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00069-7)
28. Kalinko M.K. [Mud volcanoes, causes of their occurrence, development and attenuation]. *Trudy VNIGNI [Proceedings of the All-Russian Research Geological Oil Institute]*. 1964,40:30–54. (In Russ.).
29. Kikvadze O.E., Lavrushin V.Yu., Pokrovskii B.G., Polyak B.G. Isotope and chemical composition of gases from mud volcanoes in the Taman Peninsula and problem of their genesis. *Lithology and Mineral Resources*. 2014,49:491–504. <https://doi.org/10.1134/S0024490214060066>
30. Kurishko V.A., Mesyats I.A., Terdovidov A.S. [Hydrogeology of mud volcanism of the Kerch Peninsula]. *Geological Journal*. 1968,28(1):49–59. (In Russ.).
31. Lavrushin V.Yu., Aydarkozhina A.S., Chelnokov G.A., Petrov O.L., Sokol E.V. Mud volcanic fluids of the Kerch–Taman region: geochemical reconstructions and regional trends. Communication 1: Geochemical features and genesis of mud-volcanic waters. *Lithology and Mineral Resources*. 2021,56:461–486. <https://doi.org/10.1134/S0024490221060043>
32. Lavrushin V.Yu., Kikvadze O.E., Pokrovsky B.G., Polyak B.G., Guliev I.S., Aliev A.A. Waters from mud volcanoes of Azerbaijan: isotopic-geochemical properties and generation environments. *Lithology and Mineral Resources*. 2015,50:1–25. <https://doi.org/10.1134/S0024490215010034>
33. Lavrushin V.Yu., Kikvadze O.E., Pokrovsky B.G., Aliev Ad.A., Polyak B.G. [Waters of mud volcanoes of the Caucasus region: geochemical features and formation conditions]. *Transactions of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011,57:217–221. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/pxndyv>
34. Shnyukov E.F., Sobolevsky Y.V., Gnatenko G.K., Naumenko P.I., Kutniy V.A. [Mud volcanoes of the Kerch–Taman region]: Atlas. Kyiv: Naukova Dumka, 1986, 152 p. (In Russ.).
35. Milkov A.V., Sassen R., Apanasovich T.V., Dadashov F.G. Global gas flux from mud volcanoes: a significant source of fossil methane in the atmosphere and the ocean. *Geophysical Research Letters*. 2003,30(2):1037. <https://doi.org/10.1029/2002GL016358>
36. Mazzini A., Svensen H., Planke S., Guliyev I., Akhmanov G.G., Fallik T., Bank D. When mud volcanoes sleep: Insight from seep geochemistry at the Dashgil mud volcano, Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*. 2009,26:1704–1715. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.11.003>
37. Shnyukov E.F., Kobolev V.P. Blind mud volcanoes of the Black Sea. *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*. 2020,16(2):49–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.15407/gpimo2020.02.049>
38. Nazarov N.O. [Mud volcanoes of the Keymir-Chikishlyar region of southwestern Turkmenistan]. Ashgabat: Academy of Sciences of the Turkmen SSR, 1957, 117 p.
39. Aliyev Ad.A., Guliyev I.S., Dadashov F.H., Rahmanov R.R. *Atlas of world mud volcanoes*. Baku: Naf-ta-Press, 2015, 321 p.
40. Limonov A.F. Mud volcanoes. *Soros Educational Journal*. 2004,8(1):63–69. (In Russ.).
41. Kholodov V.N. Mud volcanoes, their distribution regularities and genesis. Communication 1. Mud volcanic provinces and morphology of mud volcanoes. *Lithology and Mineral Resources*. 2002,37:197–209. <https://doi.org/10.1023/A:1015425612749>
42. Mascle J., Mary F., Praeg D., Brosolo L., Camera L., Ceramicola S., Dupré S. Distribution and geological control of mud volcanoes and other fluid/free gas seepage features in the Mediterranean Sea and nearby Gulf of Cadiz. *Geo-Marine Letters*. 2014,34(2–3):89–110. <https://doi.org/10.1007/s00367-014-0356-4>
43. Bonini M. Mud volcanoes: Indicators of stress orientation and tectonic controls. *Earth-Science Reviews*. 2012,115:121–152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2012.09.002>
44. Feyzullayev A.A. Mud volcanoes in the South Caspian basin: Nature and estimated depth of its products. *Natural Science*. 2012,4(7):445–453. <http://dx.doi.org/10.4236/ns.2012.47060>
45. Huseynov D.A., Guliyev I.S. Mud volcanic natural phenomena in the South Caspian Basin: geology, fluid dynamics and environmental impact. *Environmental Geology*. 2004,46:1012–1023. <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1088-y>
46. Kopf A., Deyhle A., Lavrushin V.Y., Polyak B.G., Gieskes J.M., Buachidze G.I., Wallmann K., Eisenhauer A. Isotopic evidence (He, B, C) for deep fluid and mud mobilization from mud volcanoes in the Caucasus continental collision zone. *International Journal of Earth Sciences*. 2003,92:407–425. <https://doi.org/10.1007/s00531-003-0326-y>
47. Vanneste H., Kelly-Gerreyn B.A., Connelly D.P., James R.H., Haeckel M., Fisher R.E., Heeschen K., Mills R.A. Spatial variation in fluid flow and geochemi-

- cal fluxes across the sediment–seawater interface at the Carlos Ribeiro mud volcano (Gulf of Cadiz). *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2011,75:1124–1144. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.11.017>
48. Ershov V.V., Sobisevich A.L., Puzich I.N. [Deep structure of Taman mud volcanoes based on field studies and mathematical modeling]. *Geophysical Research*. 2015,16(2):69–76. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/tvtubj>
49. Sobissevitch A.L., Gorbatiykov A.V., Ovsuchenko A.N. Deep structure of the Mt. Karabetov mud volcano. *Doklady Earth Sciences*. 2008,422:1181–1185. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08070428>
50. Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Tveritinova T.Y. On mud volcanism in the late Alpine folded edifice of the Northwestern Caucasus (based on an example of the study of the deep structure of the Shugo mud volcano). *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*. 2014,2(36):80–93. (In Russ.).
51. Shnyukov E.F., Aliev Ad.A., Rakhmanov R.R. Mud volcanism of the Mediterranean, Black and Caspian seas: specifics of development and manifestations. *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*. 2017,2(48):5–25. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/zjstkd>
52. Shnyukov E.F., Netrebskaya E.Y. [On the deep structure of the eruptive vent of mud volcanoes]. *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*. 2016,4(46):54–66. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/xsbzar>
53. Stadnitskaia A., Blinova V., Ivanov M.K., Baas M., Hopmans E., van Weering T.C.E., Sinninghe Damste J.S. Lipid biomarkers in sediments of mud volcanoes from the Sorokin Trough, NE Black Sea: Probable source strata for the erupted material. *Organic Geochemistry*. 2007,38(1):67–83. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2006.08.012>
54. Hensen C., Nuzzo M., Hornibrook E., Pinheiro L.M., Bock B., Magalhaes V.H., Bruckmann W. Sources of mud volcano fluids in the Gulf of Cadiz – indications for hydrothermal imprint. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2007,71(5):1232–1248. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.11.022>
55. Lavrushin V.Yu., Kopf A., Deyhle A., Stepanets M.I. Formation of mud-volcanic fluids in Timan (Russia) and Kakhetia (Georgia): evidence from boron isotopes. *Lithology and Mineral Resources*. 2003,38:120–153. <https://doi.org/10.1023/a:1023452025440>
56. Etiope G., Baciuc C.L., Schoell M. Extreme methane deuterium, nitrogen and helium enrichment in natural gas from the Homorod seep (Romania). *Chemical Geology*. 2011,280(1–2):89–96. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.10.019>
57. Etiope G., Feyzullayev A., Baciuc C.L. Terrestrial methane seeps and mud volcanoes: A global perspective of gas origin. *Marine and Petroleum Geology*. 2009,26(3):333–344. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.03.001>
58. Baciuc C., Caracausi A., Etiope G., Italiano F. Mud volcanoes and methane seeps in Romania: main features and gas flux. *Annals of Geophysics*. 2007,50(4):501–511. <https://doi.org/10.4401/ag-4435>
59. Leon R., Somoza L., Medialdea T., Hernandez-Molina F.J., Vazquez J.T., Diaz-del-Rio V., Gonzalez F.J. Pockmarks, collapses and blind valleys in the Gulf of Cádiz. *Geo-Marine Letters*. 2010,30(3–4):231–247. <https://doi.org/10.1007/s00367-009-0169-z>
60. Cartwright J., Kirkham C., Espinoza D.N., James D., Hodgson N. The evolution of depletion zones beneath mud volcanoes. *Marine and Petroleum Geology*. 2023,155(7):106351. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106351>
61. Glazyrin E.A., Glazyrina N.V. [Neogene-Quaternary carbonate structures and formations of underwater gas-fluid discharges of the Azov-Taman region]. In: *Geology of reefs: Proceedings of All-Russian lithological meeting, June 15–17, 2015, Syktyvkar*. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2015, p. 32–33. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/xrsadx>
62. Hovland M., Curzi P. Gas seepage and assumed mud diapirism in the Italian Central Adriatic Sea. *Marine and Petroleum Geology*. 1989,6(2):161–169. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(89\)90019-6](https://doi.org/10.1016/0264-8172(89)90019-6)
63. Paull C.K., Dallimore S.R., Caress D.W., Gwiazda R., Melling H., Riedel M., Jin Y.K., Hong J.K., Kim Y.-G., et al. Active mud volcanoes on the continental slope of the Canadian Beaufort Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2015,16(9):3160–3181. <https://doi.org/10.1002/2015GC005928>
64. Jiangxin C., Haibin S., Yongxian G., Shengxiong Y., Luis M.P., Yang B., Boran L., Minghui G. Morphologies, classification and genesis of pockmarks, mud volcanoes and associated fluid escape features in the northern Zhongjiannan basin, South China Sea. *Deep Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2015,122:106–117. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2015.11.007>
65. Shnyukov E.F., Ivanchenko V.V., Permyakov V.V. [Accessory mineralization of mud breccia of the Black Sea mud volcanoes. *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*]. 2014,1(35):45–68. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/sjtlhp>
66. Shnyukov E.F., Netrebskaya E.Y. [Deep geological structure of mud volcanoes of the Black Sea]. *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*. 2014,2(36):66–79. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/sjtltx>
67. Ginsburg G.D., Kremlev A.N., Grigoriev M.N., Larkin G.V., Pavlenkin A.D., Saltykova N.A. [Fil-

- trogenic gas hydrates in the Black Sea (21st voyage of the R/V Eupatoria)]. *Geology and Geophysics*. 1990,31(3):10–20. (In Russ.).
68. Milkov A.V., Vogt P.R., Crane K., Lein A.Y., Sassen R., Cherkashev G.A. Geological, geochemical, and microbial processes at the hydrate-bearing Håkon Mosby mud volcano: a review. *Chemical Geology*. 2004,205(3–4):347–366. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.12.030>
69. Shnyukov E.F., Kobolev V.P. [Mud volcanic deposits of methane gas hydrates in the Black Sea]. *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*. 2018,1(51):5–34. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/xooqep>
70. Shnyukov Y., Kobolev V., Yanko V. Mud-volcanic deposits of methane gas hydrates in the Black Sea. In: *Gas Hydrate Technologies: Global Trends, Challenges and Horizons – 2020*: E3S Web of Conferences. 2021,230(7):01005. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202123001005>
71. Loher M., Pape T., Marcon Y., Römer M., Wintersteller P., Praeg D., Torres M., Sahling H., Bohrmann G. Mud extrusion and ring-fault gas seepage – upward branching fluid discharge at a deep-sea mud volcano. *Scientific Reports*. 2018,8(1):6275. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24689-1>
72. Shakirov R.B., Syrбу N.S., Obzhіrov A.I. Isotope-gas-geochemical features of methane and carbon dioxide distribution on Sakhalin Island and the adjacent shelf of the Sea of Okhotsk. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*. 2012,2(20):100–113. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/pwrpaz>
73. Ershov V.V. Mud volcanoes on the planet Earth: review of monograph «Atlas of the world mud volcanoes». *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*. 2018,2(4):419–421. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.419-421>
74. Istadi B.P., Wibowo H.T., Sunardi E., Hadi S., Sawolo N. Mud volcano and its evolution. In: I.A. Dar (ed.). *Earth Sciences*. Publ.: InTechOpen, 2012, p. 375–434. <https://doi.org/10.5772/24944>
75. Mazzini A., Svensen H., Akhmanov G.G., Aloisi G., Planke S., Malthé-Sørensen A., Istadi B. Triggering and dynamic evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia. *Earth and Planetary Science Letters*. 2007,261(3–4):375–388. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.07.001>
76. Imposi S., Grassi S., De Guidi G., Battaglia F., Lanna G., Scudero S. 3D subsoil model of the San Biagio ‘Salinelle’ mud volcanoes (Belpasso, Sicily) derived from geophysical surveys. *Surveys in Geophysics*. 2016,37(4):1117–1138. <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9380-4>
77. Medialdea T., Somoza L., Pinheiro L.M., Fernandez-Puga M.C., Vazquez J.T., Lean R., Ivanov M.K., Magalhaes V., Diaz-del-Rio V., Vegas R. Tectonics and mud volcano development in the Gulf of Cadiz. *Marine Geology*. 2009,261(1):48–63. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.10.007>
78. Huguen C., Foucher J.P., Mascle J., Ondréas H., Thouement M., Gontharet S., Stadnitskaia A., Pierre C., Bayon G., et al. Menes caldera, a highly active site of brine seepage in the Eastern Mediterranean Sea: In situ observations from the NAUTINIL expedition (2003). *Marine Geology*. 2009,261(1–4):138–152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2009.02.005>
79. Robertson A.H.F., Kopf A. Tectonic setting and processes of mud volcanism on the Mediterranean Ridge accretionary complex: evidence from Leg 160. In: Robertson A.H.F. et al. (eds.) *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*. 1998,160:665–680.
80. Yudin V.V. Mud volcanism in the Crimea Mountains. *Doklady: Reports of the Academy of Sciences*. 1995,341(3):395–398. (In Russ.).
81. Huguen C., Mascle J., Woodside J., Zitter T., Foucher J.P. Mud volcanoes and mud domes of the Central Mediterranean Ridge: near-bottom and in situ observations. *Deep-Sea Research. Part I*. 2005,52:1911–1931. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2005.05.006>
82. Kioka A., Ashi J., Sakaguchi A., Sato T., Muraoka S., Yamaguchi A., Hamamoto H., Wang K., Tokuyama H. Possible mechanism of mud volcanism at the prism-backstop contact in the western Mediterranean Ridge accretionary complex. *Marine Geology*. 2015,363:52–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2015.01.014>
83. Somoza L., Diaz-del-Rio V., Leon R., Ivanov M., Fernandez-Puga M.C., Gardner J.M., Hernandez-Molina F.J., Pinheiro L.M., Rodero J., et al. Seabed morphology and hydrocarbon seepage in the Gulf of Cadiz mud volcano area: acoustic imagery, multibeam and ultra-high resolution seismic data. *Marine Geology*. 2003,195(1–4):153–176. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00686-2](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00686-2)
84. Shelting S.K., Sheikov A.A., Prokoptseva S.V. [On the mechanisms of folding and mud volcanism formation in the Sorokin Trough]. *PRONEFT*. 2023,8(3):62–72 (In Russ.). <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2023-8-3-62-72>
85. Reed D.L., Silver E.A., Tagudin J.E., Shipley T. H., Vrolijk P. Relations between mud volcanoes, thrust deformation, slope sedimentation, and gas hydrate, offshore north Panama. *Marine and Petroleum Geology*. 1990,7(1):44–54. doi:10.1016/0264-8172(90)90055-1
86. Ben-Avraham Z., Reshef M., Smith G. Seismic signature of gas hydrate and mud volcanoes of the South African continental margin. In: Martinelli G., Panahi B. (eds.) *Mud volcanoes, geodynamics and seismicity: NATO Science Series, Series IV: Earth and Environmental Series*. Dordrecht: Springer, 2005, 51, p.17–27.
87. Argentino C., Mattingsdal R., Eidvin T., Ohm S.E., Panier G. A constellation of mud volcanoes originated

- from a buried Arctic mega-slide, Southwestern Barents Sea. *Scientific Reports*. 2025,15(1):15161. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99578-5>
88. Riboulot V., Cattaneo A., Sultan N., Garziglia S., Ker S., Imbert P., Voisset M. Sea-level change and free gas occurrence influencing a submarine landslide and pockmark formation and distribution in deepwater Nigeria. *Earth and Planetary Science Letters*. 2013,375:78–91. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.05.013>
 89. Khlystov O.M., Poort J., Mazzini A., Akhmanov G.G., Minami H., Hachikubo A., Khabuev A.V., Kazakov A.V., De Batist M., et al. Shallow-rooted mud volcanism in Lake Baikal. *Marine and Petroleum Geology*. 2019,102:580–589. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.01.005>
 90. Belyaeva A.A., Akhmanov G.G., Korost S.R., Khlystov O.M. [Composition and structure of mud volcanic deposits of the Bolshoy mud volcano (Lake Baikal)]. In: *Marine Research and Education: (MARESEDU-2017): Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference, Moscow, 2017*. Tver: PoliPRESS, 2017, p. 292–293. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/ypcyyk>
 91. Batist M.De, Rensbergen P.V., Vanneste M., Poort J., Klerkx J., Golmshtok A.Y., Kremlev A.N., Khlystov O.M., Krinitsky P. Active hydrate destabilization in Lake Baikal, Siberia? *Terra Nova*. 2002,14(6):436–442. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2002.00449.x>
 92. Rensbergen P.V., Batist M.De, Klerkx J., Hus R., Poort J., Vanneste M., Granin N., Khlystov O., Krinitsky P. Sublacustrine mud volcanoes and methane seeps caused by dissociation of gas hydrates in Lake Baikal. *Geology*. 2002,30:631–634. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0631:SMVAMS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0631:SMVAMS>2.0.CO;2)
 93. Bogdanov A.A., Vidishcheva O.N., Ryazantseva K.Yu., Nemchenko N.V., Akhmanov G.G., Solovieva M.A. [Results of the study of hydrocarbon gases and organic matter in the bottom sediments of the MSU mud volcano during the Class@Baikal-2022 expedition]. In: *Морские исследования и образование (MARESEDU-2022): Труды XI Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 2022*. Tver: PoliPRESS, 2022, p. 171–174. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/cdzfdw>
 94. Pyatilova A.M., Akhmanov G.G., Solovieva M.A., Khlystov O.M. [Mud volcanoes of Lake Baikal (based on Class@Baikal materials)]. In: *Marine Research and Education (MARESEDU-2022): Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference, Moscow, 2022*. Tver: PoliPRESS, 2022, p. 41–44. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/agpfwq>
 95. Xing Ju., Spiess V. Shallow gas transport and reservoirs in the vicinity of deeply rooted mud volcanoes in the central Black Sea. *Marine Geology*. 2015,369:67–78. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.08.005>
 96. Ivanov M., Mazzini A., Blinova V., Kozlova E., Laberg J.-S., Matveeva T., Taviani M., Kaskov N. Seep mounds on the Southern Vøring Plateau (off-shore Norway). *Marine and Petroleum Geology*. 2010,27(6):1235–1261. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.11.009>
 97. Fryer P., Wheat C.G., Mottl M.J. Mariana blueschist mud volcanism: implications for conditions within the subduction zone. *Geology*. 1999,27(2):103–106. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027<0103:MBMVIF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<0103:MBMVIF>2.3.CO;2)
 98. Fryer P. Serpentinite mud volcanism: Observations, processes, and implications. *Annual Review of Marine Science*. 2012,4(1):345–373. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120710-100922>
 99. Savov I.P., Ryan J.G., D'Antonio M., Fryer P. Shallow slab fluid release across and along the Mariana arc-basin system: insights from geochemistry of serpentinized peridotites from the Mariana fore arc. *Journal of Geophysical Research*. 2007,112(B9):B09205. <https://doi.org/10.1029/2006JB004749>
 100. Wheat C.G., Fryer P., Fisher A.T., Hulme S., Janasch H., Mottl M.J., Becker K. Borehole observations of fluid flow from South Chamorro Seamount, an active serpentinite mud volcano in the Mariana forearc. *Earth and Planetary Science Letters*. 2008,267(3):401–409. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.11.057>
 101. Napoli S., Spatola D., Casalbore D., Lombardo L., Tanyas H., Chiocci F.L. Comprehensive global inventory of submarine mud volcanoes. *Scientific Data*. 2025,12(1):382. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04726-1>
 102. Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Kishankov A.V. Geophysical methods of ensuring technological sovereignty and national security of Russia in the Arctic. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2024,94(10):32–46. doi:10.31857/S0869587324100055; <https://elibrary.ru/ervsfe>
 103. Mironyuk S.G., Kolyubakin A.A., Golenok O.A., Roslyakov A.G., Terekhova Ya.E., Tokarev M.Y. [Mud volcanic structures (volcanoids) of the Kara Sea: morphological features and structure]. In: *Geology of seas and oceans: Proceedings of XXII International Conference on marine geology*. Moscow: IO RAS, 2019, 5, p. 192–196. (In Russ.). <https://doi.org/10.29006/978-5-9901449-9-6.ICMG-2019-5>
 104. Bogoyavlensky V.I. Fundamental aspects of the catastrophic gas blowout genesis and the formation of giant craters in the Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*. 2021,11(1):51–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-1-51-66>
 105. Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Kishankov A.V., Kazanin A.G. New information on subaqueous permafrost, gas hydrates and explosive degassing of the Earth on shelf and on land of the Arctic. In: *Ge-*

- ology of seas and oceans: *Proceedings of XXVI International Conference on marine geology*. Moscow: IO RAS, 2025, 1, p. 47–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.29006/978-5-6051054-7-3>
106. Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M., Patton H., Vadakkepuliambatta S., Plaza-Faverola A., Gudlaugsson E., Serov P., Deryabin A., et al. Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor. *Science*. 2017,356(6341):948–953. <https://doi.org/10.1126/science.aal4500>
 107. Solheim A., Elverhoi A. Gas-related sea floor craters in the Barents Sea. *Geo-Marine Letters*. 1993,13(4):235–243. <https://doi.org/10.1007/bf01207753>
 108. Waage M., Serov P., Andreassen K., Waghorn K.A., Bünz S. Geological controls of giant crater development on the Arctic seafloor. *Scientific Reports*. 2020,10(1):8450. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65018-9>
 109. Somoza L., Leon R., Medialdea T., Perez L.F., Gonzalez F.J., Maldonado A. Seafloor mounds, craters and depressions linked to seismic chimneys breaching fossilized diagenetic bottom simulating reflectors in the central and southern Scotia Sea, Antarctica. *Global and Planetary Change*. 2014,123:359–373. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.08.004>
 110. Hensen C., Scholz F., Nuzzo M., Valadares V., Gràcia E., Terrinha P., Liebetrau V., Kaul N., Silva S., et al. Strike-slip faults mediate the rise of crustal-derived fluids and mud volcanism in the deep sea. *Geology*. 2015,43(4):339–342. <https://doi.org/10.1130/G36359.1>
 111. Lomtev V.L., Il'ev A.Ya., Gurinov M.G. New data about Magellan Seamounts structure (East Mariana Basin, SW Pacific). *Lithosphere*. 2007,6:125–136. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/jvyrnz>
 112. Tatarinov A.V., Yalovik L.I., Kanakin S.V. The generation and mineral associations of rock assemblages at mud volcanoes: Southeastern Siberia. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2016,10(4):248–262. <https://doi.org/10.1134/S0742046316030052>
 113. Panieri G., Argentino C., Savini A., Ferré B., Hemmateenejad F., Eilertsen M.H., Mattingsdal R., Ramalho S.P., Eidvin T., et al. Sanctuary for vulnerable Arctic species at the Borealis Mud Volcano. *Nature Communications*. 2025,16(1):1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-55712-x>

Об авторе

Глазырин Евгений Анатольевич, кандидат геолого-минералогических наук, главный геолог экспедиции по комплексным инженерно-геологическим изысканиям «Инжгео» АО «Южное научно-производственное объединение по морским геологоразведочным работам» (АО «ЮЖМОРГЕОЛОГИЯ»), г. Геленджик, Россия, eaglazyrin@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0005-9980-1493>

Поступила 06.03.2026

Принята к публикации 11.05.2026

About the Author

Glazyrin, Evgeny A., Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Chief Geologist of the Inzhgeo Expedition for Integrated Engineering and Geological Surveys, a subsidiary of the Southern Scientific and Production Association for Marine Geological Explorations JSC (JSC YUZHMOREGEOLOGIYA), Gelendzhik, Russia, eaglazyrin@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0005-9980-1493>

Received 6 March 2026

Accepted 11 May 2026

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



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

УДК 551.21+551.2.03+551.79

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.2.158-172>
<https://www.elibrary.ru/hsbssq>

Позднеголоценовый вулканизм кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курильские о-ва): предварительные результаты по данным радиоуглеродного датирования

А. В. Дегтерев, М. В. Чибисова

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

Резюме. Приводятся предварительные результаты тephростратиграфических исследований и радиоуглеродного датирования почвенно-пирокластического чехла кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курилы). Определен изотопный возраст не менее 8 извержений различного типа, происходивших в интервале от 5100 до 150 кал. л. н. Наибольшее количество эксплозивных извержений, сопровождавшихся выбросами пемзовой пирокластики, отмечено в интервалах 2800–2400 и 1500–800 кал. л. н. Мощная активизация вулканизма в кальдере Медвежья, имевшая преимущественно эффузивный характер, пришлась на последние 600–500 лет. В это время, предположительно, происходило формирование лавовых полей Восток, Коротышка, побочного центра Крошка, а также лавовых потоков Черныш и Рукава. Возраст древесины (150 ± 130 кал. л. н.) из-под лавового потока Черныш хорошо соотносится с датами исторических извержений вулкана Кудрявый, наблюдавшихся в XVIII и XIX вв. Высокая частота извержений в позднем голоцене и отсутствие длительных периодов покоя позволяют рассматривать вулканы Кудрявый и Меньший Брат как потенциально активные в ближайшем будущем, что требует продолжения мониторинга и детального изучения их эруптивной истории.

Ключевые слова: кальдера Медвежья, вулкан Кудрявый, вулкан Меньший Брат, о. Итуруп, Курильские острова, тephрохронология, радиоуглеродное датирование, голоцен

Late Holocene volcanic activity in the Medvezhya caldera (Iturup Island, Southern Kuril Islands): preliminary results from radiocarbon dating data

Artem V. Degterev, Marina V. Chibisova

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

Abstract. Preliminary results of tephrostratigraphic studies and radiocarbon dating of the soil-pyroclastic cover of the Medvezhya caldera (Iturup Island, Southern Kuriles) are presented. A total of at least 8 eruptions of various types were dated, occurring in the interval from 5100 to 150 cal. yr BP. The largest number of explosive eruptions accompanied by emissions of pumice pyroclastics was recorded in the intervals of 2800–2400 and 1500–800 cal. yr BP. A major activation of volcanism within the Medvezhya caldera, predominantly effusive in character, occurred during the last 600–500 years. During this time, the lava fields Vostok, Korotyshka, the lateral vent Kroshka, as well as the lava flows Chernysh and Rukava were presumably formed. The age of wood (150 ± 130 cal. yr BP) from beneath the Chernysh lava flow correlates well with the dates of historical eruptions of Kudryavy volcano observed in the 18th and 19th centuries. The high eruption frequency in the Late Holocene and the absence of long periods of quiescence suggest that Kudryavy and Menshy Brat volcanoes should be considered as potentially active in the near future, which requires continued monitoring and detailed study of their eruptive history.

Keywords: Medvezhya caldera, Kudryavy volcano, Men'shoi Brat volcano, Iturup Island, Kuril Islands, tephrochronology, radiocarbon dating, Holocene

Финансирование и благодарности

Исследования проведены в рамках НИР ИМГиГ ДВО РАН «Вулканизм Сахалина и Курильских островов: хронология, петролого-геохимические особенности, гидротермальные проявления, мониторинг вулканической активности» (FWWM 2024-0003).

Авторы признательны А.В. Рыбину (1958–2024) за идею проведения данных исследований и всестороннюю помощь. Отдельную благодарность выражаем д.г.-м.н. М.М. Певзнер (ГИН РАН, Москва) за выполнение работ по радиоуглеродному датированию, ценные советы и рекомендации при подготовке рукописи. Авторы также благодарят рецензентов за внимание к статье и конструктивные замечания, способствовавшие ее улучшению.

Для цитирования: Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Позднеголоценовый вулканизм кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курильские о-ва): предварительные результаты по данным радиоуглеродного датирования. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 2, с. 158–172. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.2.158-172>; <https://www.elibrary.ru/hsbssq>

Funding and Acknowledgements

The studies were carried out within the framework of the research project of IMG G FEB RAS “Volcanism of Sakhalin and the Kuril Islands: chronology, petrological and geochemical features, hydrothermal manifestations, volcanic activity monitoring” (FWWM 2024-0003).

The authors are grateful to A.V. Rybin (1958–2024) for the idea of conducting this research and his comprehensive assistance. Special thanks to Dr. of Geological and Mineralogical Sciences M.M. Pevzner (GIN RAS, Moscow) for carrying out the radiocarbon dating, as well as for valuable advice and recommendations during the manuscript preparation. The authors also thank the reviewers for their attention to the article and for constructive feedback, which contributed to its improvement.

For citation: Degterev A.V., Chibisova M.V. Late Holocene volcanic activity in the Medvezhya caldera (Iturup Island, Southern Kuril Islands): preliminary results from radiocarbon dating data. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 2, p. 158–172. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.2.158-172>; <https://www.elibrary.ru/hsbssq>

Введение

Кальдера Медвежья, расположенная в северной части о. Итуруп (Южные Курилы), является одной из самых крупных кальдерных структур, выраженных в современном рельефе Курильской островной дуги. Основное внимание к этому объекту со стороны исследователей обусловлено главным образом уникальной редкометалльной, в т.ч. рениевой, минерализацией вулкана Кудрявый [1–6] и необычными проявлениями высокомагнезиальных базальтов вулкана Меньший Брат [7–12]. Несмотря на обилие петролого-геохимических и геологических публикаций [7–14], сведения по геохронологии молодого вулканизма, проявлявшегося в пределах кальдеры Медвежья в голоцене, ограничены краткой информацией в работе [4]. Между тем эти данные имеют важное значение для реконструкции режима активности расположенных здесь вулканов, а также для региональной тефростратиграфической корреляции и составления летописи вулканических событий голоцена Южных Курил.

В данном сообщении представлены предварительные результаты тефростратиграфических исследований и радиоуглеродного датирования почвенно-пирокластического чехла, изученного в пределах кальдеры Медвежья.

Материалы и методы

Материалы, положенные в основу данного сообщения, были получены в ходе полевых работ в северной части о. Итуруп, проводившихся сотрудниками лаборатории вулканологии и вулканоопасности ИМГиГ ДВО РАН в 1997–1998 гг. (рис. 1) (в отборе материала участвовали М.В. Чибисова, А.В. Рыбин, В.А. Мелкий). В полевых условиях изучалось строение разрезов почвенно-пирокластического чехла, вскрытых в шурфах и естественных обнажениях, проводилось их детальное описание, отбор проб тефры и органического материала.

Возраст отложений определялся на основе радиоуглеродного (^{14}C) анализа. В качестве материала для датирования использованы

образцы погребенных почв и гумусированных супесей (7 образцов) и древесины (1 образец). Пробы отбирались непосредственно из-под горизонтов пирокластики (верхние 2–4 см, общая масса каждого образца составляла 2–3 кг, в зависимости от степени гумусированности палеопочв). Радиоуглеродное датирование проводилось в лаборатории геохимии изотопов и геохронологии Геологического института РАН (Москва). Подготовка счетного препарата и определение содержания углерода начинались с очистки и обогащения образца с использованием механических и кислотно-щелочных методов. Для разных материалов, в зависимости от их генезиса, сохранности, массы/объема образца и конкретной задачи датирования, применялись соответствующие модификации базовой методики [15, 16]. Синтез счетного вещества и измерения радиоуглеродного возраста проводились по методике, подробно изложенной в [16]. Образец обугливали, спекали с литием, гидролизвали до ацетилена, очищали вымораживанием, тримеризовали в бензол на Cr-V-катализаторе, очищали кислотой и перегонкой, затем вводили сцинтилляторы (РРО/РОРОР) – получали счетное вещество. Измерения проводились на радиометрических установках с эффективностью счета ~50 % в кюветах объемом от 1.5 до 22 мл. В качестве стандартов использовались препараты «Э-5» (эталон, калиброванный по активности углерода 1950 г., коэффициент 0.2002; приготовлен Л.Д. Сулержицким, ГИН РАН) и «Фон» (чистый бензол без ^{14}C , задающий «древний» предел). Каждый образец измеряли не менее двух раз (каждое измерение длилось около суток) с интервалом 5–10 дней, и при сходимости результатов в пределах ошибки принимали усредненный радиоуглеродный возраст. Все полученные радиоуглеродные даты были переведены в календарный возраст (кал. л. н. от 1950 г.) с помощью программы калибровки OxCal версии 4.4 (<https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal/OxCal.html>) и калибровочной кривой IntCal20 для Северного полушария (<https://intcal.org/curves/intcal20.14c>). Калиброванный возраст при описании голоценовой активности вулканов приведен как 2σ -диапазон (95.4 %).

Геолого-вулканологическая характеристика кальдеры Медвежья

Кальдера Медвежья, расположенная в северо-восточной части о. Итуруп (рисунки 1, 2), входит в состав сложнопостроенного долгоживущего вулканического центра, в истории развития которого большинство исследователей выделяют три стадии активности: докальдерную, кальдерную и посткальдерную [4, 11, 13, 14, 17]. С докальдерной стадией связано формирование крупного щитового вулкана (0.48 млн л. н. [4]), изверженные продукты которого представлены преимущественно лавами и, реже, туфами средне-основного состава. В кальдерную стадию, около 0.41 млн л. н. [13], в результате катастрофического извержения, сопровождавшегося выбросом огромных масс пирокластики кислого состава, сформировалась гигантская кальдерная депрессия площадью ~85 км² (по бровке современного уступа). В посткальдерную стадию активности происходило последовательное образование средне-позднеплейстоценовых и голоценовых стратовулканов Медвежий, Средний, Кудрявый, Меньший Брат (рис. 3 а–в), а также ряда моногенных центров – Коротышка, Амеба, Крошка, Куличи и др. [4, 10, 13, 17] (рис. 1).

Слившиеся основаниями постройки вулканов Медвежий, Средний, Кудрявый и Меньший Брат образуют внутри кальдеры хребет Медвежий протяженностью ~6 км, в котором возраст построек, их высота и степень эрозийного расчленения последовательно уменьшаются с восток-северо-востока на запад-юго-запад (рис. 1).

В настоящее время к действующим относятся вулканы Кудрявый и Меньший Брат.

Вулкан Кудрявый (абс. высота 986 м) образует характерный стратовулканический конус, несколько вытянутый в северо-восточном направлении. Слагающие его лавовые и пирокластические образования имеют преимущественно андезитовый и андезибазальтовый состав. Его постройка наложена на древнюю, сильно переработанную постройку вулкана Средний, примыкающего к нему с востока-северо-востока. По данным [10], породы вулкана

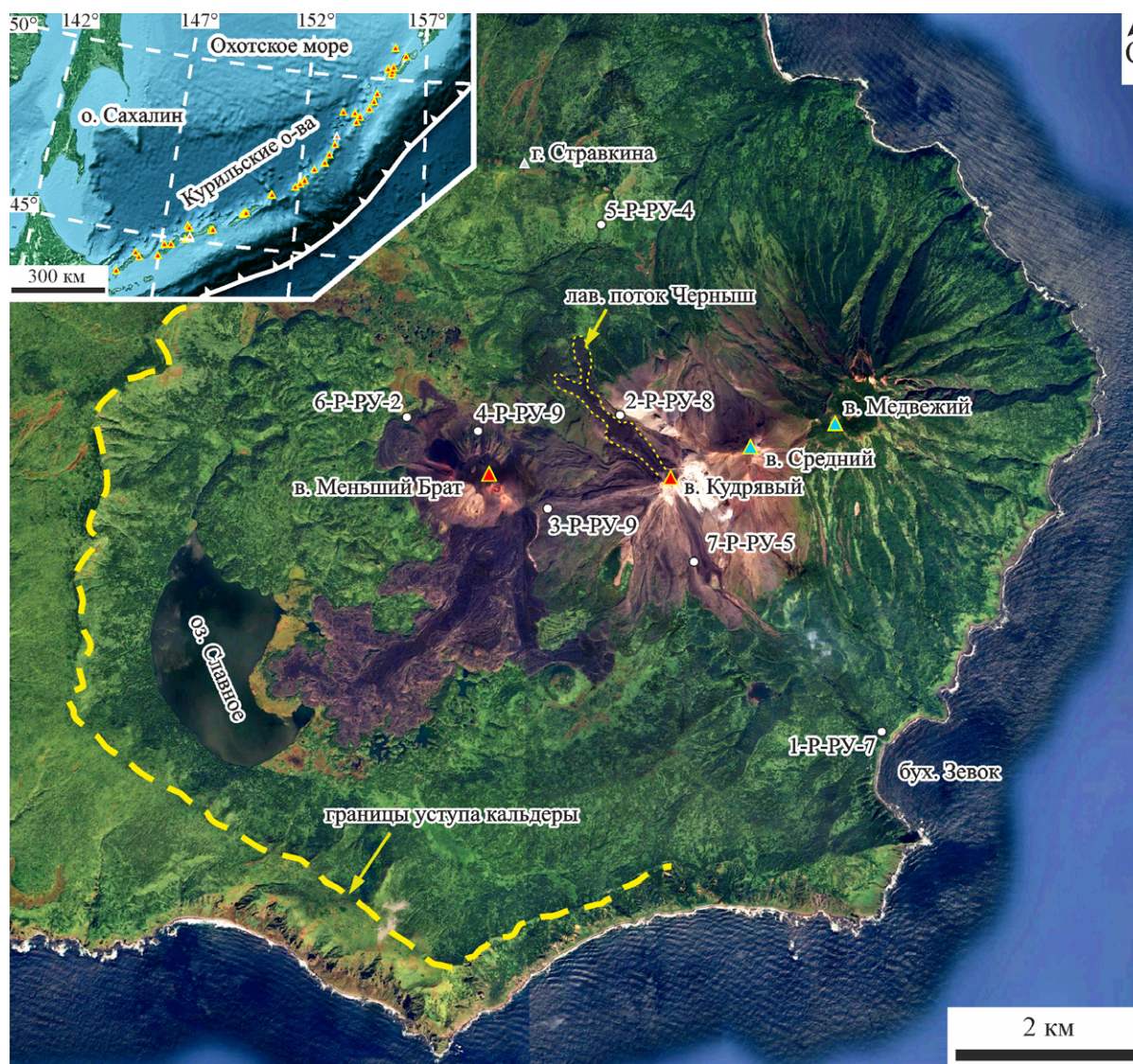


Рис. 1. Район работ и местоположение изученных разрезов. (использованы спутниковые снимки из ГИС Google Earth).

Fig. 1. Study area and location of the studied sections. (satellite images from Google Earth GIS were used).



Рис. 2. Панорама кальдеры Медвежья, вид с вершины вулкана Кудрявый на юго-запад. На переднем плане справа конус вулкана Меньший Брат. *Фото С.З. Смирнова*

Fig. 2. Panorama of the Medvezhya caldera, view from the summit of Kudryavy volcano to the southwest. In the foreground on the right is the cone of Menshiy Brat volcano. *Photo by S.Z. Smirnov*

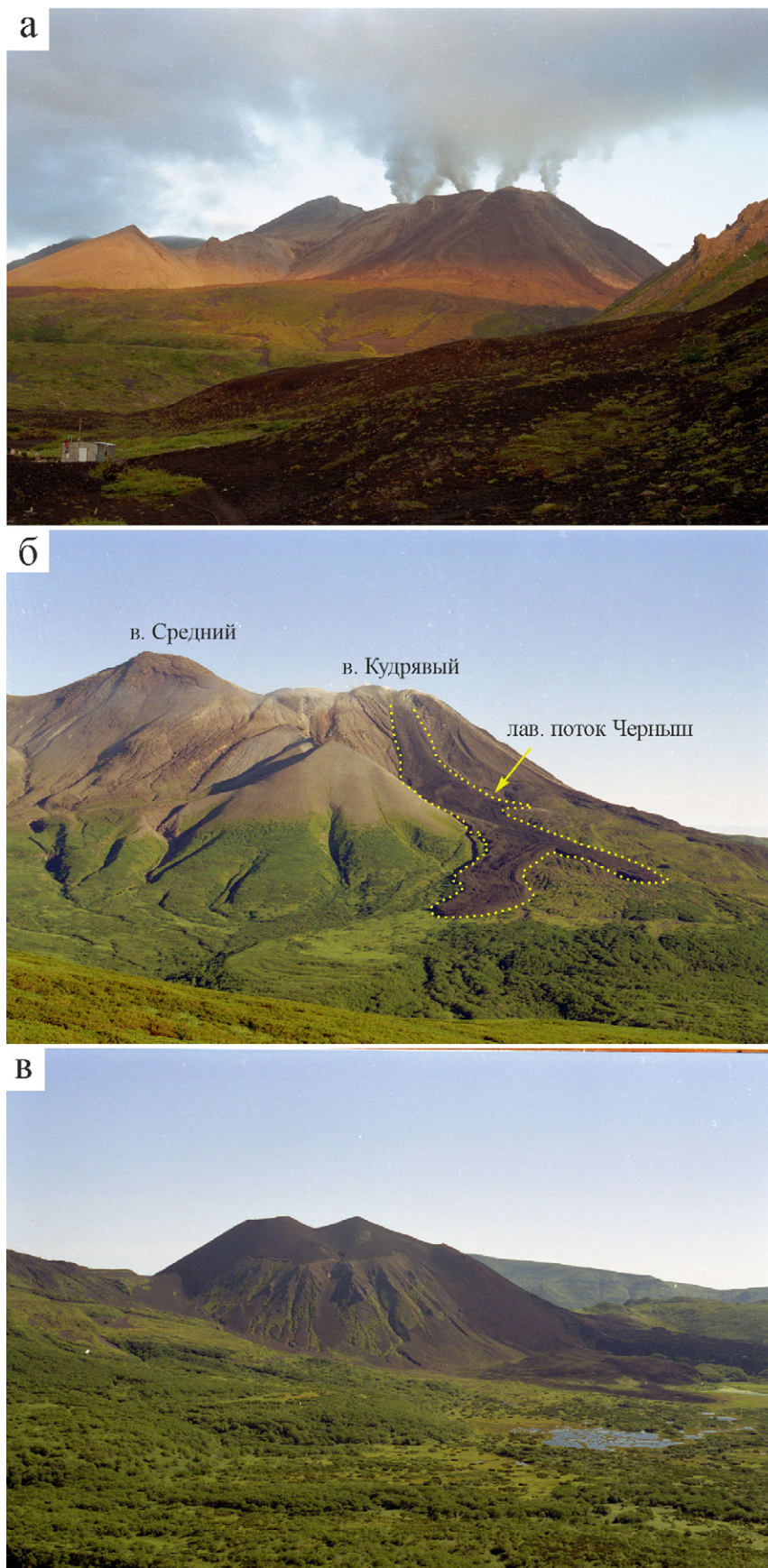


Рис. 3. Вулканы Кудрявый (а, б) и Меньший Брат (в). Фото А.В. Рыбина
Fig. 3. Kudryavy (а, б) and Menshiy Brat (в) volcanoes. Photo by A.V. Rybin

подразделяются на три разновозрастные толщи. Нижняя состоит из многочисленных глыбовых лавовых потоков андезибазальтового и андезитового состава, обнажающихся на периферии вулкана и отделенных друг от друга брекчиевыми корками. Средняя толща сложена сильно окисленными вязкими лавами и экструзивным куполом андезитового состава. Верхняя толща включает серию очень свежих оливинсодержащих двупироксеновых андезибазальтовых и андезитовых лавовых потоков, протягивающихся от вершины по северо-западному, западному и южному склонам постройки.

На вершине вулкана Кудрявый выделяется не менее четырех кратеров и воронка взрыва, различающиеся возрастом, строением и режимом фумарольной активности. Кудрявый – один из немногих вулканов, вмещающих высокотемпературную (800–900 °C) фумарольную систему (рис. 3 а), в пределах которой формируется уникальная редкометаллная минерализация (подробные сведения приведены в [1–6]).

Вулкан Меньший Брат (абс. высота 562 м) имеет строение нетипичное для большинства современных действующих построек Большой Курильской гряды. Его главный структурный элемент – субвулканическое тело риодацитов, осложненное несколькими побочными прорывами. С запада-северо-запада к привершинной части купола приурочен прорыв Коротышка (названия приводятся по [13, 14]) с коротким лавовым потоком основного состава, а с юго-востока – прорыв Восток, с которым связано обширное (4.5 км²) очень свежее лавовое поле высокомагнезиальных (до 10 мас.% MgO) базальтов [8, 12]. Также, как было отмечено выше, вблизи современных действующих вулканов Кудрявый и Меньший Брат расположено большое количество моногенных центров – эффузивных и экструзивных куполов, предположительно, позднеплейстоценового и голоценового возраста. В ~2 км южнее седловины вулканов Кудрявый и Меньший Брат расположено лавовое образование Крошка площадью 0.35 км², представленное серией радиально

расходящихся потоков базальтовых лав, имеющих очень свежий облик. Лавы моногенного вулкана Крошка обтекают один из двух экструзивных (эффузивных?) куполов Куличи, расположенных юго-западнее.

В заключение краткого описания геологического строения кальдеры Медвежья следует отметить обилие распространенных здесь очень свежих лавовых потоков и шлаковых полей, что позволяет предположить высокую активность на протяжении позднего голоцена и, возможно, исторического времени. Кроме того, обращает на себя внимание большое количество одноактных вулканических образований, типичных для районов проявления аретального вулканизма, которые также выглядят очень молодо – их поверхность не окислена, имеет характерный черный цвет, частично или полностью лишена почвенно-растительного покрова.

Историческая активность вулканов Кудрявый и Меньший Брат

Сведения об активности вулканов в историческое время отрывочны и неполны, поэтому авторы провели «ревизию» летописных данных, обратившись к первоисточникам. В сводке М. Татаринова [18], в которой при описании о. Итуруп использованы описания русских землепроходцев И. Антипина и Д. Шебалина, посещавших остров в 1778 и 1779 гг., сообщается о «сопке» на севере Итурупа, которая «курится безпрестанно, а иногда выкидывает пламень» [18, с. 101]. Под это описание подходит только вулкан Кудрявый, для которого характерна постоянная, очень интенсивная парогазовая активность (из-за нее он и получил свое современное географическое название [19]), обусловленная наличием стационарной высокотемпературной фумарольной системы [1–6]. По наблюдениям авторов, в отдельные безветренные дни парогазовые струи над вулканом могут подниматься на высоту 500 м над кратером и выше (рис. 3 а). На вулкане Меньший Брат, напротив, современная парогазовая (сульфатарная) активность не проявляется.

Поэтому можно заключить, что в 1778/1779 (?) году извергался именно вулкан Кудрявый.

Относительно сильное эксплозивное/эксплозивно-эффузивное извержение в кальдере Медвежья происходило в мае 1883 г. Описание этого события приводится в работе английского зверопромышленника Г. Сноу [20]: «В мае 1883 года вулкан на северо-восточной оконечности острова Итуруп (в тексте — Йеторуп) проявлял бурную активность. Он извергал дым, камни и пепел; извержение сопровождалось раскатами грома. Как ни странно, этот гул и рокот был слышен одинаково отчетливо как у подножия горы, так и на расстоянии 30–40 миль от нее. При прохождении с подветренной стороны острова нас осыпало мелким пеплом» [20, с. 6]. Какой именно из вулканов извергался, неизвестно, автор не сообщает об этом, однако при очередном упоминании вулкана в северо-восточной части Итурупа Г. Сноу отмечает, что это «дымящийся» вулкан: «Пар исходит из вулкана Беритаруби [Берутарубе], из двух или более вулканов группы Хотоко, а также из вулканов Чирип и вулкана на северо-восточной оконечности острова. Последний проявлял бурную активность во время извержения 1883 г.» [20]. Учитывая, что Г. Сноу довольно точно описывал наблюдаемые им проявления вулканической активности на Курильских островах, есть основания полагать, что в мае 1883 г. извергался именно вулкан Кудрявый (вулкан Меньший Брат с моря не виден). К аналогичному выводу пришел Г.С. Горшков (1954), основываясь на японских публикациях и анализе топонимики (подробнее в [21]). Таким образом, скорее всего, оба исторических извержения, 1778/1779 (?) и 1883 гг., происходили на вулкане Кудрявый. По своему типу они были эксплозивными (возможно, эксплозивно-эффузивными) и, судя по имеющимся описаниям, достаточно сильными.

Единственное историческое извержение в кальдере Медвежья, которое наблюдали специалисты, происходило 7–8 октября 1999 г. Это было непродолжительное (менее суток), относительно слабое фреатическое изверже-

ние вулкана Кудрявый, в результате которого образовалась воронка взрыва диаметром ~15 м и глубиной от 15 до 40 м, с почти отвесными стенками [22]. Продукты извержения были представлены грубым вулканическим пеплом среднего состава (устное сообщение А.В. Рыбина).

Позднеголоценовая вулканическая активность

Голоценовая активность вулканов Кудрявый и Меньший Брат не изучена, хотя обилие разновозрастных в т.ч. очень свежих, лавовых потоков и шлаковых полей свидетельствует о том, что в недавнем прошлом они активно действовали. Выполненные в 1997–1998 гг. реконгностировочные тефростратиграфические исследования, включавшие радиоуглеродное датирование следов доисторических извержений, позволили получить первые предварительные данные о позднеголоценовом вулканизме в кальдере Медвежья. Всего в ходе проведенных работ было изучено 7 разрезов почвенно-пирокластического чехла, расположение которых приводится на рис. 1.

Изученные разрезы сложены пирокластическими отложениями контрастного состава. В них вскрываются как шлаки основного состава, так и более кислый пемзовый материал, который в ряде разрезов доминирует по количеству видимых горизонтов (рис. 4). Нередко в пачках шлаков присутствует примесь пемз или же, напротив, шлаковые лапилли «загрязняют» горизонты кислой пемзовой пирокластике (рис. 5). Примечательно, что находки пемз кислого состава в кальдере Медвежья были описаны еще Г.С. Горшковым [23]. Учитывая местоположение разрезов, стратиграфическое положение горизонтов пирокластике и близость к действующим вулканам, очевидно, что основными источниками тефры были современные действующие постройки кальдеры Медвежья – вулканы Меньший Брат и Кудрявый.

Для определения возраста горизонтов тефры были отобраны образцы палеопочв и

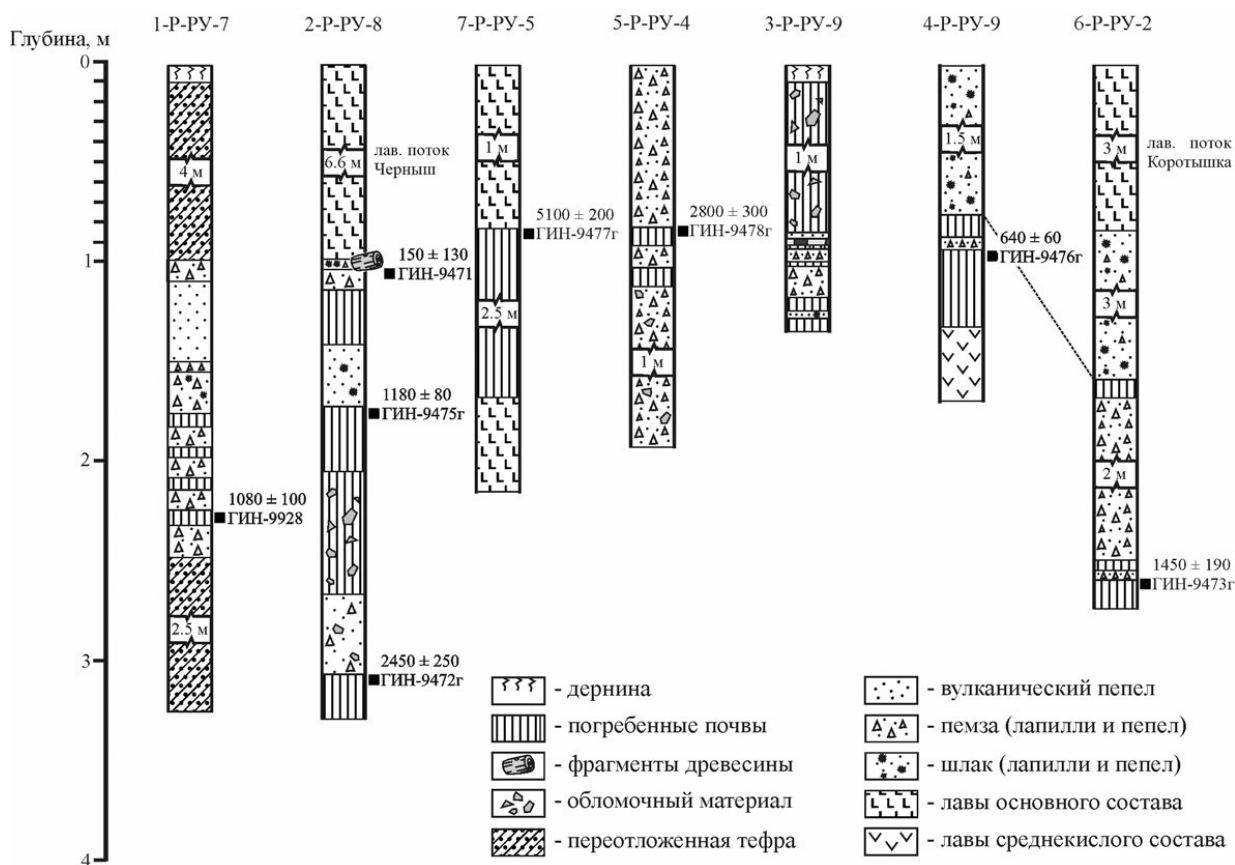


Рис. 4. Строение почвенно-пирокластических чехлов в кальдере Медвежья (использованы данные работы [4]). Цифры справа – калиброванный радиоуглеродный возраст (кал. л. н.).

Fig. 4. Structure of soil-pyroclastic covers in Medvezhya caldera (data from [4] are used). Numbers on the right are calibrated radiocarbon ages (cal BP).

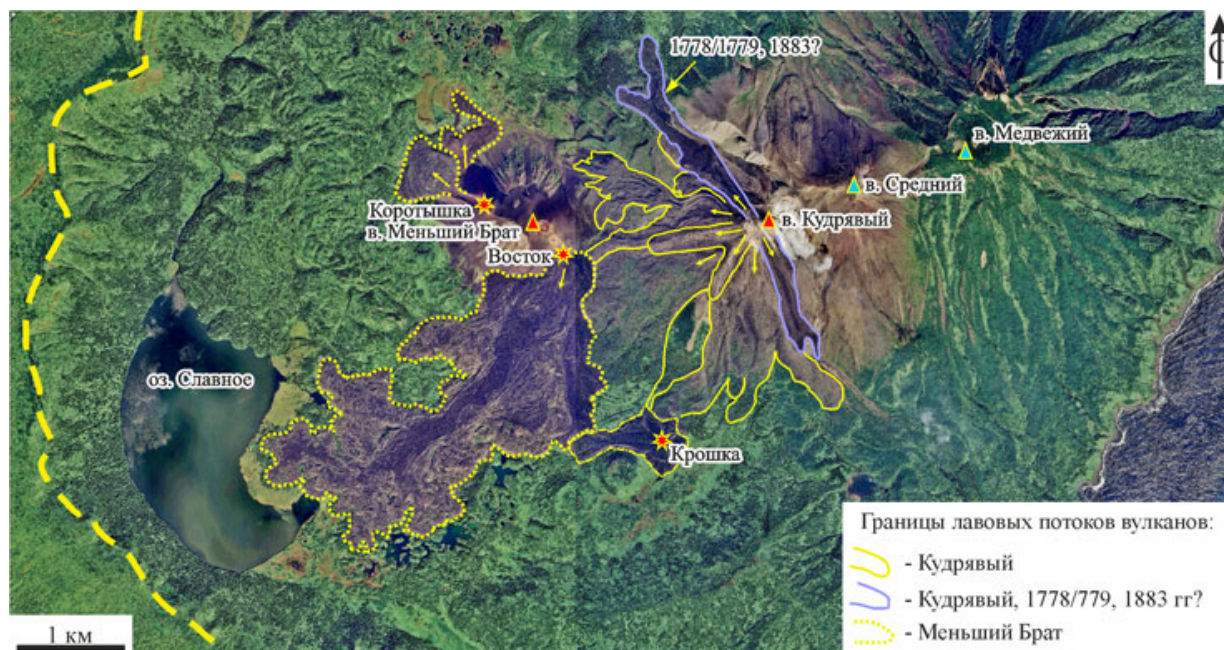


Рис. 5. Позднеголоценовые лавовые потоки и одноактные эруптивные центры кальдеры Медвежья на спутниковом снимке (использованы данные ГИС «Google Earth»).

Fig. 5. Late Holocene lava flows and monogenetic eruptive centers of Medvezhya caldera on a satellite image (using GIS data from Google Earth).

выполнен радиоуглеродный анализ, позволивший установить изотопный возраст ряда извержений (чаще всего их нижнюю границу, т.к. датирование в основном проводилось по подстилающим почвам, т.е. вулканическое событие происходило несколько позже). Всего было получено 7 датировок (см. таблицу), все они были откалиброваны и переведены в календарный возраст – кал. л. н. от 1950 г.

По результатам проведенных исследований наиболее ранним датированным событием можно считать эффузивное извержение вулкана Кудрявый. Из погребенной почвы, залегающей под лавовым потоком на южном склоне постройки (рис. 4), была получена датировка 5100 ± 200 кал. л. н. (ГИН-9477). Поскольку авторы ограничены датировками из почв, подстилающих отложений, реальный возраст этого извержения (и описанных далее) определить не представляется возможным. В настоящее время можно говорить лишь о том, что это извержение произошло не ранее полученной даты.

Следующее датированное извержение произошло после 2800 ± 300 кал. л. н. (ГИН-9478). Оно оставило после себя мощный

(до 80 см) горизонт пемзовой тефры, состоящий из разнозернистого пепла с мелкими лапилли, вскрытый в верховьях ручья Страшный на южном склоне горы Стравкина. Менее мощное извержение, судя по мощности тефры, также сопровождавшееся выбросом кислой тефры, произошло $\sim 2450 \pm 250$ кал. л. н. (ГИН-9472). Пемзовая тефра этого извержения, представленная грубым пеплом с примесью вулканического гравия, была обнаружена в разрезах западного и северо-западного сектора вулкана Кудрявый (рис. 4). Похожий прослой тефры, залегающий под лавовым потоком магнетиальных базальтов, был изучен в районе оз. Теплое, к северо-западу от вулкана Меньший Брат (рис. 5). Из подстилающей его погребенной почвы была получена датировка 1450 ± 190 кал. л. н. (ГИН-9473), задающая нижний возрастной предел для этого извержения. Следующее эксплозивное извержение с выбросом шлаков основного состава датируется временем после 1180 ± 80 кал. л. н. (ГИН-9475) (разрез 2-Р-РУ-8 на северо-западном склоне влк. Кудрявый; рис. 4).

В течение последней тысячи лет зафиксированы следы еще трех эксплозивных

Таблица. Значения радиоуглеродного возраста и его калиброванные значения

Table. Radiocarbon age and calibrated age values

Лабораторный номер образца	^{14}C возраст	Калиброванный возраст, cal BP / лет назад относительно 1950 г.		Местоположение разреза и датируемый материал
		Интервал кал. возраста, cal BP (2 σ , 95.4 %)	Кал. возраст, $\pm 2\sigma$, 95.4 %	
ГИН-9471	170 ± 40	280–0	150 ± 130	Северный склон влк. Кудрявый, древесина (необугленная)
ГИН-9477	4450 ± 100	5300–4850	5100 ± 200	Южный склон влк. Кудрявый, палеопочва
ГИН-9476	700 ± 40	680–560	640 ± 60	Северный склон влк. Меньший Брат, палеопочва
ГИН-9475	1250 ± 40	1260–1080	1180 ± 80	
ГИН-9928	1190 ± 60	1180–980	1080 ± 100	Терраса, бухта Зевок
ГИН-9473	1550 ± 140	1690–1260	1450 ± 190	Разрез в районе оз. Теплое, палеопочва
ГИН-9472	2430 ± 110	2750–2150	2450 ± 250	
ГИН-9478	2770 ± 150	3200–2550	2800 ± 300	Левый борт ручья Страшный, палеопочва

(эксплозивно-эффузивных?) извержений. Из погребенной почвы, залегающей под слоем пемзовой тефры, вскрытой на террасе в районе бухты Зевок, была получена дата 1080 ± 100 кал. л. н. (ГИН-9928) [4]. Выше этой тефры прослеживается еще три-четыре горизонта пемзовой тефры, чередующихся с прослоями погребенных почв и супесей, однако они не были датированы и скоррелированы с изученными нами пирокластическими отложениями, поэтому мы не приводим их геохронологическую привязку. Также маломощный прослой пемзы, перекрытый погребенной почвой с возрастом 640 ± 60 кал. л. н. (ГИН-9476), был обнаружен в разрезе на северном склоне вулкана Меньший Брат (разрез 4-Р-РУ-9) [4]. Этот прослой перекрыт погребенной почвой, выше которой залегает мощная (~1.5 м) пачка шлаков базальтового состава (рис. 4). Эта пачка скоррелирована нами с шлаковой пирокластикой разреза 6-Р-РУ-2, где она залегает без перерыва под лавами побочного прорыва Коротышка (рисунки 4, 5). Таким образом, учитывая, что нижняя граница возраста лавового потока Коротышка ограничена датой 640 ± 60 кал. л. н., его реальный возраст может составлять всего 450–250 кал. л. н., что хорошо соотносится с его свежим рельефом и хорошей обнаженностью.

Последнее из датированных событий было связано с активностью вулкана Кудрявый. Из слоя шлака, залегающего под лавовым потоком Черныш, на северо-западном склоне вулканической постройки (рис. 3 б), был отобран фрагмент необугленной древесины, возраст которой по результатам радиоуглеродного датирования составил 150 ± 130 кал. л. н. (ГИН-9471). Возможно, эффузивное извержение с излиянием этого лавового потока и было одним из исторических извержений вулкана Кудрявый, происходивших в 1778/1779 или 1883 гг. [18, 20]. Также на основе дешифрирования спутниковых снимков и результатов полевых наблюдений мы предполагаем, что в ходе этого события мог изливаться лавовый поток по юго-юго-западному склону вулкана (в работах [13, 14] этот поток относили к системе лавовых потоков Рукава). На это указы-

вает схожий внешний вид и сохранность этого лавового потока – его цвет и структура поверхности свидетельствуют о том, что он образовался в ходе одного и того же извержения либо двух извержений, очень близких по времени (1778/1779, 1883 гг.?) (рисунки 4, 5).

В целом, с учетом полученных ^{14}C датировок, анализа спутниковых снимков и геоморфологического облика эффузивных тел, мы предполагаем, что все наиболее молодые лавовые образования вулканов Кудрявый и Меньший Брат, включая лавовые поля Восток и Коротышка, а также моногенный центр Крошка, образовались около 500–600 л. н. (рис. 5). Все они выглядят очень свежими, с хорошо выраженным первичным микрорельефом, поверхность лав практически не окислена, имеет характерный черный цвет. Кроме того, они прекрасно обнажены и лишены зрелого почвенно-растительного покрова, чем выделяются на фоне более древних образований, густо заросших бамбучником и смешанным лесом.

Помимо местной тефры, связанной с активностью вулканов Кудрявый и Меньший Брат, в почвенно-пирокластических чехлах кальдеры Медвежья нельзя исключить присутствие транзитной тефры. По данным [26], в интервале ~2100–2000 кал. л. н. в районе перешейка Ветровой могло происходить сильное (VEI 4–5) эксплозивное извержение, дацитовая тефра которого (индекс S_{kr}) распространилась в северо-северо-восточном направлении и отложилась на островах Уруп, Кетой, Симушир, Матуа, Расшуа, где она служит региональным тефростратиграфическим маркером для верхнеголоценовых отложений [27, 28]. В разрезе «Гурам», вскрытом вблизи предполагаемого эруптивного центра, залегает мощная (более 1 м) пачка дацитовой пирокластики, подстилаемая хорошо гумусированной почвой; верхняя часть этого почвенного горизонта (~1 см) имеет возраст 2500–2600 кал. л. н. (сама пирокластика датирована по древесным углям интервалом 2100–2000 кал. л. н. [26]). В разрезах кальдеры Медвежья присутствуют горизонты кислой пемзовой тефры с возрастом 2450 ± 250 и 2600 ± 200 кал. л. н., что по времени согласуется с извержением S_{kr}.

Вместе с тем, учитывая значительное количество горизонтов кислой пирокластики, связанных с активностью внутрикальдерных центров, нельзя исключить, что часть этой тефры, включая прослой с близкими датами, могла быть образована крупным эксплозивным со-

бытием непосредственно в кальдере Медвежья. Таким образом, вопрос об источниках указанных пемз остается открытым и требует дальнейших геохимических исследований, в частности детального изучения состава стекол и минералов обоих районов.

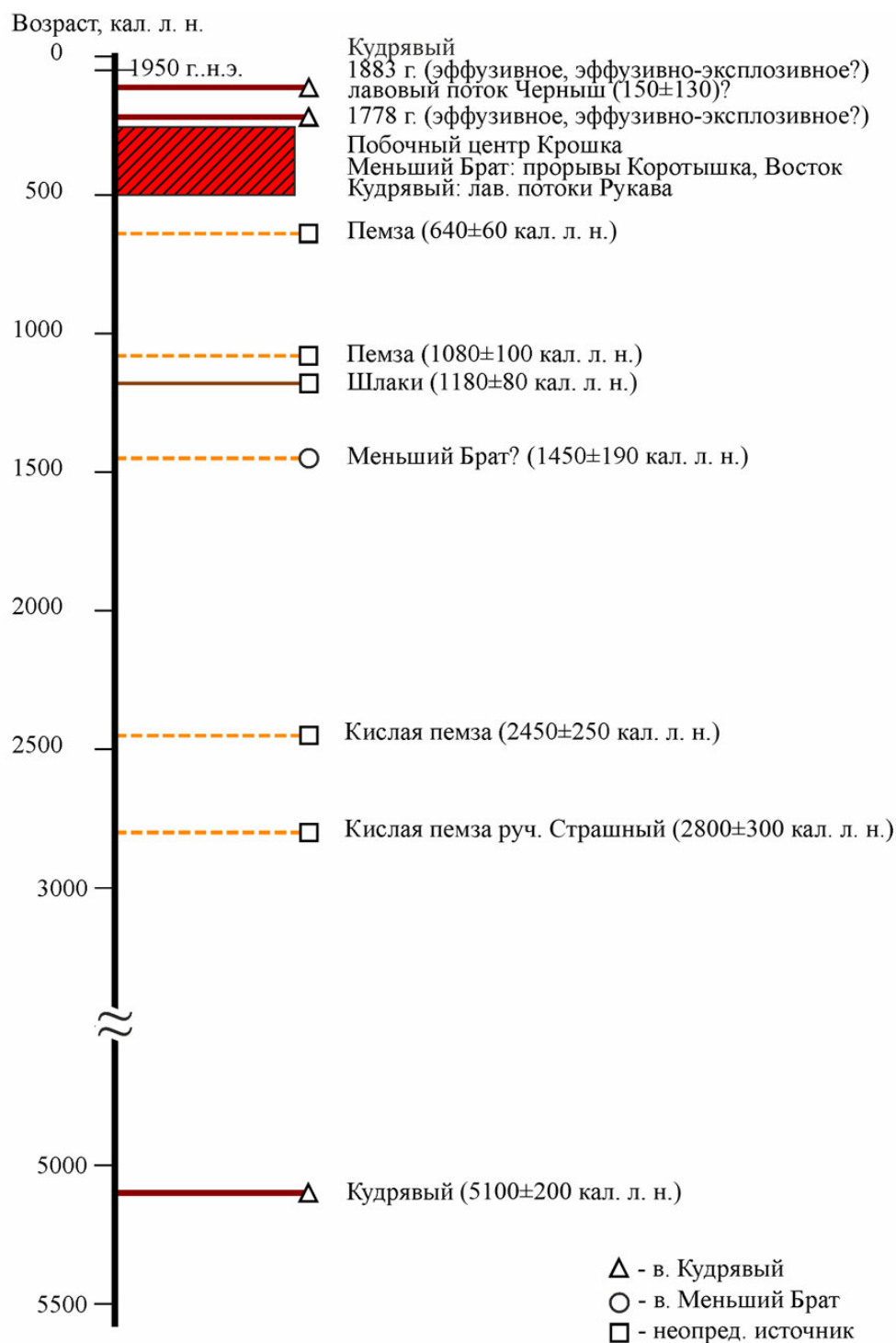


Рис. 6. Хронология вулканической активности в кальдере Медвежья за последние 5000 лет.

Fig. 6. Chronology of volcanic activity in Medvezhya Caldera over the past 5000 years.

Заключение

По результатам тефростратиграфических исследований и радиоуглеродного датирования впервые реконструирована хронология и установлен возраст ряда извержений посткальдерных вулканов Кудрявый и Меньший Брат. Всего было датировано не менее 8 извержений различного типа, происходивших в интервале от 5100 до 150 кал. л. н. Наибольшее количество эксплозивных извержений, сопровождавшихся выбросами пемзовой пироклаستي, отмечено в интервалах 2800–2400 и 1500–800 кал. л. н. Мощная активизация вулканизма в кальдере Медвежья, имевшая преимущественно эффузивный характер, пришлась на последние 600–500 лет. В это время, предположительно, происходило формирование лавовых полей Восток, Коротышка, побочного центра Крошка, а также лавовых потоков Черныш и Рукава. Возраст древесины (150 ± 130 кал. л. н.) из-под лавового потока Черныш хорошо соотносится с датами исторических извержений вулкана Кудрявый, наблюдавшихся в XVIII и XIX вв.

Контрастный состав и многообразие форм проявления молодого посткальдерного вулканизма кальдеры Медвежья свидетельствуют о неординарной магмогенерирующей обстановке, требующей дальнейшего исследования: несмотря на то что в составе обоих вулканов в значительном объеме участвуют лавы и пирокластика андезитового, андезибазальтового и базальтового состава, среди продуктов эксплозивной активности широко распространена кислая пирокластика. Это хорошо соотносится с данными по геологическому строению (андезитовые и базальтовые лавы и пирокластические образования вулканов Кудрявый и Меньший Брат наложены на дацитовые, риодацитовые экструзивные купола), что, согласно современным петрологическим данным, указывает на то, что помимо примитивных мантийных расплавов в магмогенезисе и эволюции очага активное участие принимали процессы гибридизации.

Высокая частота извержений в позднем голоцене и отсутствие длительных периодов

покоя позволяют рассматривать кальдеру Медвежья как активный и потенциально опасный вулканический центр. При этом проявление эруптивной деятельности возможно не только в пределах построек действующих вулканов Кудрявый и Меньший Брат, но и за их пределами. Полученные данные следует учитывать при мониторинге вулканической активности и оценке рисков, связанных с будущими извержениями, – вероятность возобновления эруптивной активности в кальдере Медвежья мы считаем высокой.

Список литературы

1. Данченко В.Я. *Редкие металлы в рудах Курильских островов*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1999, 89 с.
2. Знаменский В.С., Коржинский М.А., Штейнберг Г.С., Ткаченко С.И., Якушев А.И., Лапутина И.П., Брызгалов И.А., Самогоин Н.Д., Магазина Л.О., Кузьмина О.В. и др. Рений, ReS_2 – природный дисульфид рения из фумарол вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские острова). *Записки Российской минералогического общества*. 2005, 134(5):32–40. EDN: HSFVUN
3. Кременецкий А.А., Чаплыгин И.В. Содержание рения и других редких металлов в газах вулкана Кудрявый (остров Итуруп, Курильские острова). *Доклады Академии наук*. 2010, 430(3):365–370. EDN: KZMCCD
4. Рыбин А.В., Данченко В.Я., Чибисова М.В., Гурьянов В.Б. Магматические комплексы и редкометальное оруденение вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские острова). *Вестник Сахалинского музея*. 2000, 1(7):234–259. EDN: YSBGST
5. Korzhinsky M.A., Tkachenko S.I., Shmulovich K.I., Taran Y.A., Steinberg G.S. Discovery of a pure rhenium mineral at Kudriavy volcano. *Nature*. 1994, 369:51–52. <https://doi.org/10.1038/369051a0>
6. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Chaplygin I.V., Mokhov A.V., Trubkin N.V., Gorbacheva S.A. Gaseous transport and deposition of gold in magmatic fluid: evidence from the active Kudryavy volcano, Kurile Islands. *Mineralium Deposita*. 2006, 40(8):828–848. doi:10.1007/s00126-005-0034-6
7. Коваленко В.И., Наумов В.Б., Толстых М.Л., Царева Г.М., Кононкова Н.Н. Состав и источники магм кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курилы) по данным изучения расплавных включений. *Геохимия*. 2004, 5:467–487. EDN: OPUTIX
8. Кузьмин Д.В., Низаметдинов И.Р., Смирнов С.З., Тимина Т.Ю., Шевко А.Я., Гора М.П., Рыбин А.В.

- Магнезиальные базальты кальдеры Медвежья: основные магмы и их источники на примере вулкана Меньший Брат (о. Итуруп). *Петрология*. 2023,31(3):238–263. doi:10.31857/S0869590323030068; <https://elibrary.ru/CDHKEV>
9. Низаметдинов И.Р., Кузьмин Д.В., Смирнов С.З., Рыбин А.В., Кулаков И.Ю. Вода в родоначальных базальтовых магмах вулкана Меньший Брат (о. Итуруп, Курильские острова). *Доклады Академии наук*. 2019,486(1):93–97. <https://doi.org/10.31857/S0869-5652486193-97>
 10. Пискунов Б.Н., Рыбин А.В., Сергеев К.Ф. Петрохимическая характеристика кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Курильские острова). *Доклады Академии наук*. 1999,68(3):380–384. <https://elibrary.ru/lffylld>
 11. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Смирнов С.З., Мартынов Ю.А., Дегтерев А.В. Петрохимические особенности вулканических комплексов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*. 2018,2(4):377–385. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.377-385>
 12. Чибисова М.В., Рыбин А.В., Мартынов Ю.А., Окургин В.М. Химический состав и минералогия базальтов вулкана Меньший Брат (о. Итуруп, Курильские острова). *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2009,13(1):179–186. <https://elibrary.ru/KTZTBP>
 13. Ермаков В.А., Штейнберг Г.С. Вулкан Кудрявый и эволюция кальдеры Медвежьей (о. Итуруп, Курильские острова). *Вулканология и сейсмология*. 1999,3:19–40.
 14. Ермаков В.А., Семакин В.П. Геология кальдеры Медвежьей (остров Итуруп, Курильские острова). *Доклады Академии наук*. 1996,351(3):361–365.
 15. Певзнер М.М. Северная граница вулканической активности Камчатки в голоцене. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2010,15(1):117–144. <https://elibrary.ru/MSVNZK>
 16. Певзнер М.М. Голоценовый вулканизм Срединного хребта Камчатки. *Труды Геологического института*. 2015,608:1–252. <https://elibrary.ru/XRDRBZ>
 17. Остапенко В.Ф. *Геологическое строение кальдер Медвежьей и Заварицкого и связь с ними полезных ископаемых*: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Южно-Сахалинск, 1969.
 18. Татаринов М. Описание Курильских островов. В кн.: *Месяцослов исторической и географической на 1785 г.* СПб.: Императорская Академия наук, 1785, с. 73–114.
 19. Браславец К.М. *История в названиях на карте Сахалинской области*. Южно-Сахалинск: Дальневост. кн. изд-во, 1983, 144 с.
 20. Сноу Г. Записки о Курильских островах. *Краеведческий бюллетень*. 1992,1:89–127.
 21. Горшков Г.С. Хронология извержений вулканов Курильской гряды. *Труды Лаборатории вулканологии АН СССР*. 1954,106(8):58–99.
 22. Коржинский М.А., Бочарников Р.Е., Ткаченко С.И., Жданов Н.Н., Штейнберг Г.С. Фумарольная активность вулкана Кудрявый в период 1990–1999 гг. Фреатическое извержение 1999 г. В кн.: *Экспериментальная минералогия. Некоторые итоги на рубеже столетий*. М.: Наука, 2004, с. 65–92.
 23. Горшков Г.С. *Вулканизм Курильской островной дуги*. М.: Наука, 1967, 287 с.
 24. Bronk Ramsey C. *OxCal Program, Version 4.4*. Oxford Radiocarbon Accelerator Unit. Oxford: University of Oxford, 2021. URL: <https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal.html>
 25. Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Butzin, M., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*. 2020,62(4):725–757. doi:10.1017/RDC.2020.41
 26. Бергаль-Кувикас О.В., Смирнов С.З., Агатова А.Р., Дегтерев А.В., Разжигаева Н.Г., Пинегина Т.К., Портнягин М.В., Карманов Н.С., Тимина Т.Ю. Голоценовое эксплозивное извержение на перешейке Ветровой (о. Итуруп) как источник маркирующего горизонта тефры (~2000 лет назад) в центральной части Курильской островной дуги. *Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле*. 2023,511(1):46–54. doi:10.31857/S2686739723600601
 27. Nakagawa M., Ishizuka Y., Hasegawa T., Baba A., Kosugi A. *Preliminary report on volcanological research of KBP 2007–08 cruise by Japanese volcanology group*. Sapporo: Hokkaido University, 2008. Unpublished report (tDAR ID: 391304).
 28. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Belyanina N.I., Ganzei K.S., Kaistrenko V.M., Arslanov K.A., Maksimov F.E., Rybin A.V. Multiproxy record of late Holocene climatic changes and natural hazards from paleolake deposits of Urup Island (Kuril Islands, North-Western Pacific). *Journal of Asian Earth Sciences*. 2019,181:03916. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.103916>
 29. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Арсланов Х.А., Пшеничникова Н.Ф. Береговые дюны острова Уруп (Курильские острова, северо-западная Пацифика): архив изменений палеоклимата и природной среды. *Геосистемы переходных зон*. 2022,6(2):100–113. <https://doi.org/10.30730/grtz.2022.6.2.100-113>
 30. Булгаков Р.Ф. *История развития южных островов Большой Курильской гряды в плейстоцене*: дис. ... канд. геогр. наук. Московский гос. ун-т им. М.В. Ломоносова, Москва, 1994.

References

1. Danchenko V.Ya. *Rare metals in ores of the Kuril Islands*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, 1999, 89 p. (In Russ.).
2. Znamenskii V.S., Korzhinskii M.A., Shteinberg G.S., Tkachenko S.I., Yakushev A.I., Laputina I.P., Bryzgalov I.A., Samotoin N.D., Magazina L.O., Kuzmina O.V., et al. Reniite, ReS_2 – natural rhenium disulfide from fumaroles of Kudryavy volcano (Iturup Island, Kuril Islands). *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva*. 2005,134(5):32–40. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/hsfvun>
3. Kremenetsky A.A., Chaplygin I.V. Content of rhenium and other rare metals in gases of Kudryavy volcano (Iturup Island, Kuril Islands). *Doklady Earth Sciences*. 2010,430(1):114–119. doi:10.1134/S1028334X10010253
4. Rybin A.V., Danchenko V.Ya., Chibisova M.V., Guryanov V.B. Magmatic complexes and rare-metal mineralization of Kudryavy volcano (Iturup Island, Kuril Islands). *Vestnik Sahalinskogo muzeya*. 2000,7:234–259. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/ysbgst>
5. Korzhinsky M.A., Tkachenko S.I., Shmulovich K.I., Taran Y.A., Steinberg G.S. Discovery of a pure rhenium mineral at Kudryavy volcano. *Nature*. 1994,369:51–52. <https://doi.org/10.1038/369051a0>
6. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Chaplygin I.V., Mokhov A.V., Trubkin N.V., Gorbacheva S.A. Gaseous transport and deposition of gold in magmatic fluid: evidence from the active Kudryavy volcano, Kurile Islands. *Mineralium Deposita*. 2006,40(8):828–848. doi:10.1007/s00126-005-0034-6
7. Kovalenko V.I., Tsareva G.M., Naumov V.B., Tolstykh M.L., Kononkova N.N. Composition and sources of magmas in Medvezh'ya caldera (Iturup Island, Southern Kuriles) from a study of melt inclusions. *Geochemistry International*. 2004,42(5):393–413. URL: <https://repository.geologyscience.ru/handle/123456789/38276> (accessed May 25, 2026).
8. Kuzmin D.V., Nizametdinov I.R., Smirnov S.Z., Timina T.Y., Shevko A.Y., Gora M.P., Rybin A.V. Magnesian basalts of the Medvezhia caldera: Dominant magmas and their sources, as exemplified by Menshiy Brat volcano, Iturup Island, Kuriles. *Petrology*. 2023,31:279–303. <https://doi.org/10.1134/s0869591123030062>
9. Nizametdinov I.R., Kuzmin D.V., Smirnov S.Z., Rybin A.V., Kulakov I.Yu. Water in parental basaltic magmas of the Menshiy Brat volcano (Iturup Island, Kurile Islands). *Doklady Earth Sciences*. 2019,486:525–528. <https://doi.org/10.1134/s1028334x19050052>
10. Piskunov B.N., Rybin A.V., Sergeev K.F. Petrogeochemical characteristics of the Medvezhya caldera (Iturup Island, Kuril Islands). *Doklady Earth Sciences*. 1999,368(3):380–384. (In Russ.). <https://elibrary.ru/lffyld>
11. Rybin A.V., Chibisova M.V., Smirnov S.Z., Martynov Yu.A., Degterev A.V. Petrochemical features of volcanic complexes of Medvezh'ya caldera (Iturup Island, Kuril Islands). *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*. 2018,2(4):377–385. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.377-385>
12. Chibisova M.V., Rybin A.V., Martynov Yu.A., Okrugin V.M. Chemical composition and mineralogy of basalts of the volcano Men'shiy Brat (Iturup, the Kuril Islands). *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*. 2009,13(1):179–186. (In Russ.).
13. Ermakov V.A., Steinberg G.S. Kudryavy volcano and the evolution of the Medvezhya caldera (Iturup Island, Kuril Islands). *Volcanology and Seismology*. 1999,3:19–40. (In Russ.).
14. Ermakov V.A., Semakin V.P. Geology of the Medvezhya caldera (Iturup Island, Kuril Islands). *Doklady Academy of Sciences*. 1996,351(3):361–365. (In Russ.).
15. Pevzner M.M. Northern boundary of volcanic activity of Kamchatka in the Holocene. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*. 2010,15(1):117–144. (In Russ.). <https://elibrary.ru/MSVNZ>
16. Pevzner M.M. Holocene volcanism of Sredinny Range of Kamchatka. *Transactions of the Geological Institute*. 2015,608:1–252. (In Russ.). <https://elibrary.ru/XRDRBZ>
17. Ostapenko V.F. [Geological structure of the Medvezhya and Zavaritskogo calderas and the relationship of useful minerals with them]: extended abstr. of diss. ... Cand. Sci. (Geol.-Min.). Yuzhno-Sakhalinsk, 1969. (In Russ.).
18. Tatarinov M. Description of the Kuril Islands. In: *Historical and Geographical Monthly Calendar for 1785*. St. Petersburg: Imperatorskaya Akademiya nauk, 1785, p. 73–114. (In Russ.).
19. Braslavets K.M. [History in names on the map of Sakhalin Oblast]. Yuzhno-Sakhalinsk: Far Eastern Book Publ. House, 1983, 144 p. (In Russ.).
20. Snou G. Notes about the Kuril Islands. *Krayevedcheskiy byulleten'*. 1992,1:89–127. (In Russ.).
21. Gorshkov G.S. [Chronology of eruptions of the Kuril Ridge volcanoes]. *Proceedings of the Laboratory of Volcanology of the USSR Academy of Sciences*. 1954,106(8):58–99. (In Russ.).
22. Korzhinsky M.A., Bocharnikov R.E., Tkachenko S.I., Zhdanov N.N., Shteinberg G.S. Fumarolic activity of Kudryavy volcano in the period 1990–1999. Phreatic eruption of 1999. In: *Experimental mineralogy. Some results at the turn of the century*. Moscow: Nauka, 2004, p. 65–92. (In Russ.).

23. Gorshkov G.S. [*Volcanism of the Kuril island arc*]. Moscow: Nauka Publ., 1967, 287 p. (In Russ.).
24. Bronk Ramsey C. *OxCal Program, Version 4.4*. Oxford Radiocarbon Accelerator Unit. Oxford: University of Oxford, 2021. URL: <https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal.html>
25. Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Butzin, M., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*. 2020,62(4):725–757. doi:10.1017/RDC.2020.41
26. Bergal-Kuvikas O.V., Smirnov S.Z., Agatova A.R., Degterev A.V., Razjigaeva N.G., Pinegina T.K., Portnyagin M.V., Karmanov N.S., Timina T.Yu. Holocene explosive eruption on Vetrovoy isthmus (Iturup Island) as a source of the marker tephra layer of 2000 cal. yr BP in the Central Kuril Island arc. *Doklady Earth Sciences*. 2023,511:550–557. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23600597>
27. Nakagawa M., Ishizuka Y., Hasegawa T., Baba A., Kosugi A. *Preliminary report on volcanological research of KBP 2007–08 cruise by Japanese volcanology group*. Sapporo: Hokkaido University, 2008. Unpublished report (tDAR ID: 391304).
28. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Belyanina N.I., Ganzei K.S., Kaistrenko V.M., Arslanov K.A., Maksimov F.E., Rybin A.V. Multiproxy record of late Holocene climatic changes and natural hazards from paleolake deposits of Urup Island (Kuril Islands, North-Western Pacific). *Journal of Asian Earth Sciences*. 2019,181:03916. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.103916>
29. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Arslanov Kh.A., Pshenichnikova N.F. Coastal dunes of Urup island (Kuril islands, north western Pacific): paleoclimatic and environmental archive. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*. 2022,6(2):100–113. (In Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.100-113>
30. Bulgakov R.F. [*History of development of southern islands of the Great Kuril Ridge in the Pleistocene*]: thesis ... Cand. of Sci. (Geography). Moscow State University, Moscow, 1994. (In Russ.).

Об авторах

✉ Дегтерев Артем Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией вулканологии и вулканопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, d_a88@mail.ru. <https://orcid.org/0000-00018291-2289>

Чибисова Марина Владимировна, старший научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, m.chibisova@imgg.ru. <https://doi.org/0000-0003-0677-6945>

About the Authors

✉ Degterev, Artem V., Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Head of Laboratory of Volcanology and Volcanic Hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, d_a88@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-8291-2289>

Chibisova, Marina V., Senior Researcher, Laboratory of Volcanology and Volcanic Hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, m.chibisova@imgg.ru. <https://doi.org/0000-0003-0677-6945>

Поступила 25.03.2026

Принята к публикации 26.05.2026

Received 25 March 2026

Accepted 26 May 2026

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



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

УДК 552.12

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.2.173-188>
<https://www.elibrary.ru/rmfqam>

Результаты минералого-петрографического исследования кремнистых пород южного Сахалина

*Е. В. Кожевников¹, К. П. Казымов², Е. М. Томилина², М. С. Турбаков¹,
Е. П. Рябokonь¹, З. Г. Иванов¹, М. А. Пшевлодский², П. А. Каменев³*

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

² Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

³ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. Представлены результаты минералого-петрографического исследования кремнистых пород холмской и курасийской свит южного Сахалина. Исследования выполнены с применением макроскопического описания, поляризационной микроскопии, растровой электронной микроскопии с энергодисперсионным спектральным анализом, рентгенофазового и синхронного термического анализа. Породы холмской свиты содержат силициты с тонкодисперсной кремнистой основной массой, кварц, полевые шпаты, гидрослюда, хлорит, гематит, кальцит, растительный детрит и углефицированное органическое вещество. В породах курасийской свиты установлены опоковый облик, скрытокристаллическая и аморфная кремнистая основная масса, кристобалит, тридимит, кварц, полевые шпаты, гидрослюда, хлорит, гематит и органическое вещество. Растровая электронная микроскопия выявила микроконкреции и идиоморфные микрокристаллы пирита, микроглобулярные формы кремнистого вещества, участки с повышенными содержаниями Na, K, S и Cl, а также органические остатки с высоким содержанием углерода. С помощью рентгенофазового анализа установлено, что в кристаллической фазе кремнистой составляющей пород холмской свиты преобладает кварц, курасийской свиты – кристобалит и тридимит. Полученные данные уточняют минеральный состав, форму кремнезема и микростроение пустотного пространства кремнистых пород холмской и курасийской свит южного Сахалина.

Ключевые слова: южный Сахалин, холмская свита, курасийская свита, кремнистые породы, опока, кварц, кристобалит, тридимит, растровая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, термический анализ

Results of mineralogical and petrographic study of siliceous rocks of southern Sakhalin

*Evgenii V. Kozhevnikov¹, Konstantin P. Kazymov², Elena M. Tomilina²,
Mikhail S. Turbakov¹, Evgenii P. Riabokon¹, Zakhar G. Ivanov¹,
Miroslav A. Pshevlodskiy², Pavel A. Kamenev³*

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

² Perm State National Research University, Perm, Russia

³ Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. The paper presents the results of a mineralogical and petrographic study of siliceous rocks from the Kholmskaya and Kurasiyskaya Formations of southern Sakhalin. The study was carried out using macroscopic description, polarized-light microscopy, scanning electron microscopy with energy-dispersive microprobe analysis, as well as X-ray diffraction and simultaneous thermal analysis. Rocks of the Kholmskaya Formation are represented by silicites with a finely dispersed siliceous groundmass, quartz, feldspars, hydromica, chlorite, hematite, calcite, plant detritus, and carbonized organic matter. Rocks of the Kurasiyskaya Formation are opoka-like and are characterized by cryptocrystalline and amorphous siliceous groundmass, cristobalite, tridymite, quartz,

feldspars, hydromica, chlorite, hematite and organic matter. Scanning electron microscopy revealed pyrite microconcretions and idiomorphic pyrite microcrystals, microglobular silica forms, areas enriched in Na, K, S, and Cl, as well as carbon-rich organic residues. Using the X-ray diffraction analysis, it was established that quartz predominates in the rocks of the Kholmskaya Formation, whereas cristobalite and tridymite predominate in the opokas of the Kurasiyskaya Formation. The obtained data clarify the mineral composition, silica forms and pore microstructure of siliceous rocks of the Kholmskaya and Kurasiyskaya Formations of southern Sakhalin.

Keywords: southern Sakhalin, Kholmskaya Formation, Kurasiyskaya Formation, siliceous rocks, opoka, quartz, cristobalite, tridymite, scanning electron microscopy, X-ray diffraction, thermal analysis

Финансирование и благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2024-0008).

Авторы благодарят уважаемых рецензентов за конструктивные предложения и замечания, которые помогли улучшить качество представленной рукописи.

Funding and Acknowledgements

This study was funded by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FSNM-2024-0008).

The authors thank the respected Reviewers for constructive suggestions and comments that allowed to improve the quality of the presented manuscript.

Для цитирования: Кожевников Е.В., Казымов К.П., Томилина Е.М., Турбаков М.С., Рябоконт Е.П., Иванов З.Г., Пшевловский М.А., Каменев П.А. Результаты минералогическо-петрографического исследования кремнистых пород южного Сахалина. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 2, с. 173–188. <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.2.173-188>; <https://www.elibrary.ru/rmfqam>

For citation: Kozhevnikov E.V., Kazymov K.P., Tomilina E.M., Turbakov M.S., Riabokon E.P., Ivanov Z.G., Pshevlodskiy M.A., Kamenev P.A. Results of mineralogical and petrographic study of siliceous rocks of southern Sakhalin. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 2, p. 173–188. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.2.173-188>; <https://www.elibrary.ru/rmfqam>

Введение

В южной части о. Сахалин, в отличие от северной, промышленная разработка месторождений нефти и газа развита слабо. Вместе с тем южный Сахалин и прилегающие акватории рассматриваются как перспективная область для расширения потенциальной базы углеводородов [1–3]. В условиях снижения ресурсной обеспеченности традиционных объектов возрастает роль комплексного изучения низкопроницаемых кремнистых и глинисто-кремнистых толщ, которые могут быть связаны как с нефтегазоматеринскими интервалами, так и с трещинно-поровыми коллекторами.

По Сахалину опубликован ряд работ, посвященных нефтегазоносности, геодинамическому положению, геохимическим характеристикам и геомеханическим особенностям осадочных толщ [4–12]. Обобщенные сведения по кайнозойским отложениям и нефтегазоносности Сахалина приведены в региональных сводках и монографических работах [5, 12–14].

При этом минералогическо-петрографические данные по кремнистым породам южного Сахалина, полученные с использованием современной приборной базы, ограничены. Недостаточно охарактеризованы форма кремнезема, микроструктура кремнистого матрикса, состав глинистого материала, морфология пустотного пространства, признаки аутигенного минералообразования и состав органического вещества.

Цель работы – уточнение минерального и петрографического состава кремнистых пород потенциально нефтегазоматеринских холмской и курасийской свит южного Сахалина с использованием комплекса методов оптической и электронной микроскопии, рентгенофазового, термического анализа.

Материал исследования

Материалом для исследования послужили образцы пород двух свит, имеющих перспективу разработки в качестве нетрадиционных коллекторов.

Холмская свита (P_3-N_1hl) выделена на Сахалине Е.М. Смеховым в 1948 г. Она распространена в южной и центральной частях острова [13, 14]. В ее составе описываются кремнистые туфоалевролиты, туффиты, туфы кислого состава, аргиллиты, песчаники и туфо-песчаники мощностью до 950 м. Эта свита, как правило, не рассматривается большинством исследователей в качестве одной из основных нефтегазоматеринских для Сахалина. Тем не менее, по данным [1], содержание органического углерода $C_{орг}$ холмской свиты составляет от 0.3 до 0.7 %, что отвечает одному из критериев нефтегазоматеринского потенциала. Аналогичные лабораторные результаты были получены в работе [11]. Кроме того, породы свиты имеют хорошие люминесцентно-битумологические свойства. Дополнительным фактором, позволяющим рассматривать вклад холмской свиты в генерацию углеводородов, является ее положение под маруямской свитой на Анивских газовых месторождениях [1].

С учетом обширной территории распространения холмской свиты, от п-ова Крильон до Тымовского района, в том числе и на территориях интенсивного строительства инфраструктуры, задача изучения ее минералого-петрографических свойств становится еще более актуальной.

Курасийская свита (N_1kr) выделена К. Уватко в 1925 г. на западном побережье о. Сахалин в районе села Новосибирское-Байково [13]. Свита сложена преимущественно

кремнистыми и диатомовыми алевролитами, опоковидными алевролитами, опоками, реже туффитами. Мощность свиты варьирует от 40 до 1700 м [12–14]. По данным [12], среди неогеновых отложений западного Сахалина курасийская свита отличается повышенными содержаниями органического вещества и представляет интерес с точки зрения нефтеобразования [12, 15].

В южной части о. Сахалин сотрудниками Института морской геологии и геофизики ДВО РАН была отобрана серия образцов пород в пределах холмской (точка 1) и курасийской (точка 2) свит (рис. 1).

Точка 1 локализуется в клифе в районе пос. Взморье, координаты $47.865395^\circ N$,



Рис. 1. Южная часть Сахалина. Расположение мест отбора проб: в пределах холмской (1) и курасийской (2) свит.

Fig. 1. The southern part of Sakhalin. Location of sampling sites: within the Kholmskaya (1) and Kurasiyskaya (2) Formations.

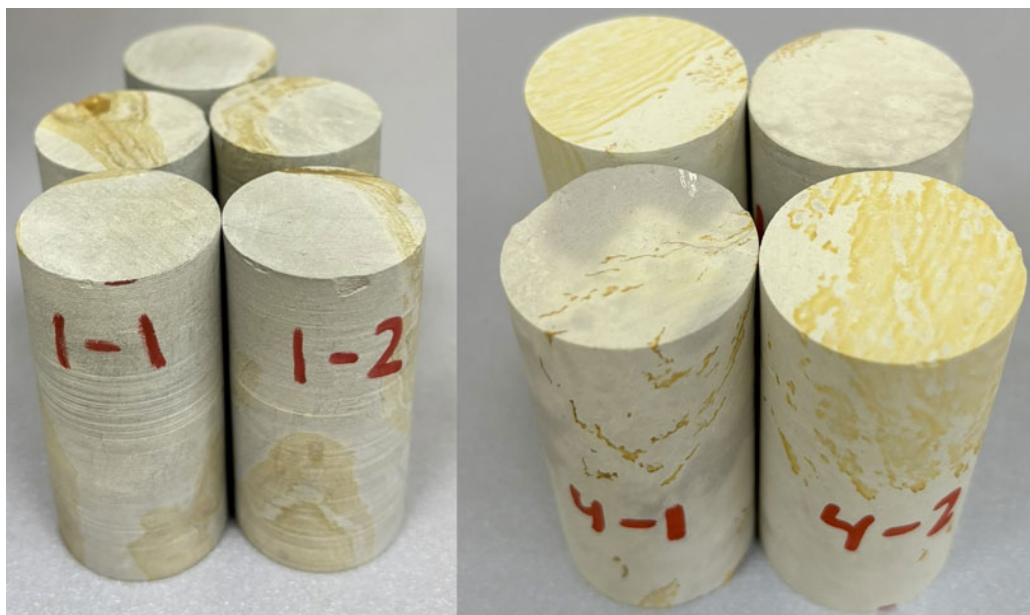


Рис. 2. Внешний вид образцов холмской (слева) и курасийской свит (справа).

Fig. 2. Appearance of samples of the Kholmok Formation (on the left) and the Kurasiyskaya Formation (on the right).

142.525963° Е. В тектоническом плане участок расположен в зоне Центрально-Сахалинского разлома. В районе отбора образцов развиты субвулканические тела кислого и среднего состава.

Точка 2 расположена в карьере восточнее пос. Шебунино, координаты 46.426067° N, 141.873883° Е. Участок находится между Западно-Сахалинским и Невельским разломами.

Образцы из холмской и курасийской свит показаны на рис. 2. В тексте исследуемые образцы обозначены двумя цифрами: первая – 1 и 4 – холмская и курасийская свиты соответственно; вторая – порядковый номер образца.

Методы

При макроскопическом описании образцов изучались: цвет, текстура, характер излома, трещиноватость, наличие видимых прожилков, глинистых слоев и органических остатков [16]. Петрографическое изучение шлифов проведено на поляризационном микроскопе Olympus BX51. При описании шлифов учитывались структура, микротекстура, минеральный состав, характер кремнистого и глинистого материала, наличие органических остатков, вторичных минералов и прожилков.

Растровая электронная микроскопия (РЭМ) выполнена на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV (Jeol, Japan) с энергодисперсионным спектрометром Inca Energy 350 (Oxford Instruments, UK). Перед съемкой поверхность образцов напылялась углеродом на установке JEE 420. Энергодисперсионный спектральный анализ (ЭДС) использован для определения состава минерального скелета, глинистого вещества, аутигенных минералов и органических остатков. Режим работы прибора: ускоряющее напряжение 20 кВ, сила тока 10 мА, рабочее расстояние 12 мм.

Рентгенофазовый анализ (РФА) выполнен на порошковом дифрактометре D2 Phaser (Bruker, ФРГ). Использовалась рентгеновская трубка с медным анодом, излучение $\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 1.54060 \text{ \AA}$, напряжение 30 кВ, сила тока 10 мА, линейный детектор LYNXEYE. Условия съемки: расходящаяся щель 0.6 мм, щели Соллера первичная 2.5° и вторичная 2.5°, угловой диапазон 5–70° 2 θ , шаг 0.02°, время набора импульсов в точке 1.0 с. Обработка дифрактограмм выполнена в Diffrac.Eva с использованием базы COD; количественная оценка валового минерального состава кристаллической фазы – в Topas 4-2 методом Ритвельда.

Термический анализ проведен на синхронном термоанализаторе STA 409 PC Luxx (Netzsch-Geratebau GmbH). Использовалось сочетание дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрического анализа. Измельченный образец помещали в корундовый тигель и нагревали до 1200 °С со скоростью 10 °С/мин. Исследования проводились в динамической атмосфере Ar: 10 мл/мин для весовой системы и 20 мл/мин для измерительной камеры. При интерпретации термических эффектов учитывались опубликованные данные по термическому анализу минералов и горных пород [17].

Результаты

Макроскопическое описание образцов

Холмская свита

Образец 1-4. Силицит. Образец серого цвета. Основная масса представлена кремнистым скрытокристаллическим веществом и тонкодисперсным глинистым материалом. Текстура неяснослоистая, обусловленная параллельным направлением глинистых слоев толщиной 0.3–0.5 мм. Глинистые слои темно-серого цвета, извилистые, волнистые, распределены неравномерно. Они заполнены тонкодисперсными глинистыми минералами и растительными остатками темно-бурого, почти черного цвета.

Образец 1-3. Силицит. Образец серого цвета. Основная масса представлена скрытокристаллическим кремнистым веществом и тонкодисперсным глинистым материалом. Текстура неяснослоистая, обусловлена субпараллельностью тонких прожилков.

Курасийская свита

Образец 4-6. Опока. Образец светло-серого цвета. Основная масса представлена скрытокристаллическим и аморфным кремнистым веществом. Текстура неяснополосчатая. На сколе излом раковистый. Образец средней крепости. Неравномерно по образцу наблюдаются трещины длиной до 20 мм при раскрытости до

0.8 мм, заполненные глинистым материалом. Присутствуют остатки углефицированной растительной органики красно-бурого и черного цвета, неправильной, удлинено-вытянутой формы, размером 0.01–0.08 мм.

Образец 4-8. Опока. Образец светло-серого цвета. Основная масса представлена кремнистым материалом. Текстура беспорядочная.

Петрографическое описание шлифов образцов

Холмская свита

В образце 1-3 в составе породы установлены кремнистый материал, полевые шпаты, глинистый материал гидрослюдистого и хлоритового состава, гематит и кальцит.

В шлифе образца 1-3 на фоне тонкодисперсной скрытокристаллической кремнистой основной массы выделяются зерна кварца неправильной, полуугловатой и угловатой формы размером менее 0.15 мм (рис. 3, верхняя панель). Чешуйки гидрослюды имеют размер менее 0.1 мм. Зерна полевых шпатов с зональным погасанием имеют размер менее 0.08 мм. Зерна кальцита неправильной формы размером менее 0.05 мм, распределены неравномерно. Гематит представлен ромбовидными зернами, пластинками и чешуйками темно-бурого до почти черного цвета размером 0.005–0.05 мм.

Практически по всей площади шлифа наблюдаются растительные остатки коричневого и бурого цвета, полупрозрачные, неправильной и удлинено-вытянутой формы, размером менее 0.08 мм. Также присутствуют остатки углефицированной растительной органики черного цвета в виде точечных выделений и неправильных форм размером 0.02–0.08 мм. Тонкие волнистые разнонаправленные прожилки заполнены углесто-глинистым материалом.

Курасийская свита

В шлифе образца 4-8 основная масса сложена тонкодисперсным скрытокристаллическим и аморфным кремнистым веществом, а также тонкодисперсным глинистым материалом. В составе породы установлены кремни-

стый материал, полевые шпаты, глинистый материал гидрослюдистого и хлоритового состава, гематит.

На фоне основной массы выделяются зерна кристобалита размером 0.01–0.18 мм в виде неправильных, субизометричных и таблитчатых зерен с внутренним агрегатным строением (рис. 3, нижняя панель). Также присутствуют зерна кварца неправильной, полуугловатой и угловатой формы размером 0.01–0.08 мм, зерна полевых шпатов с зональным погасанием, размером менее 0.18 мм, чешуйки гидрослю-

ды размером менее 0.2 мм и чешуйки хлорита менее 0.07 мм. Гематит наблюдается в виде ромбовидных зерен, пластинок и чешуек темно-бурого до почти черного цвета, размером 0.005–0.05 мм.

Неравномерно по площади шлифа наблюдаются растительные остатки коричневого и бурого цвета, полупрозрачные, неправильной, удлинненно-вытянутой формы. Единичные волнистые разнонаправленные прожилки заполнены оксидами и гидроксидами железа и глинистым материалом.

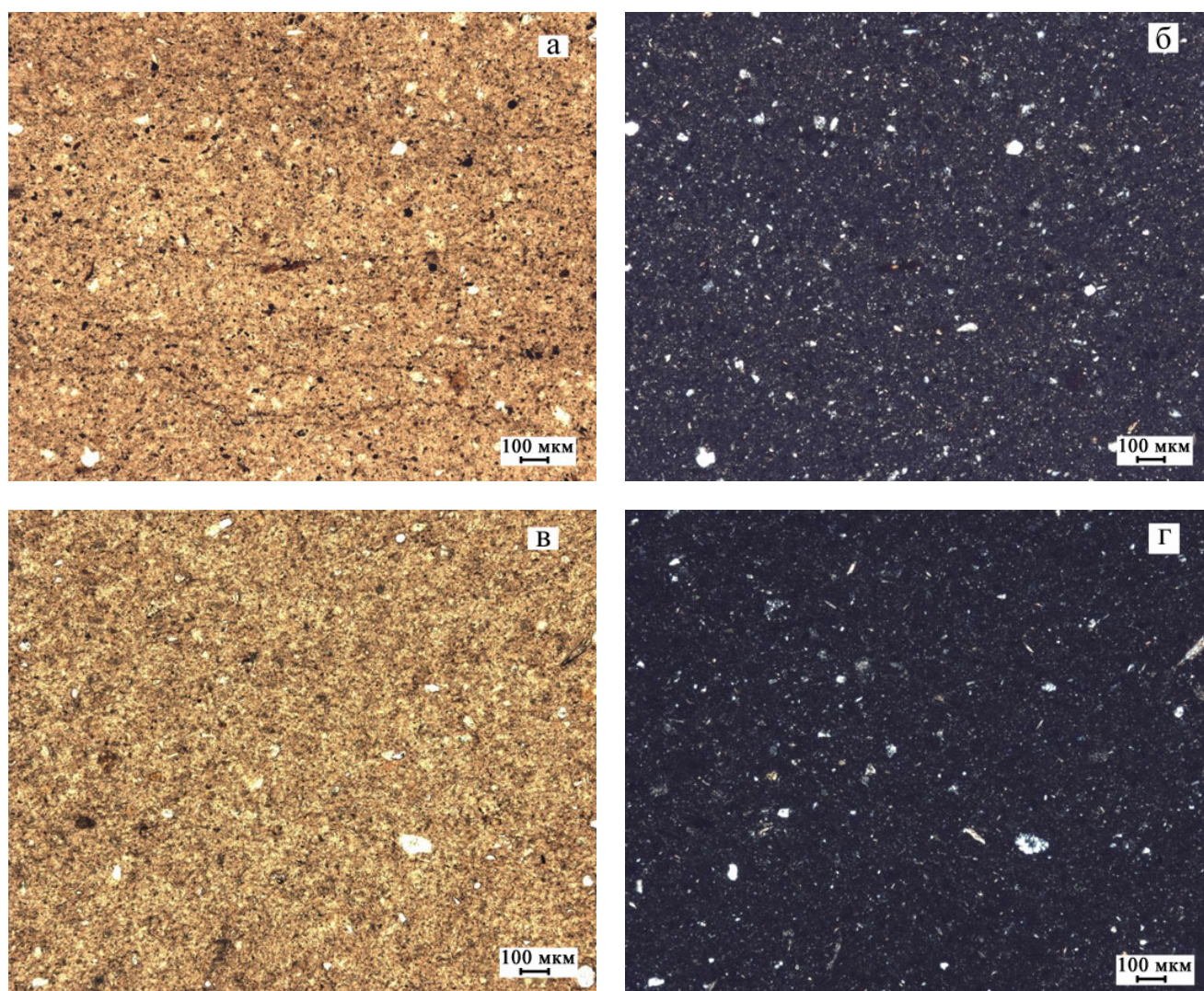


Рис. 3. Фотографии шлифа образца 1-3 холмской свиты (верхняя панель), и образца 4-8 курасийской свиты (нижняя): (слева) без анализатора, (справа) с анализатором. Основная масса обоих образцов представлена тонкодисперсным и аморфным скрытокристаллическим кремнистым материалом; на его фоне выделяются зерна кварца, полевых шпатов и чешуйки глинистых минералов, в образце 4-8 встречается и кристобалит.

Fig. 3. Photo of a thin section of the sample 1-3 from the Kholmokaya Formation (top panel) and a thin section of the sample 4-8 from the Kurasiyskaya Formation (lower panel): without analyzer (on the left), with analyzer (on the right). The groundmass of two samples is represented by finely dispersed and amorphous cryptocrystalline siliceous material with quartz grains, feldspars, and flakes of clay minerals. Cristobalites are also present in the sample 4-8.

Рентгенофазовый анализ

Рентгенофазовый анализ показал различие минерального состава кристаллических фаз в образцах холмской и курасийской свит. Основное различие связано с формой нахождения кремнезема. Количественная оценка минерального состава кристаллических фаз приведена в табл. 1, дифрактограммы изученных образцов – на рис. 4.

В образце 1-3 среди выявленных кристаллических минеральных фаз преобладает кварц. Его содержание составляет 61.6 %. В под-

чиненном количестве присутствуют полевые шпаты, слюда, хлорит, кальцит и гематит. Кристобалит и тридимит в образце 1-3 не установлены. Полученные данные согласуются с петрографическим описанием силицита, в котором кварц присутствует в виде зерен неправильной, полуугловатой и угловатой формы на фоне тонкодисперсной кремнисто-алюмосиликатной основной массы.

В образце 4-8 кремнистая составляющая имеет иной фазово-минеральный состав. Основными кристаллическими модификациями

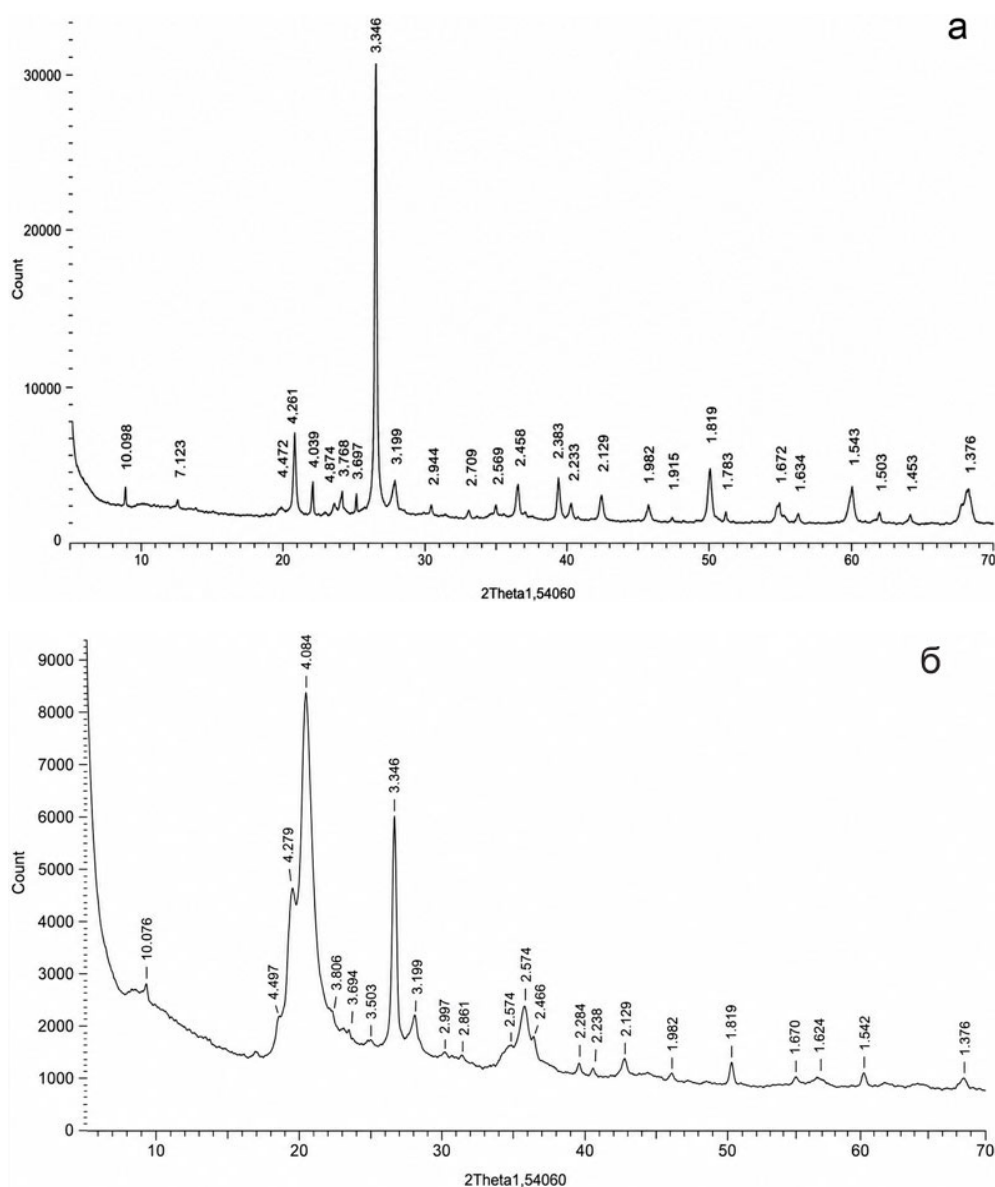


Рис. 4. Дифрактограммы образцов 1-3 холмской (а) и 4-8 курасийской (б) свиты.

Fig. 4. X-ray diffractions pattern of the sample 1-3 from the Kholmskaya Formation (a) and of the sample 4-8 from the Kurasiyskaya Formation (b).

Таблица 1. Минеральный состав кристаллических фаз по данным рентгенофазового анализа, %**Table 1.** Mineral composition of crystalline phases according to the X-ray phase analysis, %

Минерал	Образец 1-3	Образец 4-8
Кварц	61.6	8.4
Кристобалит	–	41.9
Тридимит	–	22.1
Полевые шпаты	21.6	11.9
Хлорит	6.1	2.7
Слюда	7.7	13.0
Гематит	1.3	–
Кальцит	1.7	–

Примечание. Прочерк – минерал отсутствует.

Note. Dash indicates absence of mineral.

кремнезема являются кристобалит (41.9 %) и тридимит (22.1 %). Кварц присутствует в подчиненном количестве – 8,4 %. Кроме того, установлены полевые шпаты, слюда и хлорит. Преобладание кристобалита и тридимита соответствует опоковому характеру породы и указывает на кристобалит-тридимитовый состав кремнезема в изученном образце курасийской свиты.

Термический анализ

По данным синхронного термического анализа, для изученных кремнистых пород характерна постепенная потеря массы в интервале нагрева, составляющая 7–10 %. Ос-

новной эффект на кривых ДСК выражен широким экзотермическим пиком около 600 °С. Эффект перехода α -кварца в β -кварц на термограммах отчетливо не проявлен, несмотря на присутствие кварца по данным рентгенофазового анализа. Это может быть связано со скрытокристаллическим строением кремнистого вещества, тонкодисперсностью минеральных фаз и слабой выраженностью индивидуальных термических эффектов на фоне общей реакции кремнисто-алюмосиликатной массы. Термограммы образцов 1-3 и 4-8 приведены на рис. 5.

Растровая электронная микроскопия и энергодисперсионный спектральный анализ

Холмская свита

Образец 1-4. По данным растровой электронной микроскопии, микроструктурные признаки образца 1-4 согласуются с его петрографическим определением как силицита. Основная масса сложена тонкодисперсными кристаллитами кварца. Размер отдельных кристаллитов кварца составляет порядка 1–2 мкм, агрегатов – до 10 мкм. Кристаллиты имеют угловатую форму и плотно прилегают друг к другу. В отдельных участках отмечается небольшое количество чешуек глинистых минералов гидрослюдистого состава размером 5–10 мкм. Чешуйки гидрослюды удлиненные или неправильной формы, часто с неровными краями.

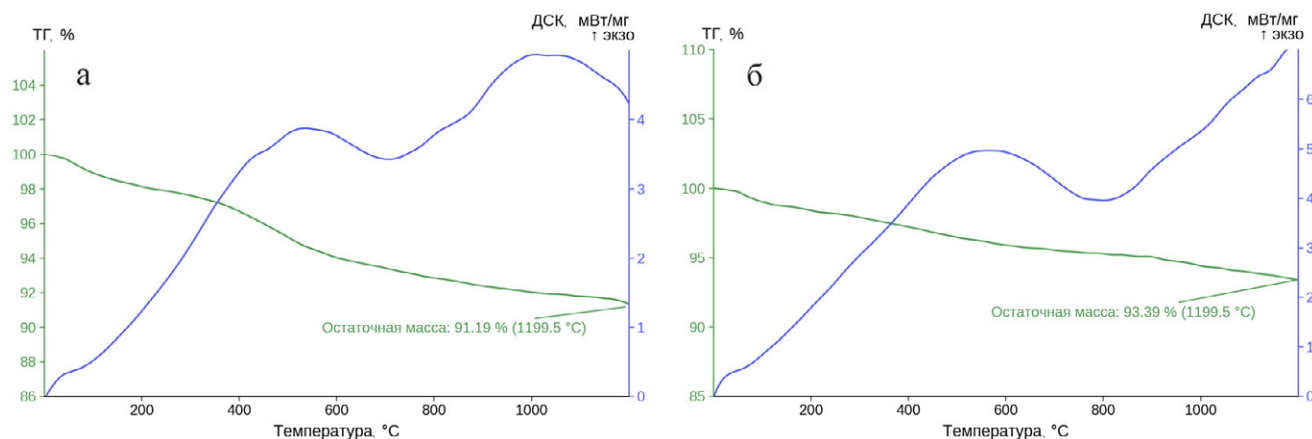


Рис. 5. Термограммы образцов 1-3 холмской (а) и 4-8 курасийской (б) свиты.

Fig. 5. Thermograms of the sample 1-3 from the Kholmokaya Formation (a) and of the sample 4-8 from the Kurasiyskaya Formation (b).

Таблица 2. Химический состав минеральных фаз и органического вещества образца 1-4 по данным ЭДС, мас.%**Table 2.** Chemical composition of mineral phases and organic matter in the sample 1-4 according to EDS data, wt.%

Компонент	Содержание основных оксидов и элементов, мас.%
Кварц с налетом гидрослюда	SiO ₂ 81.95–89.97; Al ₂ O ₃ 4.82–7.34; Na ₂ O 0.47–1.29; K ₂ O 1.18–4.41; FeO* 1.37–2.54; SO ₃ 1.14–2.37
Гидрослюда	SiO ₂ 69.03; Al ₂ O ₃ 15.66; K ₂ O 4.12; MgO 2.72; FeO* 6.02
Пирит в микроконкреции	S 50.76; Fe 46.93; K 0.67; As 0.48; Hg 0.79
Идиоморфный пирит	S 49.80; Fe 49.93; Cu 0.16; Co 0.11
Органическое вещество	C 65.79; Na 22.84; K 6.40; S 4.45; Ti 0.51

Примечание. FeO* – общее железо.*Note.* FeO* denotes total iron.

Органическое вещество представлено редкими остатками удлиненной или изогнутой формы размером 30 мкм и более по длине, частично замещенными кремнистым веществом. В составе органических выделений установлены C, Na, K, S и Ti. Повышенные содержания Na, K и S фиксируют локальное засоление органических участков и прилегающего кремнистого материала.

Аутигенное минералообразование выражено главным образом пиритом. Пирит встречается в виде микроконкреций размером более 30 мкм. Внутри микроконкреций наблюдаются микрокристаллы пирита размером менее 0.5 мкм. Состав отдельных идиоморфных кристаллов пирита близок к стехиометрическому, с незначительными примесями Cu и Co. Содержание основных оксидов и элементов в минеральных фазах и органическом веществе образца 1-4 приведено в табл. 2. Диагностическое значение имеют соотношения компонентов: преобладание SiO₂ при участии Al₂O₃, K₂O, Na₂O, FeO и SO₃ характеризует кремнисто-алюмосиликатную основную массу; сочетание Fe и S, близкое к составу FeS₂, подтверждает идентификацию пирита; повышенное содержание C с примесью щелочных элементов и S соответствует органическому веществу.

Пустотное пространство, по данным растровой электронной микроскопии (РЭМ), занимают микрокаверны, поры, межзерновые пустоты и редкие трещины. Микрокаверны встречаются в виде одиночных углублений с

каналами, уходящими вглубь породы. Размер неглубоких каверн составляет 10–250 мкм; на их дне развиты группы пор размером 5–10 мкм и менее. Межзерновые пустоты представлены мелкими округлыми порами размером обычно менее 0.5 мкм. Трещиноватость выражена слабо; отмечены короткие изогнутые трещины длиной менее 400 мкм и отдельные линейные трещины длиной более 2.5 мм. Основные элементы микроструктуры образца 1-4 показаны на рис. 6 а–д.

Курасийская свита

Образец 4-6. Опока с тонкодисперсной кремнистой основной массой, глинистым материалом и органическим веществом. Минеральная основа сложена опаловидным кремнистым веществом. Размер частиц кремнистого вещества менее 0.5 мкм. В образце наблюдаются микроглобулярные и агрегатные формы кремнистого вещества размером до 20 мкм, а также участки с практически неразличимыми границами между частицами матрикса.

Глинистый материал гидрослюдистого состава заполняет трещины, частично поровое пространство и локально располагается в кремнистой основной массе. Глинистые минералы обнаружены также в микрокавернах и отдельных редких трещинах.

Органическое вещество встречается часто. Оно образует поля темно-серого цвета неправильной формы, местами с яркими светлыми точками. Органические остатки частично

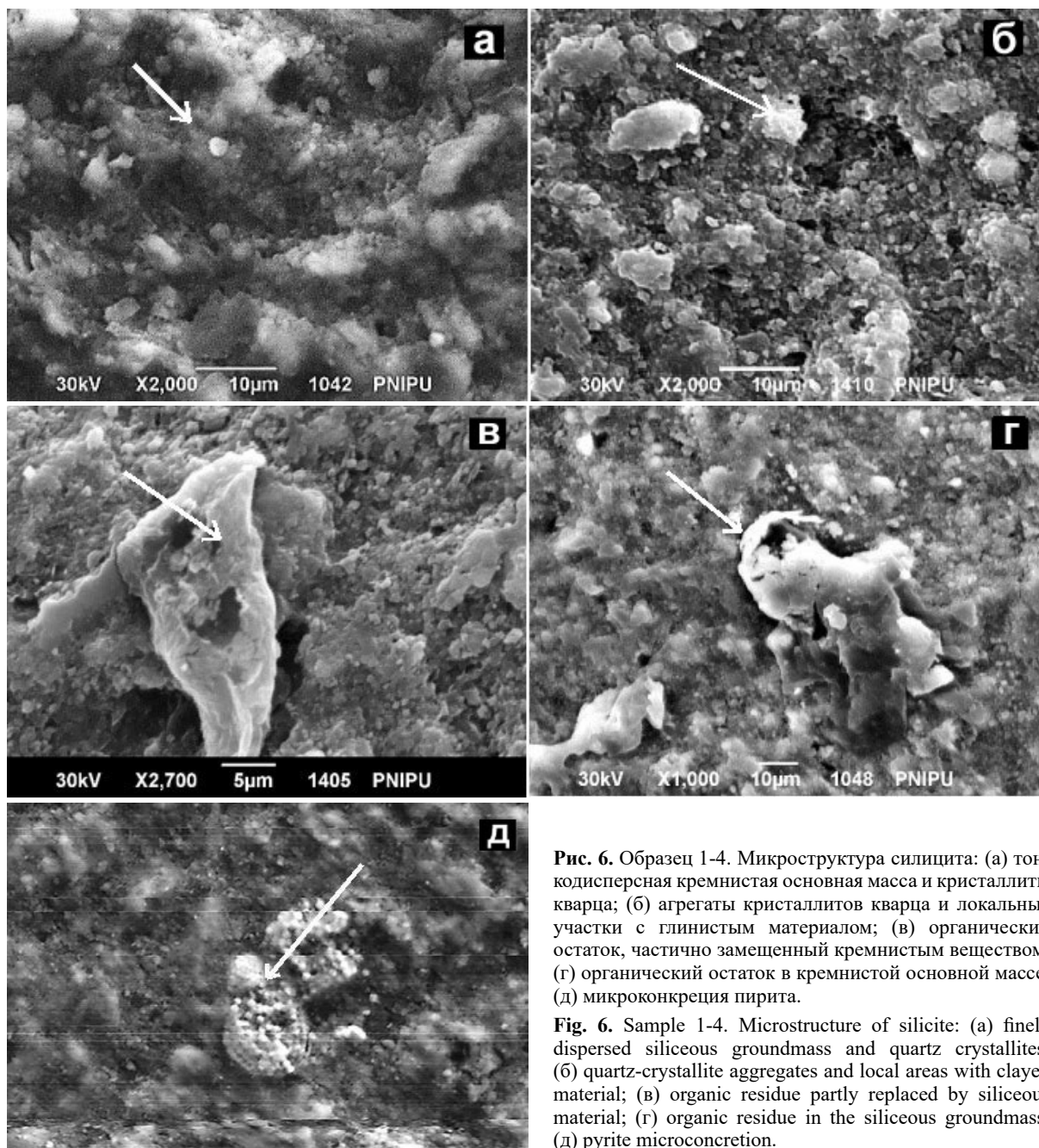


Рис. 6. Образец 1-4. Микроструктура силицита: (а) тонкодисперсная кремнистая основная масса и кристаллиты кварца; (б) агрегаты кристаллитов кварца и локальные участки с глинистым материалом; (в) органический остаток, частично замещенный кремнистым веществом; (г) органический остаток в кремнистой основной массе; (д) микроконкреция пирита.

Fig. 6. Sample 1-4. Microstructure of silicite: (a) finely dispersed siliceous groundmass and quartz crystallites; (б) quartz-crystallite aggregates and local areas with clayey material; (в) organic residue partly replaced by siliceous material; (г) organic residue in the siliceous groundmass; (д) pyrite microconcretion.

замещены кремнистым веществом. По данным ЭДС, органические участки характеризуются высоким содержанием С, а также присутствием Р, S, Cl и Ti.

В составе кремнистой основной массы установлены зоны с повышенными содержаниями Na_2O , K_2O , SO_3 и Cl. Эти признаки указывают на локальное засоление отдельных участков породы. В кремнистой матрице также выявлены гидрослюда, плагиоклаз, опал-карбонатные участки и зоны с солями. Присут-

ствие СаО в отдельных участках связано с карбонатной составляющей. Химический состав минеральных фаз образца 4-6, определенный по двум точкам, приведен в табл. 3, состав органических остатков – в табл. 4.

Пустотное пространство образца 4-6 представлено кавернами, микропорами, межзерновыми пустотами и трещинами. Микрокаверны имеют вид одиночных углублений с каналами, уходящими вглубь породы. Их поперечный размер обычно составляет 20–30 мкм.

Таблица 3. Химический состав минеральных фаз образца 4-6 по данным ЭДС, мас.%**Table 3.** Chemical composition of mineral phases in the sample 4-6 according to EDS data, wt.%

Оксид	Опал	Кремнистая матрица с солями	Гидрослюда	Плагиоклаз	Опал-карбонатная зона	Опал с солями
Na ₂ O	3.40	8.29	0.43	1.28	1.41	13.08
MgO	0.60	0.26	2.07	0.68	1.11	0.53
Al ₂ O ₃	2.71	0.95	22.54	15.11	1.35	1.46
SiO ₂	87.72	63.86	62.53	68.06	67.52	57.15
SO ₃	0.00	6.24	0.81	2.23	2.94	4.96
K ₂ O	1.93	4.77	8.86	0.73	0.64	6.63
CaO	0.38	3.36	0.19	7.54	22.39	1.87
TiO ₂	1.89	3.28	0.21	0.46	1.38	1.67
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	0.00	5.10	0.15	0.33	0.32	7.06
FeO*	1.38	0.62	2.10	3.26	0.74	1.33
Сумма	100	96.73	100	100	100	100

Примечание. FeO* – общее железо.

Note. FeO* denotes total iron.

Таблица 4. Химический состав органических остатков образца 4-6, мас.%**Table 4.** Chemical composition of organic residues in the sample 4-6, wt.%

Элемент	Участок 1	Участок 2
C	89.32	86.46
P	1.38	2.48
S	2.29	1.44
Cl	4.64	5.84
V	0.00	0.00
Ti	2.36	3.78
Сумма	100	100

Стенки микроаверн ровные, форма близка к округлой. Микропоры размером около 1 мкм и менее распространены в основной массе. Межзерновые пустоты встречаются реже, размер менее 2 мкм. Трещины представлены короткими извилистыми формами длиной около 10–40 мкм при раскрытости около 0.2 мкм и более. Основные микроструктурные особенности образца 4-6 приведены на рис. 7 а–ж.

Обсуждение

Полученные данные показывают различия в форме нахождения кремнезема в изученных образцах холмской и курасийской свит. В образце 1-3 кристаллическая кремнистая составляющая представлена преимущественно кварцем, а в образце 4-8 – крестоалитом и тридимитом (табл. 1; рис. 4). Это различие отражает неодинаковую степень структурной организации кремнистого вещества и согласуется с петрографическими признаками силицитов холмской свиты и опок курасийской свиты.

В образцах холмской свиты кремнистая основная масса имеет скрытокристаллическое и тонкодисперсное строение. Кварц присутствует в виде зерен неправильной, полуугловатой и угловатой формы, а также в виде мелких кристаллитов и агрегатов, установленных при растровой электронной микроскопии (рис. 6). Глинистый материал содержит преимущественно гидрослюда и хлорит. Он образует тонкие прожилки, слойки и локальные скопления в кремнистой основной массе.

В образцах курасийской свиты кремнистая составляющая имеет опокный характер. По данным оптической поляризационной

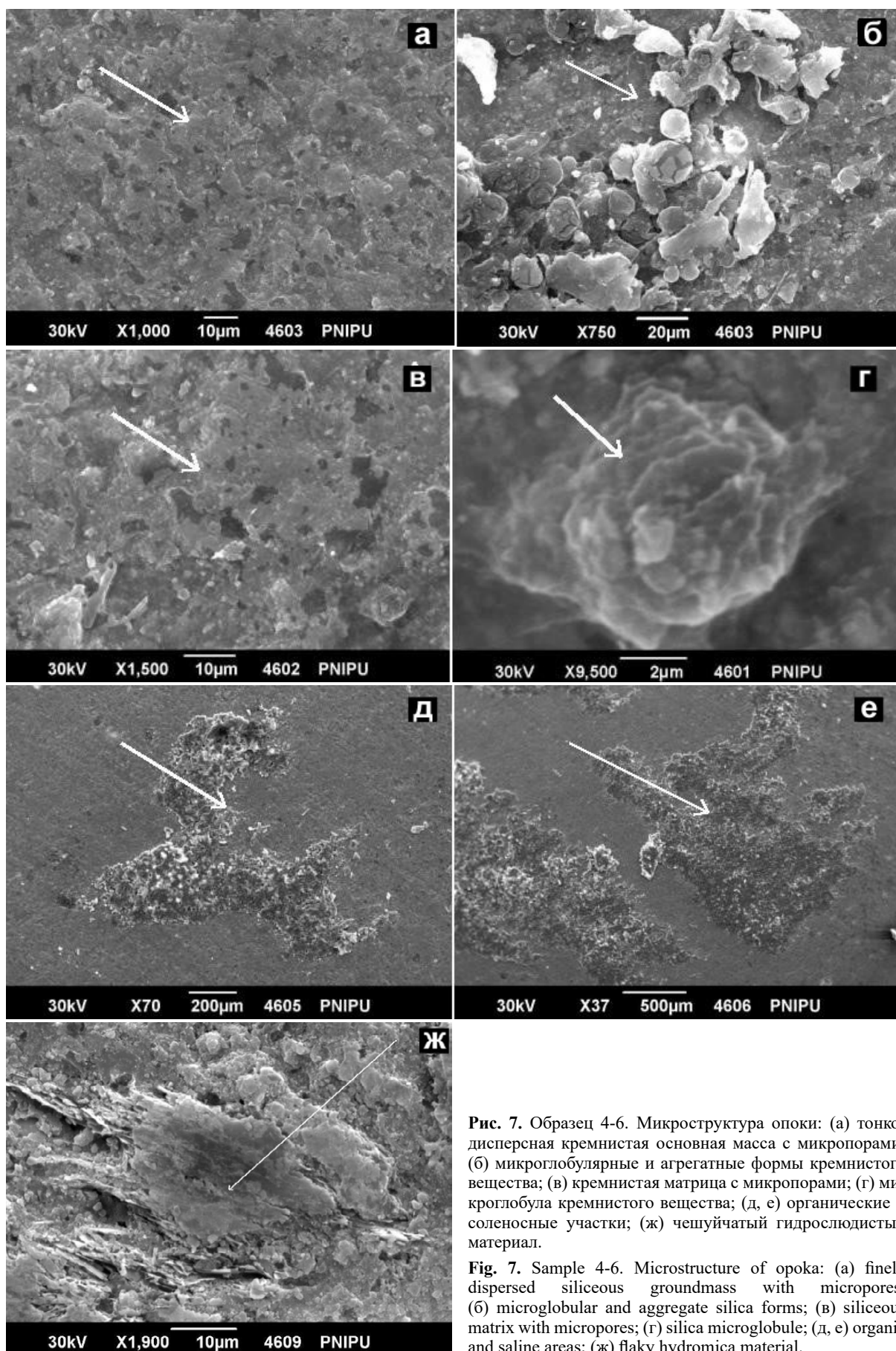


Рис. 7. Образец 4-6. Микроструктура опоки: (а) тонкодисперсная кремнистая основная масса с микропорами; (б) микроглобулярные и агрегатные формы кремнистого вещества; (в) кремнистая матрица с микропорами; (г) микроглобула кремнистого вещества; (д, е) органические и соленосные участки; (ж) чешуйчатый гидрослюдистый материал.

Fig. 7. Sample 4-6. Microstructure of opoka: (a) finely dispersed siliceous groundmass with micropores; (б) microglobular and aggregate silica forms; (в) siliceous matrix with micropores; (г) silica microglobule; (д, е) organic and saline areas; (ж) flaky hydromica material.

микроскопии в проходящем свете, в образце 4-8 выделяются зерна кристобалита с внутренним агрегатным строением, а по данным рентгенофазового анализа кристобалит и тридимит суммарно преобладают в кристаллической фазе (табл. 1; рис. 4). В образце 4-6 с помощью растровой электронной микроскопии установлены микроглобулярные и агрегатные формы кремнистого вещества (рис. 7). Такая микроструктура характерна для тонкодисперсных кремнистых пород с участием опалового и опал-кристобалитового вещества.

Отсутствие, по данным рентгенофазового анализа, выраженного пика перехода α -кварца в β -кварц на кривых ДСК при наличии кварца может быть связано со скрытокристаллическим строением кремнистого вещества и низкой выраженностью индивидуального термического эффекта в тонкодисперсной полиминеральной массе. Поступательная потеря массы в диапазоне 7–10 % отражает удаление связанной воды и термические преобразования кремнистого и глинистого материала (рис. 5). Для опокового образца существенным признаком, уточняющим форму нахождения кремнезема, является наличие кристобалита и тридимита (табл. 1; рис. 4).

Глинистый материал в обоих типах пород представлен преимущественно гидрослюдой и хлоритом. Он заполняет прожилки, микрополости, отдельные трещины и локальные участки кремнистой основной массы (рисунки 6, 7). Такая форма нахождения глинистого вещества отражает неоднородность кремнистых пород и локальное увеличение доли алюмосиликатной составляющей.

Органическое вещество установлено в образцах обеих свит, но его морфология и пространственность различаются. В образцах холмской свиты органические остатки представлены растительным детритом и углефицированным веществом, местами частично замещенным кремнистым материалом. В образце 4-6 органическое вещество образует поля неправильной формы с высоким содержанием углерода (табл. 4). Присутствие S и Cl в участках с органическим веществом, а также Na_2O , K_2O , SO_3 и Cl в кремнистой матрице указывает

на локальное засоление отдельных участков породы (таблицы 3, 4).

Аутигенное минералообразование наиболее отчетливо выражено в образце 1-4, где установлены микроконкреции и идиоморфные микрокристаллы пирита (табл. 2; рис. 6). Наличие пирита согласуется с восстановительными условиями преобразования органосодержащего осадочного материала. В образце 4-6 дополнительно установлены опал-карбонатные зоны, плагиоклаз, гидрослюда и участки кремнистой матрицы с солями (табл. 3).

Пустотное пространство изученных пород имеет сложное микростроение. По данным растровой электронной микроскопии установлены микрокаверны, межзерновые пустоты, микропоры и редкие трещины (рисунки 6, 7). В образцах курасийской свиты пустотное пространство частично связано с микрокавернами и участками микроглобулярного кремнистого вещества. В образцах холмской свиты пустотность выражена слабее и приурочена главным образом к межзерновым промежуткам, редким микрокавернам и трещинам.

Заключение

Комплексное применение поляризационной, растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного спектрального анализа, рентгенофазового и синхронного термического анализа позволило уточнить минеральный состав, форму нахождения кремнезема, характер глинистого материала, признаки аутигенного минералообразования и микростроение пустотного пространства кремнистых пород холмской и курасийской свит южного Сахалина. Резюмируем результаты исследования.

1. Образцы холмской свиты представлены силицитами серого цвета с неяснослоистой текстурой. Основная масса сложена скрытокристаллическим кремнистым веществом с тонкодисперсным глинистым материалом. В составе пород установлены кварц, полевые шпаты, гидрослюда, хлорит, гематит, кальцит, растительный детрит и углефицированное органическое вещество.

2. Образцы курасийской свиты представлены опоками светло-серого цвета. Для них характерны скрытокристаллическая и аморфная кремнистая основная масса, раковистый излом, неяснополосчатая текстура, глинистые прожилки, органические остатки и участки с железистым материалом.

3. По данным рентгенофазового анализа, в кристаллической фазе образца холмской свиты преобладает кварц (61.6 %). Подчиненные фазы представлены полевыми шпатами, слюдой, хлоритом, кальцитом и гематитом. Кристобалит и тридимит в составе кристаллической фазы не установлены.

4. Кристаллическая фаза образца курасийской свиты представлена главным образом кристобалитом (41.9 %) и тридимитом (22.1 %). Содержание кварца составляет 8.4 %. Эти данные уточняют форму нахождения кремнезема в изученной опоке курасийской свиты.

5. В обоих типах пород установлены глинистые минералы гидрослюдистого и хлоритового состава. Глинистый материал заполняет прожилки, микрокаверны, отдельные трещины и локальные участки кремнистой основной массы.

6. Органическое вещество представлено растительным детритом и углефицированными остатками. В образцах холмской свиты органические остатки частично замещены кремнистым веществом. В образце курасийской свиты органическое вещество характеризуется высоким содержанием углерода, а также присутствием S, Cl и Ti.

7. В образце холмской свиты выявлены микроконкреции пирита размером более 30 мкм и идиоморфные микрокристаллы пирита размером менее 0.5 мкм. Состав идиоморфного пирита близок к стехиометрическому, с незначительными примесями Cu и Co.

8. Выявленные в образце курасийской свиты участки кремнистой основной массы с повышенными содержаниями Na_2O , K_2O , SO_3 и Cl отражают локальное засоление кремнистого и органического материала.

9. Пустотное пространство изученных образцов имеет неоднородное строение и представлено микрокавернами, микропорами, меж-

зерновыми пустотами и редкими трещинами. При этом образцы различаются по размерности и морфологии пустот. Для образцов холмской свиты характерны более крупные одиночные каверны размером до 250 мкм при наличии мелких пор и редких трещин. В образцах курасийской свиты пустотное пространство имеет преимущественно тонкодисперсный характер и связано с микрокавернами, микропорами, межзерновыми пустотами и короткими извилистыми трещинами.

Полученные данные по форме нахождения кремнезема, глинистому материалу, органическому веществу, аутигенному пириту и микростроению пустотного пространства могут быть использованы при планировании дальнейших петрофизических, геомеханических и геохимических исследований кремнистых толщ региона.

Список литературы

1. Тютрин И.И., Дуничев В.М. *Тектоника и нефтегазоносность северо-западной части Тихоокеанского пояса*. М.: Недра, 1985, 174 с.
2. Ампилов Ю.П. *Сахалинские нефтегазовые проекты вчера, сегодня, завтра: конференция «Углеводородный потенциал Дальнего Востока»*, 2019. URL: <https://www.researchgate.net/publication/336147912>; doi:10.13140/RG.2.2.28842.16320
3. Сенин Б.В., Керимов В.Ю., Лавренова Е.А., Мустаев Р.Н. Геодинамический анализ и региональный прогноз нефтегазоносности Татарского пролива Японского моря на основе применения технологий численного моделирования. *Тихоокеанская геология*. 2022,41(4):41–59.
4. Грецкая Е.В. *Исходный нефтегазоматеринский потенциал органического вещества осадков: на примере впадин Охотского моря*. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990, 111 с.
5. Харахинов В.В. *Нефтегазовая геология Сахалинского региона*. М.: Научный мир, 2010, 275 с.
6. Керимов В.Ю., Лавренова Е.А., Синявская О.С., Сизиков Е.А. Оценка углеводородного потенциала генерационно-аккумуляционных углеводородных систем Охотского моря. *Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина*. 2015,3:18–30.
7. Каменев П.А., Лукманов А.Р. О некоторых закономерностях развития трещиноватости в терригенных породах о. Сахалин. *Геосистемы переходных зон*. 2023,7(4):419–426. <https://doi.org/10.30730/grtz.2023.7.4.419-426>

8. Kamenev P.A., Bogomolov L.M., Usoltseva O.M., Tsoi P.A., Semenov V.N. Geomechanical parameters of sedimentary rocks of Southern Sakhalin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021,946(012013). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012013>
9. Маринин А.В., Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Камнев П.А., Костров Ю.В., Бондарь И.В., Гордеев Н.А., Дегтярев В.А. Реконструкция тектонических напряжений на полуострове Шмидта, Сахалин. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2021,4(52):73–88. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2021-4-52-73-88>
10. Камнев П.А., Маринин А.В. Реконструкция палеонапряжений Западного Сахалина по результатам тектонофизических исследований. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2023,6:52–65. <https://doi.org/10.15372/FTRPI20230605>
11. Кирюхина Т.А., Бордунов С.И., Соловьева А.А. Нефтематеринские толщи в юго-западной части Южно-Сахалинского бассейна. *Вестник Московского университета. Серия 4, Геология*. 2016,6:64–73. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2016-6-64-73>
12. Гладенков Ю.Б., Баженова О.К., Гречин В.И., Маргулис Л.С., Сальников Б.А. *Кайнозой Сахалина и его нефтегазоносность*. М.: ГЕОС, 2002, 225 с.
13. *Геология СССР. Остров Сахалин*. Т. 36, ч. 1. *Геологическое описание*. М.: Недра, 1970, 432 с.
14. Аленичева А.А., Лызганов А.В., Иванова В.В. и др. (сост.) *Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Третье поколение. Серия Дальневосточная. Лист L(53), 54 (Южно-Сахалинск): объяснит. записка*. СПб.: ВСЕГЕИ, 2019, 536 с. URL: https://www.vsegei.ru/ru/info/pub_ggk1000-3/Dalnevostochnaya/l-53-54.php
15. Жемчугова Т.А. Нефтегазоносный потенциал кайнозойских отложений в центральной части Татарского пролива. *Вестник Московского университета. Серия 4, Геология*. 2013,2:69–75.
16. Осовецкий Б.М., Казымов К.П., Галкин С.В. Возможности применения метода электронной микроскопии при изучении литологических особенностей нефтеносных песчаников. *Недропользование*. 2024,24(4):178–185.
17. Иванова В.П., Касатов Б.К., Красавина Т.Н., Розина Е.Л. *Термический анализ минералов и горных пород*. Л.: Недра, 1974, 399 с.
18. Kamenev P.A., Bogomolov L.M., Usoltseva O.M., Tsoi P.A., Semenov V.N. Geomechanical parameters of sedimentary rocks of Southern Sakhalin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021,946(012013). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012013>
19. Senin B.V., Kerimov V.Y., Lavrenova E.A., Mustaev R.N. Geodynamic analysis and a regional-scale forecast of the hydrocarbon exploration potential of the Tatar Strait, Sea of Japan using numerical modeling technologies. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2022,16:317–334. <https://doi.org/10.1134/S1819714022040066>
20. Gretskeya E.V. [The initial oil and gas source potential of organic matter of sediments (on the example of depressions in the Sea of Okhotsk)]. Vladivostok: Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences, 1990, 111 p. (In Russ.).
21. Kharakhinov V.V. [Oil-and-gas geology of the Sakhalin region]. Moscow: Nauchnyi mir, 2010, 275 p. (In Russ.).
22. Kerimov V.Yu., Lavrenova E.A., Sinyavskaya O.S., Sizikov E.A. The estimation of hydrocarbon potential of the generative-accumulative hydrocarbon systems of the Sea of Okhotsk. *Proceedings of Gubkin University*. 2015,3:18–30. (In Russ.).
23. Kamenev P.A., Lukmanov A.R. Patterns of fracturing placement in terrigenous rocks of Sakhalin Island. *Geosystems of Transition Zones*. 2023,4(7):419–426. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.419-426>
24. Kamenev P.A., Bogomolov L.M., Usoltseva O.M., Tsoi P.A., Semenov V.N. Geomechanical parameters of sedimentary rocks of Southern Sakhalin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021,946(012013). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012013>
25. Marinin A.V., Rebetskiy Yu.L., Sim L.A., Kamenev P.A., Kostrov Yu.V., Bondar I.V., Gordeev N.A., Degtyarev V.A. Reconstruction of tectonic stresses on the Schmidt Peninsula (Sakhalin). *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*. 2021,4(52):73–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2021-4-52-73-88>
26. Kamenev P.A., Marinin A.V. Reconstruction of paleostresses in the West of Sakhalin from tectonophysical research findings. *Journal of Mining Science*. 2023,59(6):919–929. <https://doi.org/10.1134/S1062739123060054>
27. Kiryukhina T.A., Bordunov S.I., Solovyeva A.A. Source rock in the south-western part of the South-Sakhalin basin. *Moscow University Bulletin. Series 4, Geology*. 2016,6:64–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2016-6-64-73>
28. Gladenkov Yu.B., Bazhenova O.K., Grechin V.I., Margulis L.S., Salnikov B.A. *The Cenozoic geology and the oil and gas presence in Sakhalin*. Moscow: GEOS, 2002, 225 p. (In Russ.).

References

1. Tyutrin I.I., Dunichev V.M. [Tectonics and oil-and-gas potential of the northwestern part of the Pacific belt]. Moscow: Nedra, 1985, 174 p. (In Russ.).
2. Ampilov Yu.P. *Sakhalin oil and gas projects yesterday, today, tomorrow*: [Conference “Hydrocarbon

13. *Geology of the USSR. Sakhalin Island*. Vol. 36, Pt. 1. *Geological description*. Moscow: Nedra, 1970, 432 p. (In Russ.).
14. Alenicheva A.A., Lyzganov A.V., Ivanova V.V., et al. (comp.) [*State Geological map of Russian Federation on a scale of 1:1 000 000. Third generation. Far East series. Sheet L(53), 54 (Yuzhno-Sakhalinsk)*]: [Explanatory note], 2019. St. Petersburg: VSEGEI, 536 p. (In Russ.). URL: https://www.vsegei.ru/ru/info/pub_ggk1000-3/Dalnevostochnaya/l-53-54.php
15. Zhemchugova T.A. [Oil and gas potential of Cenozoic deposits in the central part of the Tatar Strait]. *Moscow University Bulletin. Series 4, Geology*. 2013,2:69–75. (In Russ.).
16. Osovetsky B.M., Kazymov K.P., Galkin S.V. The potential applications of electron microscopy in studying the lithological characteristics of oil-bearing sandstones. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2024,24(4):178–185. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2712-8008/2024.4.1>
17. Ivanova V.P., Kasatov B.K., Krasavina T.N., Rozinova E.L. *Thermal analysis of minerals and rocks*. Leningrad: Nedra, 1974, 399 p.

Об авторах

✉ **Кожевников Евгений Васильевич**, кандидат технических наук, научный руководитель лаборатории природных газовых гидратов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, kev@pstu.ru. <https://orcid.org/0000-0002-6084-0795>

Казымов Константин Павлович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры минералогии и петрографии, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия, kazymov@psu.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5411-4781>

Томилина Елена Михайловна, старший преподаватель кафедры минералогии и петрографии, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия, tomilinaelena.psu@yandex.ru

Турбаков Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории природных газовых гидратов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, msturbakov@pstu.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9336-5847>

Рябokonь Евгений Павлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории природных газовых гидратов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, riabokon@pstu.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0555-3977>

Иванов Захар Григорьевич, младший научный сотрудник лаборатории природных газовых гидратов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, zakharivanov@pstu.ru. <https://orcid.org/0009-0001-7957-8280>

Шевлодский Мирослав Александрович, ассистент кафедры минералогии и петрографии, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия,

Каменев Павел Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии и региональной геологии, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, Южно-Сахалинск, Россия, p.kamenev@imgg.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9934-5855>

About the Authors

✉ **Kozhevnikov, Evgenii V.**, Cand. Sci. (Engineering), Leader of the Laboratory of Natural Gas Hydrates, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, kev@pstu.ru. <https://orcid.org/0000-0002-6084-0795>

Kazymov, Konstantin P., Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor at the Department of Mineralogy and Petrography, Perm State National Research University, Perm, Russia, kazymov@psu.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5411-4781>

Tomilina, Elena M., Senior lecturer at the Department of Mineralogy and Petrography, Perm State National Research University, Perm, Russia, tomilinaelena.psu@yandex.ru

Turbakov, Mikhail S., Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher of the Laboratory of Natural Gas Hydrates, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, msturbakov@pstu.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9336-5847>

Riabokon, Evgenii P., Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher of the Laboratory of Natural Gas Hydrates, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, riabokon@pstu.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0555-3977>

Ivanov, Zakhar G., Junior Researcher of the Laboratory of Natural Gas Hydrates, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, zakharivanov@pstu.ru. <https://orcid.org/0009-0001-7957-8280>

Przevlodskiy, Miroslav A., Assistant Professor, Department of Mineralogy and Petrography, Perm State National Research University, Perm, Russia

Kamenev, Pavel A., Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher of the Laboratory of Geochemistry and Regional Geology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, p.kamenev@imgg.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9934-5855>

Поступила 13.01.2026

Принята к публикации 08.06.2026

Received 13 January 2026

Accepted 8 June 2026

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



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

УДК 551.46.0

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.2.189-204>
<https://www.elibrary.ru/cvzjzp>

Особенности колебаний уровня моря и атмосферного давления на восточном шельфе острова Сахалин

Д. П. Ковалев, П. Д. Ковалев, А. С. Борисов, В. С. Зарочинцев

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

Резюме. Представлены результаты анализа колебаний уровня моря и атмосферного давления по данным наблюдений, выполнявшихся с одномоментной дискретностью в течение 12.5 сут с платформы самоподъемной плавучей буровой установки «Сахалинская», установленной на восточном шельфе о. Сахалин в районе Ныйского залива на глубине 25–30 м. Измерения проводились с использованием кабельного цифрового приборного комплекса с пьезокварцевыми датчиками давления. Спектральный анализ колебаний уровня моря выявил выраженные пики на периодах, близких к суточным и полусуточным приливным гармоникам, а также низкочастотные максимумы, интерпретируемые как проявления шельфовых сейш и сейш Ныйского залива. Показано, что в минутном диапазоне периодов регистрируются волновые процессы инфрагравитационного типа, часть которых может переходить в краевые волны, распространяющиеся вдоль берега. Анализ колебаний атмосферного давления выявил спектральные максимумы в диапазоне от нескольких минут до десятков минут, которые могут быть связаны с внутренними и акустико-гравитационными волнами в атмосфере. В штормовые периоды наблюдается усиление волновой активности и формирование почти непрерывного спектра с выраженной модовой структурой. Установлено, что наклон спектральной плотности колебаний атмосферного давления в рассматриваемом диапазоне периодов близок к степени $-1/3$, что отличается от ранее опубликованных данных и объясняется попаданием исследуемых периодов в область поступления энергии в нижние слои атмосферы.

Ключевые слова: колебания уровня моря, атмосферное давление, приливные гармоника, шельфовые сейши, инфрагравитационные волны, краевые волны, акустико-гравитационные волны

Features of sea level and atmospheric pressure fluctuations on the eastern shelf of Sakhalin Island

Dmitry P. Kovalev, Peter D. Kovalev, Aleksander S. Borisov, Vitaly S. Zarochnitsev

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

Abstract. The results of an analysis of sea level and atmospheric pressure fluctuations based on observations conducted over 12.5 days with one-minute intervals from the jack-up drilling rig Sakhalinskaya, which is installed on the eastern shelf of Sakhalin Island in the Nyysky Bay area at a depth of 25–30 m, are presented. Measurements were made using a digital cable system equipped with piezo-quartz pressure sensors. Spectral analysis of sea level variations revealed pronounced peaks at periods close to the diurnal and semidiurnal tidal harmonics, as well as low-frequency maxima interpreted as manifestations of shelf seiches and seiches of Nyysky Bay. It was shown that infragravity waves were recorded within the minute-range periods, some of which may transform into edge waves propagating along the coast. The analysis of atmospheric pressure fluctuations revealed spectral maxima in the range from several minutes to tens of minutes, which can be associated with internal gravity waves and acoustic-gravity waves in the atmosphere. During stormy periods, wave activity intensified, and an almost continuous spectrum with a distinct mode structure was formed. It was established that the spectral density slope of atmospheric pressure fluctuations

in the considered period range is close to the power of $-1/3$, which differs from previously published results and is explained by the fact that the analyzed periods occur within the range of energy input to the lower atmosphere.

Keywords: sea level fluctuations, atmospheric pressure, tidal harmonics, shelf seiches, infragravity waves, edge waves, acoustic-gravity waves

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (FWWM-2024-002).

Funding

The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS (No. FWWM-2024-002).

Для цитирования: Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Борисов А.С., Зарочинцев В.С. Особенности колебаний уровня моря и атмосферного давления на восточном шельфе острова Сахалин. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 2, с. 189–204. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.2.189-204>; <https://www.elibrary.ru/cvzjzp>

For citation: Kovalev D.P., Kovalev P.D., Borisov A.S., Zarochinitsev V.S. Features of sea level and atmospheric pressure fluctuations on the eastern shelf of Sakhalin Island. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 2, p. 189–204. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.2.189-204>; <https://www.elibrary.ru/cvzjzp>

Введение

Освоение шельфовых районов о. Сахалин требует учета природных факторов, определяющих условия эксплуатации морских инженерных сооружений. Одним из ключевых факторов является волновой режим, включая его длиннопериодную составляющую, способную вызывать дополнительные нагрузки на сооружения и способствовать перераспределению донных отложений. В прибрежной зоне и на шельфе могут проявляться различные типы длинных волн, включая приливные колебания, шельфовые сейши, сейши заливов, инфрагравитационные и краевые волны. Эти процессы характеризуются широким диапазоном периодов и пространственных масштабов и нередко оказываются определяющими при формировании экстремальных уровней воды и нестационарных течений. Изучение указанных волн в прибрежной зоне и на шельфе является важной задачей физической океанологии и инженерной гидрофизики.

Особый интерес представляет анализ волновых процессов по данным натурных наблюдений, выполненных непосредственно в районах размещения морских платформ. Такие измерения позволяют выявлять особенности спектральной структуры колебаний уровня

моря в реальных условиях шельфа, а также сопоставлять колебания уровня моря с вариациями атмосферного давления. Последнее важно для исследования атмосферных гравитационных и акустико-гравитационных волн, которые могут проявляться в спектре приземного давления в минутном диапазоне периодов и потенциально влиять на условия эксплуатации морских объектов, включая взлетно-посадочные операции вертолетов и радиолокационные наблюдения под малыми углами.

Несмотря на наличие большого числа работ, посвященных длинным волнам в океане и атмосферным гравитационным волнам, степень изученности колебаний уровня моря в акватории Охотского моря и у восточного побережья Сахалина существенно различается в зависимости от диапазона периодов. Приливной режим Охотского моря и структура основных приливных гармоник подробно исследованы в ряде работ, в том числе на основе численного моделирования и анализа наблюдений [1–5]. Показано, что в данном регионе формируется сложный приливной режим с выраженными суточными и полусуточными составляющими и значительными приливными течениями. Наблюдения и анализ циркуляции вод также свидетельствуют о важной роли приливных процессов и прибрежных волн в динамике шельфа восточного Сахалина [6–10].

Отдельные исследования посвящены изменчивости уровня моря и сейшевым колебаниям в бухтах и заливах, где геометрия береговой линии и батиметрия могут приводить к формированию собственных колебаний акваторий [11–13]. Вместе с тем большинство существующих работ ориентировано преимущественно на приливные и длиннопериодные процессы. Колебания уровня моря и атмосферного давления в диапазоне периодов от нескольких минут до одного часа изучены значительно слабее. Это связано прежде всего с тем, что для их анализа необходимы высокочастотные натурные измерения с дискретностью не хуже нескольких минут, которые в шельфовых районах северо-западной части Тихого океана выполнялись относительно редко.

В результате данные о совместных наблюдениях короткопериодных колебаний уровня моря и атмосферного давления на шельфе восточного Сахалина ограничены. В частности, практически отсутствуют публикации, в которых анализировались бы инфрагравитационные и краевые волны, а также атмосферные гравитационные и акустико-гравитационные возмущения в диапазоне минутных периодов на основе натурных измерений.

Целью настоящей работы является выявление и интерпретация спектральных особенностей колебаний уровня моря и атмосферного давления на восточном шельфе о. Сахалин на основе данных натурных наблюдений, а также оценка роли приливных, сейшевых, инфрагравитационных и атмосферных волновых процессов в формировании волнового режима района исследований.

Район исследований и методика наблюдений

Наблюдения проводились с использованием цифрового кабельного измерительного комплекса, разработанного в ИМГиГ ДВО РАН [14] и установленного на самоподъемной плавучей буровой установке (СПБУ) «Сахалинская», расположенной на восточном шельфе о. Сахалин в районе Ныйского залива (рис. 1). По данным глобальной батиметрической модели SRTM15+ с пространственным шагом 15 угловых секунд [15], глубина в районе установки СПБУ может быть ориентировочно оценена в 25–30 м. Эта величина является приближенной батиметрической оценкой, поскольку промеры глубины непосредственно в точке постановки комплекса не проводились.

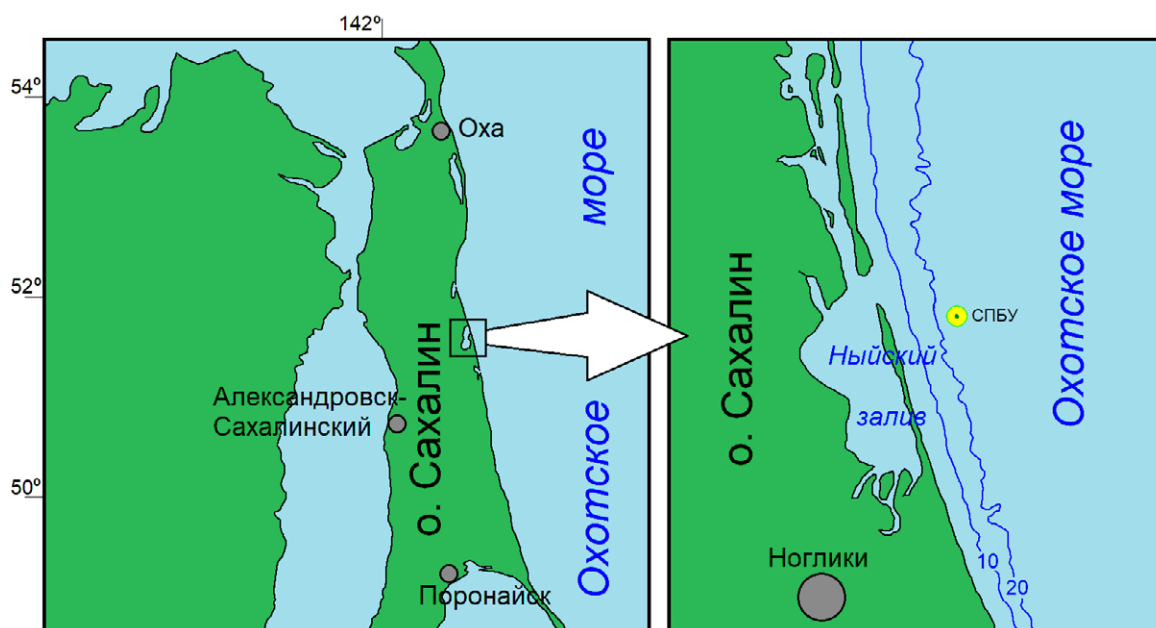


Рис. 1. Карты северной части о. Сахалин и акватории расположения измерительного комплекса.

Fig. 1. Maps of the northern part of Sakhalin Island and the water area, where the measuring complex is located.

В качестве первичного преобразователя использовался кварцевый пьезорезонансный датчик давления ПДТК-Р-МГ (<http://www.sktdelpa.ru>), разработанный в ООО СКТБ «ЭлПА», с диапазоном измерения гидростатического давления 0.5–100 м вод. ст. Согласно паспортным характеристикам, разрешающая способность датчика давления составляет $\pm 0,0008$ % верхнего предела измерения. При верхнем пределе измерения 100 м вод. ст. это соответствует разрешению около 0.8 мм вод. ст. Чувствительный элемент датчика давления располагался на глубине примерно на 1.2 м ниже среднего уровня моря.

Дополнительно на СПБУ был установлен микробарограф производства ООО СКТБ «ЭлПА» с абсолютной погрешностью преобразования вариаций атмосферного давления 0.02 гПа в диапазоне не более 10 гПа. Регистрация колебаний уровня моря и атмосферного давления выполнялась с дискретностью 1 мин в течение 12.5 сут.

Полученные временные ряды характеризуют волновые процессы в рассматриваемом районе в период наблюдений и отражают особенности спектральной структуры колебаний при данных гидрометеорологических условиях. Длина временного ряда определяет разрешение в низкочастотной области спектра, тогда как изменчивость синоптической обстановки может влиять на вклад отдельных типов волн. Уточнение выявленных закономерностей возможно на основе более продолжительных и пространственно распределенных наблюдений.

В результате проведенных наблюдений были получены временные ряды продолжительностью 12.5 сут, представленные на рис. 2. Длительность наблюдений была ограничена условиями проведения измерений и регламентом работы оборудования на самоподъемной плавучей буровой установке.

На графике колебаний атмосферного давления отчетливо выделяется период с 11 по 13 августа, в течение которого давление превышало 755 мм рт. ст. и наблюдались относительно спокойные погодные условия. Вместе с тем в ряду давления фиксируются короткопериодные пульсации, наиболее заметные 8 ав-

густа, 17 августа и в последние сутки наблюдений. Эти вариации имеют характер быстрых флуктуаций давления на фоне синоптического хода и, вероятно, связаны с мезомасштабными атмосферными процессами и распространением атмосферных гравитационных возмущений. В период 13–15 августа в ряду атмосферного давления наблюдаются резкие вариации, которым сопутствуют изменения характера колебаний уровня моря. В целом в колебаниях уровня моря проявляется смешанный приливной режим с участием суточных и полусуточных гармоник, характерный для акватории Охотского моря. Относительный вклад этих составляющих изменяется во времени, что приводит к вариациям формы приливных колебаний.

Совместное рассмотрение временных рядов атмосферного давления и уровня моря показывает наличие обратной зависимости между этими величинами, особенно заметной в последние несколько суток наблюдений, когда рост атмосферного давления сопровождался тенденцией к понижению уровня моря. Подобное поведение соответствует известному эффекту обратного барометра.

Анализ низкочастотных колебаний уровня моря

Фильтрация и спектральный, а также взаимно-спектральный анализ временных рядов выполнялись с использованием программы комплексной обработки данных «Кута», разработанной в ИМГиГ ДВО РАН и описанной в работах [16, 17]. Рассчитанные спектральные плотности для диапазона периодов колебаний уровня моря от 1 до 30 ч выявили значимые пики, превышающие 95% доверительный интервал, на периодах 24.71, 12.34, 9.23, 6.67 и 3.88 ч. Для выделения приливной составляющей был выполнен предварительный гармонический анализ временного ряда уровня моря с последующим вычислением предсказанного прилива. Далее были построены спектральные плотности исходного ряда и ряда, из которого вычтена предвычисленная приливная составляющая. Сравнение полученных спектров показало, что пики на периодах 24.71 и 12.34 ч

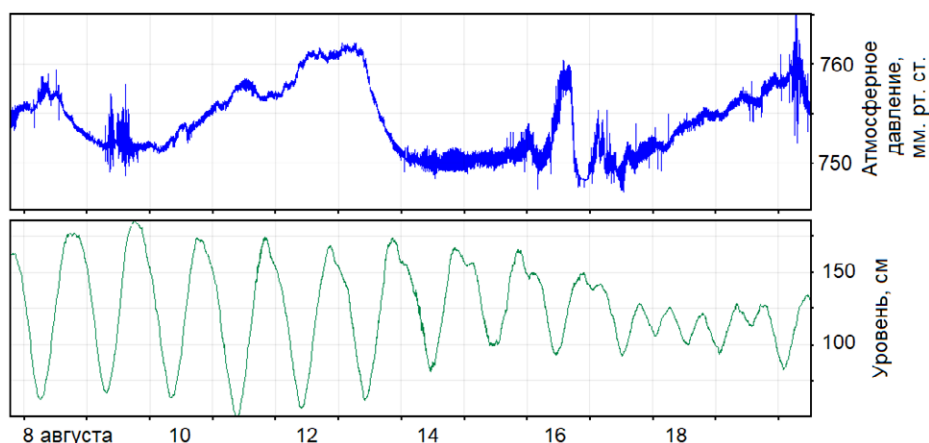


Рис. 2. Временные ряды колебаний атмосферного давления и уровня моря.

Fig. 2. Time series of atmospheric pressure and sea level fluctuations.

соответствуют суточным и полусуточным приливным колебаниям. Эти значения близки к периодам приливных гармоник M_1 и M_2 в соответствии с выводами работы [1]. Следует отметить, что из-за ограниченной длины временного ряда точность определения периодов отдельных гармоник невысока. Предвычисленные программой значения периодов суточных гармоник составили 24.86 ч (близко к гармонике K_1), а полусуточных – 12.17 ч (близко к гармонике S_2). В рассматриваемом случае не является принципиально важным, какими именно приливными гармониками представлены обнаруженные колебания. Существенен сам факт выделения характерных периодов 24.71 и 12.34 ч, относящихся к суточному и полусуточному приливному диапазону соответственно. Их идентификация позволяет корректно выделить приливную составляющую временного ряда и отделить ее от других длиннопериодных процессов.

Пики спектральной плотности с периодами 9.23, 6.67 и 3.88 ч, как показало сравнение спектральных плотностей, не относятся к приливным гармоникам. Исходя из полученных значений периодов, было высказано предположение, что в рассматриваемом случае они могут быть обусловлены шельфовыми сейшми, формирующимися в зоне шельфа в результате отражения волн, приходящих из открытого моря, от береговой линии. Для проверки этого предположения были рассчитаны периоды шельфовых сейш в районе Ныйского

залива при среднем наклоне дна $\alpha = 0.0044$ и ширине шельфа $L = 135$ км по формуле для расчета периодов шельфовых сейш в приближении линейно наклонного дна, приведенной в работе [6]:

$$T_n = 8\sqrt{L}/(n\sqrt{g\alpha}), \quad (1)$$

где $n = 1, 3, 5, \dots$ – номер моды, g – ускорение силы тяжести, α – уклон дна.

Вычисления показали, что период первой моды шельфовой сейши составляет 3.93 ч, что близко к обнаруженному максимуму в спектрах на периоде 3.88 ч.

Для объяснения периодов спектральных максимумов 6.67 и 9.23 ч было рассмотрено предположение о возможном вкладе собственных колебаний акватории Ныйского залива. Несмотря на то что шельфовая область не является «второй бухтой» в строгом смысле, длинноволновые колебания в полуоткрытых акваториях могут излучаться через вход в виде выходящего длинноволнового поля и регистрироваться на прилегающем шельфе. Физически это связано с тем, что при сейшевых колебаниях возникает нестационарный объемный обмен через вход (пульсации расхода), формирующий возмущение уровня и течений за пределами залива; далее это возмущение распространяется как длинная гравитационная волна на шельфе и может частично отражаться от береговой линии, участвуя в формировании наблюдаемой спектральной структуры.

В работе [18] для оценки взаимного влияния полуоткрытых акваторий предложен безразмерный критерий $d/l < 5.0$ (где d – расстояние между входами бухт, а l – длина одной бухты), характеризующий возможность динамической связи через длинные волны. В рассматриваемом случае расстояние от входа в Ныйский залив до места установки СПБУ составляет 6917 м, а характерная длина широкой части залива – 14 410 м, что дает $d/l = 0.48$. Мы используем этот критерий как качественный индикатор того, что точка наблюдений расположена в ближней зоне, где вклад излучаемых заливом длинных волн потенциально может быть замечен. Совпадение характерных периодов рассматривается как согласующийся признак возможного влияния собственных колебаний Ныйского залива на колебания уровня в точке наблюдений.

Расчет сейш – собственных колебаний акватории Ныйского залива был выполнен для его размеров, определенных по карте открытого интернет-ресурса. Общая длина Ныйского залива составляет приблизительно 36 240 м, длина широкой части на юге – 14 410 м при ширине 4109 м, расстояние от южного берега залива до о. Каурунани – 27 500 м, средняя глубина – около 2 м. Расчеты проводились как для полной длины залива, так и для его широкой части с использованием формулы для открытого с одного конца бассейна, приведенной в работе [6]:

$$T_n = \frac{4L}{(2n + 1)\sqrt{gH}}, \quad (2)$$

где L – длина бассейна, H – глубина, g – ускорение силы тяжести, а $n = 0, 1, 2, \dots$ – номер моды. Нулевая мода, соответствующая наибольшему значению периода для каждой акватории, представляет собой моду Гельмгольца, аналогичную основному тону акустического резонатора [19]. Рассчитанные значения периодов продольных колебаний для всего рассматриваемого залива, его широкой части и участка от южного берега до о. Каурунани составили 9.09, 6.89 и 3.61 ч соответственно. Эти значения близки к периодам пиков в спектральных плотностях 9.23, 6.67 и 3.88 ч; расхождение для наименьшего периода не превышает 7 % с

учетом сделанных приближений. Таким образом, более короткопериодные колебания могут быть обусловлены как сейшами Ныйского залива, так и шельфовыми сейшами Охотского моря.

Дополнительно был выполнен расчет сейш для Ныйского залива с учетом его ширины по формуле для собственных колебаний прямоугольной бухты (двумерные моды), предложенной в работе [11]:

$$T_{km} = \frac{4}{\sqrt{gH}} \frac{ab}{\sqrt{(1 + 2k)^2 b^2 + 4m^2 a^2}}, \quad (3)$$

где a , b , H – средние длина, ширина и глубина бухты; $k = 0, 1, 2, \dots$; $m = 0, 1, 2, \dots$

Расчеты по формуле (3) для нулевой моды, т.е. при $k = 0$ и $m = 0$ для трех прямоугольных бухт шириной $b = 4109$ м, глубиной $H = 2$ м и длинами a , равными 36 240 м, 27 500 м и 14 410 м, дали значения периодов, близкие к полученным по формуле (2).

Отметим, что, несмотря на простоту формул (2) и (3), использование более сложных моделей расчета сейш акваторий, например основанных на конформном отображении области залива, приводит к существенному усложнению вычислений, но, как правило, не дает заметного выигрыша в точности определения периодов сейш. Это связано с изменчивостью глубины и конфигурации береговой линии в течение приливно-отливного цикла. Аналогичный вывод о применимости простых формул для расчета сейш приведен в работе [12], где показано, что периоды сейш, вычисленные по упрощенным соотношениям, во многих случаях оказываются близкими к измеренным значениям.

Короткопериодные колебания уровня моря и атмосферного давления

Рассмотрен минутный диапазон периодов колебаний уровня моря и атмосферного давления. Соответствующие спектральные плотности приведены на рис. 3. В спектре колебаний уровня моря выделяются пики с периодами 7.76, 10.36–11.78, 23.19 и 48.12 мин.

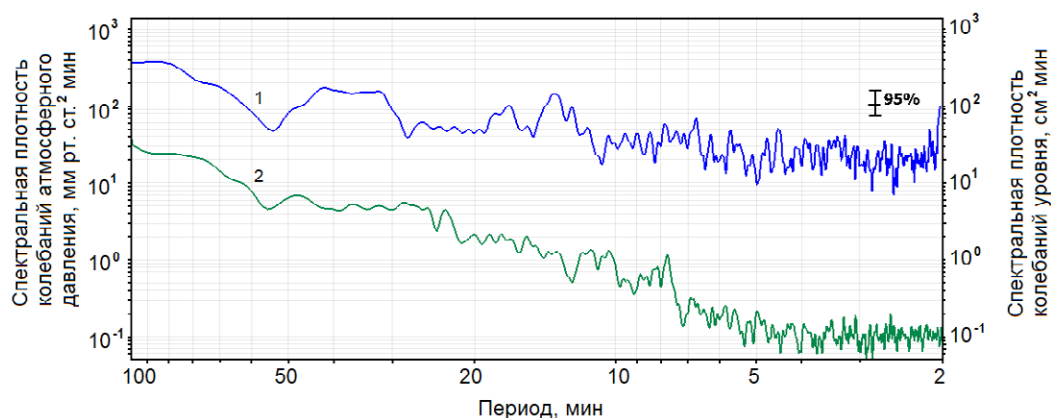


Рис. 3. Спектральные плотности колебаний атмосферного давления (1) и уровня моря (2).

Fig. 3. Spectral densities of atmospheric pressure (1) and sea level (2) fluctuations.

Короткопериодные колебания в минутном диапазоне относятся к инфрагравитационным (ИГ) волнам – длинным волнам, формирующимся в результате нелинейного взаимодействия ветровых волн и зыби, представляющих собой короткие гравитационные волны [6]. Согласно данным различных авторов, высоты и периоды ИГ волн изменяются в широких пределах: высоты – от 1–2 до 250 см, периоды – от 0.3–0.5 до 5–7 (10) мин. Отметим, что для колебаний уровня моря с периодом 48.12 мин соответствующий пик в спектральной плотности не превышает 95%-й доверительный интервал, однако превосходит уровень 80 %.

Инфрагравитационные волны порождают в прибрежной зоне различные явления, такие как волновой нагон, разрывные течения и прибойные бияния, и играют важную роль в формировании береговых и прибрежных форм рельефа, включая береговые фестоны, косы и серповидные бары [6]. Исходя из диапазона существования ИГ волн можно заключить, что обнаруженные волновые процессы с периодами 7.76 и 10.36 мин относятся к инфрагравитационным. Поскольку четкой границы периодов возбуждения ИГ волн не существует, а в Охотском море наличествует длиннопериодная зыбь, к инфрагравитационным можно отнести и волны с периодами до 11.78 мин.

Инфрагравитационные волны, распространяющиеся из открытого моря к берегу, могут захватываться и переходить в краевые волны, распространяющиеся вдоль береговой

линии. В работах [20, 21] показано, что вдольбереговая структура волн формируется преимущественно низшими модами краевых волн. Они генерируются при захвате энергии ИГ волн, подходящих к берегу под острым углом, на периодах, близких к собственным периодам краевых волн [22, 23], характерных для прибрежной зоны.

Рассмотрена возможность генерации краевых волн с периодами от 7 до 24 мин с учетом того, что профиль морского дна на удалении от берега до 140 км является достаточно пологим. Для оценки использовано дисперсионное соотношение для краевых волн Стокса в приближении плоского наклонного дна, полученное Урселлом [24]:

$$\omega_n^2 = gk \sin[(2n + 1)\beta], \quad (4)$$

где ω_n – частота моды n краевой волны, k – вдольбереговое волновое число, β – наклон дна. Нижний предел существования краевых волн определяется условием $k \geq \omega^2/g$ [25], а число мод краевых волн при заданном уклоне дна ограничено неравенством: $n \leq \pi/4\beta - 1/2$ [6].

Для первых четырех мод краевых волн была рассчитана дисперсионная диаграмма (рис. 4) с использованием выражения (4). Полученная диаграмма подтверждает возможность генерации краевых волн с периодами 7.76, 10.36–11.78, 23.19 и 48.12 мин и вдольбереговыми длинами волн примерно от 13.6 до 97.8 км, возбуждаемых приходящими инфрагравитационными волнами.

Спектр, приведенный на рис. 3, характеризует усредненное распределение энергии колебаний за весь период наблюдений. Однако энергия волнения существенно изменяется во времени, поэтому для анализа временной эволюции спектральной структуры был дополнительно рассчитан текущий спектр (спектрограмма).

Перед расчетом спектрограммы из временного ряда уровня моря была удалена приливная составляющая. Более низкочастотные вариации уровня при этом сохранялись, что позволяло проследить изменение амплитуды короткопериодных колебаний на фоне медленных изменений уровня моря. Для временного ряда атмосферного давления, напротив, применялась дополнительная фильтрация с удалением колебаний с периодами более 1 ч, что позволило выделить короткопериодные пульсации давления.

Алгоритм расчета спектрограммы описан в работах [16, 17] и заключается в следующем: исходный временной ряд разбивается на $2N/n - 1$ отрезков длиной n , где N – длина всего ряда. Каждый последующий отрезок смещается относительно предыдущего на $n/2$. Для каждого отрезка рассчитывается спектр с использованием процедуры сглаживания спектральных оценок, полностью аналогичной расчету одиночных спектров в данной программе. В настоящей работе для расчета использова-

лось значение $n = 60$ мин. Рассчитанные спектрограммы колебаний уровня моря и атмосферного давления приведены на рис. 5.

На спектрограмме (рис. 5 б) видно, что энергия колебаний уровня моря существенно возрастает в периоды увеличения амплитуды волнения (рис. 5 а). При этом усиление энергии наблюдается в широком диапазоне периодов – от 2 мин и более. В период высокой амплитуды волн 14 августа отчетливо проявляется модовая структура колебаний с ясно выраженными максимумами. Такая картина характерна для случаев генерации краевых волн инфрагравитационной природы.

Отметим, что периоды увеличения энергии морских волн (рис. 5 б) в целом не совпадают по времени с максимумами энергии короткопериодных колебаний атмосферного давления, за исключением события 14 августа, когда наблюдается их одновременное усиление. Как показали расчеты, корреляция между временными рядами колебаний уровня моря и атмосферного давления отсутствует во всем минутном диапазоне периодов, что указывает на отсутствие прямой передачи энергии от атмосферных волн к морским в данном диапазоне периодов. Вместе с тем, по данным Архива метеорологических данных GSOD (станция 321500) (http://pogoda-service.ru/archive_gsod_res.php?country=RS&station=321500&datepicker_beg=09.08.1988&datepicker_end=20.08.1988), максимумы энергии колебаний атмосферного давления совпадают по датам с периодами, когда температура превышала значение 14.4 °С и наблюдалась солнечная и спокойная погода.

Рассмотрим колебания атмосферного давления, интерес к которым обусловлен их связью со спектром внутренних волн в атмосфере. Имея спектр флуктуаций приземного давления, вызванных внутренними гравитационными волнами, и используя модель атмосферы,

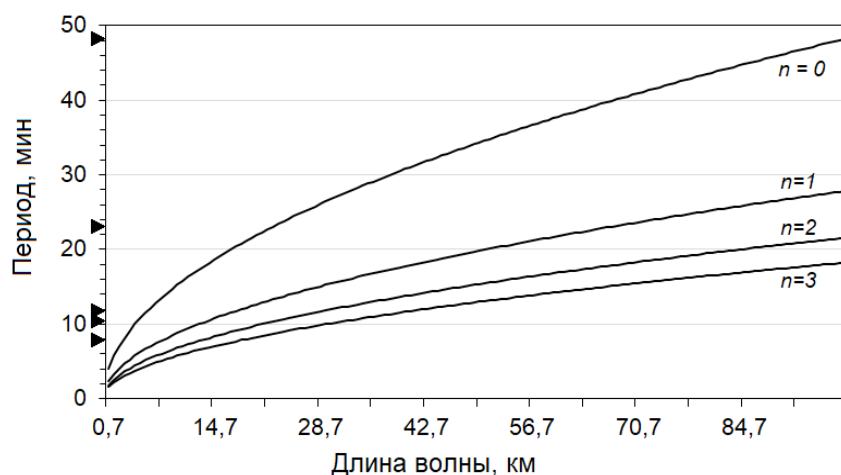


Рис. 4. Дисперсионная диаграмма краевых волн, возбуждаемых ИГ волнами. Отмечены периоды 7.76, 10.36, 11.78, 23.19 и 48.12 мин.

Fig. 4. Dispersion diagram of edge waves excited by infragravity waves. Periods of 7.76, 10.36, 11.78, 23.19, and 48.12 min are indicated.

можно восстановить их амплитудный спектр [26]. Этот спектр представляет практический интерес, поскольку должен учитываться при посадках вертолетов на площадки буровых установок на шельфе, а также в задачах распространения электромагнитного излучения, связанных с радиолокационным покрытием под малыми углами.

Типичная амплитуда колебаний атмосферного давления, связанных с волновыми процессами, находится в диапазоне 0.01–0.1 гПа [27] при периодах от 1 до 40 мин [28]. Вместе с тем известны эпизоды интенсивных мезомасштабных гравитационных волн с амплитудами до 2–3 гПа [29]. Типичная амплитуда колебаний давления, обусловленных турбулентными

движениями, составляет порядка нескольких сотых гПа [30]. Поскольку абсолютное атмосферное давление у поверхности Земли составляет около 1000 гПа, для регистрации слабых волновых и турбулентных возмущений требуется чувствительность не хуже 0.01 гПа. Такое разрешение свойственно лишь ограниченному числу современных барометров; в нашей работе погрешность преобразования вариаций барического давления составляла 0.02 гПа. Чувствительность прибора достаточна для регистрации наблюдаемых короткопериодных флуктуаций, но слабые возмущения нужно интерпретировать с учетом предела разрешения.

В соответствии с классификацией волновых движений в атмосфере, приведенной в [31],

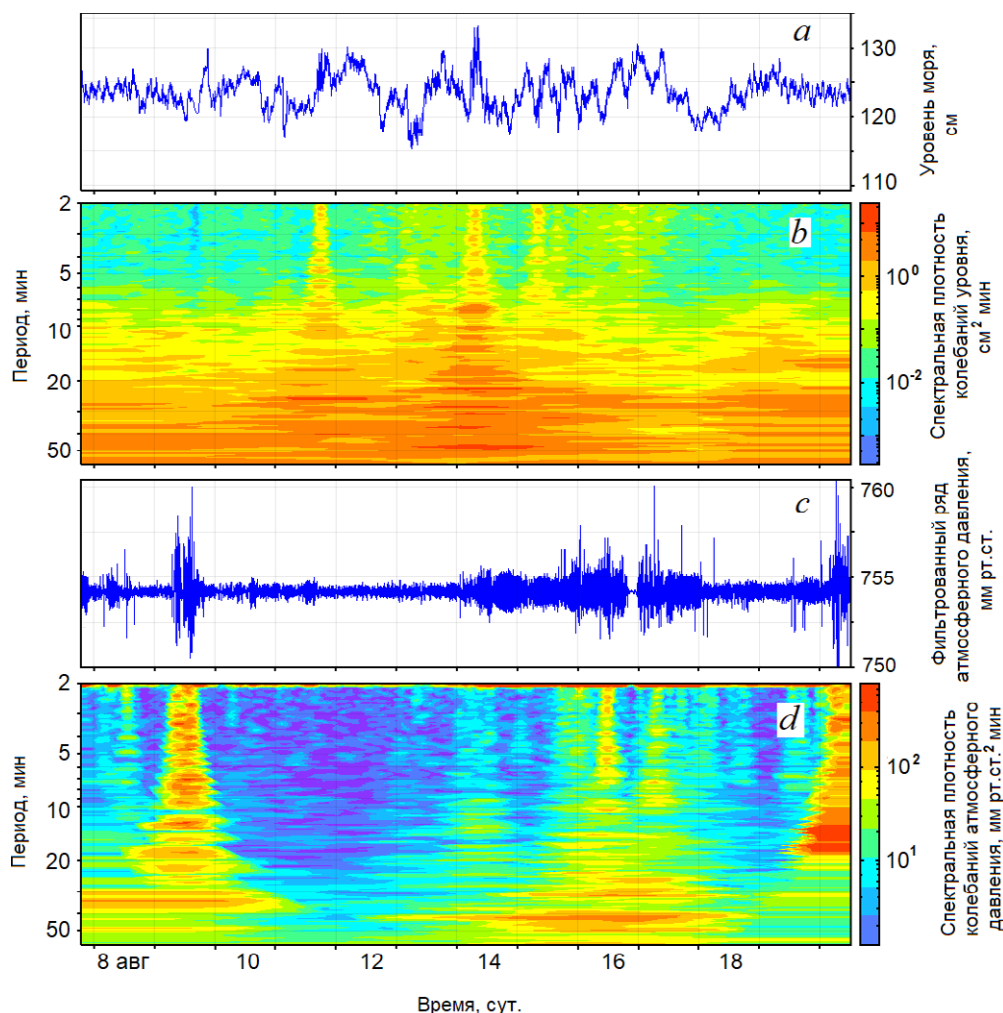


Рис. 5. Временной ряд колебаний уровня моря, из которого вычтен предвычисленный прилив (а), спектрограмма колебаний уровня моря (б) для ряда (а), фильтрованный ряд колебаний атмосферного давления (в) и его спектрограмма (г).

Fig. 5. Time series of sea level fluctuations with the precomputed tide removed (a); spectrogram of sea level fluctuations for the series (a), (б); filtered time series of atmospheric pressure fluctuations (в), and its spectrogram (г).

волны с периодами менее 1 ч и длинами менее 20 км, которые рассматриваются в данной работе, относятся к микромасштабным. Viana S. с соавторами [30] называют короткопериодные колебания приземного давления мелкомасштабными и отмечают, что они являются одной из наименее изученных особенностей пограничного слоя атмосферы. Эти возмущения могут быть обусловлены как быстрыми турбулентными движениями, так и распространением различных типов волн, включая внутренние гравитационные волны (ВГВ) и акустико-гравитационные волны (АГВ). Механизмы их генерации разнообразны и включают орографическое воздействие, фронтальные процессы, конвекцию, геострофическую корректировку и сдвиговую неустойчивость [30, 32].

Многочисленные исследования показывают существование АГВ и короткомасштабных ВГВ в минутном диапазоне периодов [33, 34]. Эти волны способны распространяться практически вертикально [33, 35, 36] и участвовать в формировании крупномасштабных возмущений верхней атмосферы [37, 38]. Ранее проведенные исследования показали, что основными источниками АГВ в нижней атмосфере являются метеорологические процессы, включая мезомасштабную конвекцию и орографические возмущения [39], тогда как к основным механизмам генерации ВГВ относят неустойчивость, обусловленную вертикальным сдвигом скорости, усиленную конвекцию, геострофическую адаптацию, фронтогенез и орографическое воздействие [40–44]. В интервале периодов от нескольких минут до нескольких часов основной вклад в формирование атмосферных волн вносят АГВ и ВГВ, которые могут распространяться от области генерации в зоны интенсивной диссипации [45, 46].

Результаты исследований различных авторов [39, 47–49] показывают, что спектр короткопериодных колебаний атмосферного давления в нижней атмосфере формируется под влиянием турбулентных процессов, атмосферных гравитационных волн и конвективной активности. В литературе рассматриваются

различные диапазоны периодов: на периодах короче 10 с проявляется режим турбулентного переноса со спектральным наклоном порядка -2 , тогда как в интервале 10^2 – 10^3 с спектр колебаний атмосферного давления существенно варьирует в зависимости от синоптической ситуации. В дневное время в нижней атмосфере наблюдаются вариации с характерными периодами порядка нескольких минут и 6–10 мин, которые обычно связываются с атмосферными и внутренними гравитационными волнами. В настоящей работе, с учетом минутной дискретности регистрации, рассматриваются колебания атмосферного давления в диапазоне периодов, превышающих несколько минут. Ширина спектра возмущений в диапазоне АГВ, инициируемых метеорологическими штормами, составляет от 10 до 60 мин, а амплитуды соответствующих гармоник устойчиво коррелируют с динамикой метеорологического возмущения.

С учетом приведенных теоретических и экспериментальных результатов были проанализированы колебания атмосферного давления по данным наших наблюдений в минутном диапазоне периодов. Для этого из временных рядов атмосферного давления предварительно удалялись возмущения за пределами исследуемого диапазона. Для фильтрации использовалась программа Кута, реализующая цифровую фильтрацию на основе быстрого преобразования Фурье по следующему алгоритму: прямое преобразование Фурье, подавление частот и амплитуд в заданном интервале и обратное преобразование Фурье. К данным атмосферного давления был применен высокочастотный цифровой фильтр с частотой отсечения $f = 1/3600 \text{ с}^{-1}$, удаляющий колебания с периодами более 1 ч. Аналогичный подход к высокочастотной фильтрации используется в работе [30].

На рис. 3 (график 1) представлены рассчитанная спектральная плотность колебаний атмосферного давления по данным, подвергнутым фильтрации (рис. 5 с), и соответствующая спектрограмма (рис. 5 d). На спектре отчетливо выделяются значимые пики с периодами

2–2.5, 4.5–6.75, 13.52, 16.92 и 28.20–53.26 мин, превышающие 95%-й доверительный интервал. При этом фоновые амплитуды колебаний давления составляют от 0.16 до 0.45 гПа.

В соответствии с приведенной выше классификацией диапазонов периодов колебаний атмосферного давления можно заключить, что полученные экспериментальные данные не содержат турбулентных пульсаций, поскольку дискретность регистрации и осреднение осуществлялись с интервалом 1 мин. Это не позволяет анализировать колебания на временах менее нескольких минут. Для диапазонов существования АГВ и ВГВ наблюдаемые пики в спектральных плотностях, превышающие 95%-й доверительный интервал, с периодами 2–2.5 мин могут быть обусловлены внутренними гравитационными волнами, тогда как колебания с периодами от 4.5 до 53 мин – акустико-гравитационными. При этом на спектрограмме (рис. 5 d) видно, что в периоды 9, 16 и 20 августа происходит заметное усиление энергии колебаний атмосферного давления, формирующее почти непрерывный спектр с отчетливо выраженной структурой. Эти эпизоды совпадают с периодами повышенной атмосферной неустойчивости и могут быть связаны с усилением генерации атмосферных гравитационных волн.

Следует отметить, что наклон линии спектральной плотности колебаний атмосферного давления в рассматриваемом диапазоне периодов близок к степени $-1/3$. Первоначально такое поведение спектра представляется необычным, поскольку в работах других авторов чаще приводятся спектры с наклоном порядка -2 . Однако, например, в статье [48] в диапазоне периодов от 6 мин до 1 ч показано существенное искривление спектральной кривой. Авторы данной работы называют этот участок спектра «коленом» (knee) и интерпретируют его как область поступления энергии в нижние слои атмосферы. Диапазон периодов колебаний атмосферного давления, анализируемый в нашей работе, практически полностью совпадает с диапазоном в данной области спектра. По-видимому, это и определяет полученный наклон спектральной плотности.

В заключение анализа колебаний атмосферного давления отметим, что в настоящей работе не ставилась задача детального исследования вариаций атмосферного давления и механизмов их формирования. Предлагаемая интерпретация основана на сопоставлении наблюдаемых спектральных максимумов с существующими теоретическими и экспериментальными представлениями о структуре высокочастотной части спектра атмосферных колебаний.

Заключение

На основе натурных наблюдений, выполненных на восточном шельфе о. Сахалин в районе Ныйского залива, установлены следующие особенности колебаний уровня моря и атмосферного давления.

В спектрах колебаний уровня моря выявлены выраженные пики на периодах, близких к суточным и полусуточным приливным гармоникам (24.71 и 12.34 ч). Эти максимумы соответствуют приливному колебаниям и согласуются с известными периодами гармоник M_1 и M_2 .

Пик спектральной плотности с периодом около 3.88 ч интерпретирован как проявление шельфовой сейши. Расчеты по формуле для сейш в приближении линейно наклонного дна показали возможность генерации сейш с периодом 3.93 ч, близким к наблюдаемому значению.

Показано, что часть спектральных максимумов с периодами 3.61, 6.89 и 9.09 ч может быть связана с колебаниями уровня акватории Ныйского залива. Расчет собственных периодов залива для различных характерных размеров дает значения, близкие к наблюдаемым максимумам (расхождение менее 7 %), что указывает на возможное влияние колебаний залива на формирование спектра уровня моря в районе наблюдений.

В минутном диапазоне периодов в спектрах колебаний уровня моря обнаружены максимумы с периодами 7.76, 10.36–11.78, 23.19 и

48.12 мин. Колебания с периодами 7.76 и 10.36 мин отнесены к инфрагравитационным волнам. Возможность генерации волн с более длинными периодами объясняется возбуждением краевых волн, формируемых инфрагравитационными волнами, что подтверждается расчетом по дисперсионному соотношению Урселла для плоского наклонного дна.

Анализ спектров колебаний атмосферного давления показал наличие значимых максимумов с периодами 2–2.5 мин, которые могут быть интерпретируемы как проявления ВГВ, и максимумов с периодами от 4.5 до 53 мин, возможно соответствующих АГВ. В штормовые периоды 9, 16 и 20 августа наблюдается интенсивная генерация атмосферных гравитационных волн, приводящая к формированию почти непрерывного спектра с выраженной модовой структурой.

Установлено, что наклон спектральной плотности колебаний атмосферного давления в рассматриваемом диапазоне периодов близок к степени $-1/3$, что отличается от значений порядка -2 , приводимых в ряде работ. Это объясняется тем, что анализируемый диапазон периодов соответствует области поступления энергии в нижние слои атмосферы, тогда как спектральный наклон со степенью -2 характерен для других областей спектра.

Полученные результаты могут быть использованы при оценке волновых условий в районах размещения морских платформ, при планировании инженерных работ на шельфе, а также для уточнения требований к эксплуатации морских и авиационных объектов в прибрежной зоне.

Список литературы

1. Parker B.B. *Tidal analysis and prediction*. Maryland: Silver spring, 2007, 378 p. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-191>
2. Kowalik Z., Polyakov I. Tides in the Sea of Okhotsk. *Journal of Physical Oceanography*. 1998, 28(7):1389–1409. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1998\)028<1389:TITSOO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1998)028<1389:TITSOO>2.0.CO;2)
3. Andreev A. Intra-seasonal variability of sea level on the southwestern Bering Sea shelf and its impact on the East Kamchatka and East Sakhalin currents. *Remote Sensing*. 2023,15(20):4984. <https://doi.org/10.3390/rs15204984>
4. Rouvinskaya E.A., Kurkina O.E., Kurkin A.A. Spatial distribution of amplitudes of internal tidal waves on the north-eastern shelf of Sakhalin. *Doklady Earth Sciences*. 2023,509(1):148–152. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22601778>
5. Kovalev D.P., Kovalev P.D., Borisov A.S., Kirillov K.V. Waves in the marine area near Cape Svobodny (south-eastern part of Sakhalin Island). *Geosystems of Transition Zones*. 2024,8(3):201–211. <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.3.201-211>
6. Рабинович А.Б. *Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение*. СПб.: Гидрометеиздат, 1993, 326 с.
7. Ohshima K.I., Wakatsuchi M., Fukamachi Y., Mizuta G. Near-surface circulation and tidal currents of the Okhotsk Sea observed with satellite-tracked drifters. *Journal of Geophysical Research*. 2002,107(C11):16-1-16-18. <https://doi.org/10.1029/2001JC001005>
8. Kurkin A.A., Kovalev D.P., Kurkina O.E., Kovalev P.D. Features of long waves in the area of cape Svobodny (south-eastern part of Sakhalin Island, Russia) during the passage of cyclones. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023,23(3):ES3003. <https://doi.org/10.2205/2023ES000852>
9. Kovalev D.P., Kurkin A.A., Kovalev P.D., Zarochintsev V.S. Investigation of tidal and subtidal variations in sea level close to the southeastern coast of Sakhalin Island using two-year time series. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024,24(3):ES3001. <https://doi.org/10.2205/2024ES000908>
10. Squire V.A., Kovalev D.P., Kovalev P.D. Aspects of surface wave propagation with and without sea ice on the south-eastern shelf of Sakhalin Island. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2021,251:107227. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107227>
11. Манилюк Ю.В., Лазоренко Д.И., Фомин В.В. Исследование сейшевых колебаний в смежных бухтах на примере Севастопольской и Карантинной бухт. *Морской гидрофизический журнал*. 2020,36(3):261–276. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-3-261-276>
12. Судольский А.С. *Динамические явления в водоемах*. Л.: Гидрометеиздат, 1991, 263 с.
13. Kovalev D.P., Kovalev P.D., Shevchenko G.V., Borisov A.S., et al. Study on harbor oscillation-like waves in an open port on the Sakhalin Island shelf. *Ocean Engineering*. 2025,334:121625. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121625>
14. Ковалев П.Д., Ковалев Д.П. *Техника исследования опасных морских явлений в прибрежной зоне океана*. Владивосток: Дальнаука, 2010, 152 с.

15. Tozer B., Sandwell D.T., Smith W.H.F., Olson C., Beale J.R., Wessel P. Global bathymetry and topography at 15 arc seconds: SRTM15+. *Earth and Space Science*. 2019,6(10):1847–1864. <https://doi.org/10.1029/2019EA000658>
16. Плеханов Ф.А., Ковалев Д.П. Программа комплексной обработки и анализа временных рядов данных уровня моря на основе авторских алгоритмов. *Геоинформатика*. 2016,1:44–53.
17. Ковалев Д.П. Программа для ЭВМ Кута: патент РФ RU 2018618773. № 2018612587; заявл. 20.03.2018; опубл. 19.07.2018.
18. Liu P.L.-F., Monserrat S., Marcos M., Rabinovich A.B. Coupling between two inlets: Observation and modeling. *Journal of Geophysical Research*. 2003,108(C3):3069. <https://doi.org/10.1029/2002JC001478>
19. Мурти Т.С. Сейсмические морские волны цунами: пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1981, 447 с.
20. Herbers T.H.C., Elgar S., Guza R.T. Generation and propagation of infragravity waves. *Journal of Geophysical Research*. 1995,100(C12):24863–24872. <https://doi.org/10.1029/95jc02680>
21. Holman R.A. Infragravity energy in the surf zone. *Journal of Geophysical Research*. 1981,86(C7):6442–6450. <https://doi.org/10.1029/jc086ic07p06442>
22. Lippmann T.C., Holman R.A., Bowen A.J. Generation of edge waves in shallow water. *Journal of Geophysical Research*. 1997,102(C4):8663–8679. <https://doi.org/10.1029/96jc03722>
23. Zeitlin V. *Resonant excitation of trapped coastal waves by free inertia-gravity waves*. Cambridge: INI, 2013, 36 p.
24. Ursell F. Edge waves on a sloping beach. *Proceedings of the Royal Society of London*. 1952,214(1116):79–97. URL: <https://www.jstor.org/stable/i206706>
25. Holman R.A., Bowen A.J. Longshore structure of infragravity wave motions. *Journal of Geophysical Research*. 1984,89(C4):6446–6452. <https://doi.org/10.1029/jc089ic04p06446>
26. Госсард Э., Хук У. *Волны в атмосфере*. М.: Мир, 1978. 532 с.
27. Nappo C.J. *An introduction to atmospheric gravity waves*. San Diego: Academic Press, 2002, 276 p. (International Geophysics; 102).
28. Stull R.B. *An introduction to boundary layer meteorology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1988, 666 p.
29. Bosart L.F., Cussen J.P. Gravity wave phenomena accompanying east coast cyclogenesis. *Monthly Weather Review*. 1973,101(5):446–454. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1973\)101<0446:GWPAEC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1973)101<0446:GWPAEC>2.3.CO;2)
30. Viana S., Yagüe C., Maqueda G., Morales G. Study of the surface pressure fluctuations generated by waves and turbulence in the nocturnal boundary layer during SABLES2006 field campaign. *Física de la Tierra*. 2007,19(19):55–71.
31. Fiedler F., Panofsky H.A. Atmospheric scales and spectral gaps. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1970,51:1114–1120. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1970\)051<1114:ASASG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1970)051<1114:ASASG>2.0.CO;2)
32. Ramis C., Monserrat S. Ondas gravitatorias troposféricas. Estudio de su estabilidad mediante modelos de capas. *Física de la Tierra*. 1991,3:245–282.
33. Григорьев Г.И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор). *Известия вузов. Радиофизика*. 1999,17(1):3–24. <https://doi.org/10.1007/BF02677636>
34. Blanc E., Farges T., Le Pichon A., Heinrich P. Ten year observations of gravity waves from thunderstorms in Western Africa. *Journal of Geophysical Research*. 2014,119(11):6409–6418. <https://doi.org/10.1002/2013JD020499>
35. Francis S.H. A theory of medium-scale travelling ionospheric disturbances. *Journal of Geophysical Research*. 1974,79(34):5245–5260. <https://doi.org/10.1029/JA079i034p05245>
36. Гершман Б.Н., Григорьев Г.И. Перемещающиеся ионосферные возмущения (обзор). *Известия вузов. Радиофизика*. 1968,11(1):5–27.
37. Куницын В.Е., Сураев С.Н., Ахмедов Р.Р. Моделирование распространения акустико-гравитационных волн в атмосфере для различных поверхностных источников. *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2007,2:59–63.
38. Vadas S.L., Fritts D.C. Thermospheric responses to gravity waves: Influences of increasing viscosity and thermal diffusivity. *Journal of Geophysical Research*. 2005,110:D15103. <https://doi.org/10.1029/2004JD005574>
39. Борчевкина О.П. *Лидарное и спутниковое зондирование возмущений тропосферы и ионосферы, создаваемых акустико-гравитационными волнами*: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, 2017. EDN: SMNPCD
40. Koch S.E., Golus R.E. A mesoscale gravity wave event observed during CCOPE. *Monthly Weather Review*. 1988,116(12):2527–2592.
41. Романова Н.Н., Якушкин И.Г. Внутренние гравитационные волны в нижней атмосфере и источники их генерации (обзор). *Известия АН РАН. Физика атмосферы и океана*. 1995,31(2):163–186.
42. Fritts D.C. Shear excitation of atmospheric gravity waves. Pt I. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1982,39(9):1936–1952.

43. Fritts D.C. Shear excitation of atmospheric gravity waves. Pt II. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1984,41(4):524–537.
44. Шакина Н.П. *Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере*. Л.: Гидрометеониздат, 1990, 308 с.
45. Vadas S.L. Horizontal and vertical propagation, and dissipation of gravity waves in the thermosphere from lower atmospheric and thermospheric sources. *Journal of Geophysical Research*. 2007,112:A06305. <https://doi.org/10.1029/2006JA011845>
46. Gavrilov N.M., Kshevetskii S.P. Dynamical and thermal effects of nonsteady nonlinear acoustic-gravity waves propagating from tropospheric sources to the upper atmosphere. *Advances in Space Research*. 2015,56(9):1833–1843. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.01.033>
47. Gossard E.E. Spectra of atmospheric scalars. *Journal of Geophysical Research*. 1960,65(10):3339–3351. <https://doi.org/10.1029/JZ065i010p03339>
48. Herron T.J., Tolstoy I., Kraft D.W. Atmospheric pressure background fluctuations in the mesoscale range. *Journal of Geophysical Research*. 1969,74(6):1321–1329. <https://doi.org/10.1029/JB074i006p01321>
49. Голицын Г.С. *Динамика природных явлений: климат, планетные атмосферы, конвекция*. М.: Физматлит, 2004, 344 с.
6. Rabinovich A.B. [Long ocean gravity waves: Trapping, resonance, and leaking]. Saint Petersburg: Hydrometeoizdat, 1993, 326 p. (In Russ.).
7. Ohshima K.I., Wakatsuchi M., Fukamachi Y., Mizuta G. Near-surface circulation and tidal currents of the Okhotsk Sea observed with satellite-tracked drifters. *Journal of Geophysical Research*. 2002,107(C11):3195. <https://doi.org/10.1029/2001JC001005>
8. Kurkin A.A., Kovalev D.P., Kurkina O.E., Kovalev P.D. Features of long waves in the area of Cape Svobodny (south-eastern part of Sakhalin Island, Russia) during the passage of cyclones. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023,23(3):ES3003. <https://doi.org/10.2205/2023ES000852>
9. Kovalev D.P., Kurkin A.A., Kovalev P.D., Zarochintsev V.S. Investigation of tidal and subtidal variations in sea level close to the southeastern coast of Sakhalin Island using two-year time series. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024,24(3):ES3001. <https://doi.org/10.2205/2024ES000908>
10. Squire V.A., Kovalev D.P., Kovalev P.D. Aspects of surface wave propagation with and without sea ice on the south-eastern shelf of Sakhalin Island. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2021,251:107227. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107227>
11. Manilyuk Yu.V., Lazorenko D.I., Fomin V.V. [Study of seiche oscillations in adjacent bays using Sevastopol and Karantinnaya bays as an example]. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal [Marine Hydrophysical Journal]*. 2020,36(3):261–276. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-3-261-276>. (In Russ.).
12. Sudol'skii A.S. [Dynamic phenomena in water bodies]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, 263 p. (In Russ.).
13. Kovalev D.P., Kovalev P.D., Shevchenko G.V., Borisov A.S., et al. Study on harbor oscillation-like waves in an open port on the Sakhalin Island shelf. *Ocean Engineering*. 2025,334:121625. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121625>
14. Kovalev P.D., Kovalev D.P. [Techniques for studying hazardous marine phenomena in the coastal zone of the ocean]. Vladivostok: Dal'nauka, 2010, 152 p. (In Russ.).
15. Tozer B., Sandwell D.T., Smith W.H.F., Olson C., Beale J.R., Wessel P. Global bathymetry and topography at 15 arc seconds: SRTM15+. *Earth and Space Science*. 2019,6(10):1847–1864. <https://doi.org/10.1029/2019EA000658>
16. Plekhanov F.A., Kovalev D.P. The complex program of processing and analysis of time-series data of sea level on the basis of author's algorithms. *Geoinformatika*. 2016,1:44–53. (In Russ.).

References

1. Parker B.B. *Tidal analysis and prediction*. Maryland: Silver spring, 2007, 378 p. <http://dx.doi.org/10.25607/0BP-191>
2. Kowalik Z., Polyakov I. Tides in the Sea of Okhotsk. *Journal of Physical Oceanography*. 1998,28:1389–1409. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1998\)028<1389:TI TSOO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1998)028<1389:TI TSOO>2.0.CO;2)
3. Andreev A. Intra-seasonal variability of sea level on the southwestern Bering Sea shelf and its impact on the East Kamchatka and East Sakhalin currents. *Remote Sensing*. 2023,15(20):4984. <https://doi.org/10.3390/rs15204984>
4. Rouvinskaya E.A., Kurkina O.E., Kurkin A.A. Spatial distribution of amplitudes of internal tidal waves on the north-eastern shelf of Sakhalin. *Doklady Earth Sciences*. 2023,509(1):148–152. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22601778>
5. Kovalev D.P., Kovalev P.D., Borisov A.S., Kirillov K.V. Waves in the marine area near Cape Svobodny (south-eastern part of Sakhalin Island). *Geosystems of Transition Zones*. 2024,8(3):201–211. <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.3.201-211>

17. Kovalev D.P. [*Kyma computer program*: Russian Federation patent RU 2018618773]. No. 2018612587; appl. 20.03.2018; publ. 19.07.2018. (In Russ.).
18. Liu P.L.-F., Monserrat S., Marcos M., Rabinovich A.B. Coupling between two inlets: Observation and modeling. *Journal of Geophysical Research*. 2003,108(C3):3069. <https://doi.org/10.1029/2002JC001478>
19. Murty T.S. [*Seismic sea waves: Tsunamis*]: Transl. from English. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981, 447 p. (In Russ.).
20. Herbers T.H.C., Elgar S., Guza R.T. Generation and propagation of infragravity waves. *Journal of Geophysical Research*. 1995,100(C12):24863–24872. <https://doi.org/10.1029/95jc02680>
21. Holman R.A. Infragravity energy in the surf zone. *Journal of Geophysical Research*. 1981,86(C7):6442–6450. <https://doi.org/10.1029/jc086ic07p06442>
22. Lippmann T.C., Holman R.A., Bowen A.J. Generation of edge waves in shallow water. *Journal of Geophysical Research*. 1997,102(C4):8663–8679. <https://doi.org/10.1029/96jc03722>
23. Zeitlin V. *Resonant excitation of trapped coastal waves by free inertia-gravity waves*. Cambridge: INI, 2013, 36 p.
24. Ursell F. Edge waves on a sloping beach. *Proceedings of the Royal Society of London*. 1952,214(1116):79–97. <https://www.jstor.org/stable/i206706>
25. Holman R.A., Bowen, A.J. Longshore structure of infragravity wave motions. *Journal of Geophysical Research*. 1984,89(C4):6446–6452. <https://doi.org/10.1029/jc089ic04p06446>
26. Gossard E., Hooke W. [*Waves in the atmosphere*]. Moscow: Mir, 1978, 532 p. (In Russ.).
27. Nappo C.J. *An introduction to atmospheric gravity waves*. San Diego: Academic Press, 2002, 276 p. (International Geophysics; 102).
28. Stull R.B. *An introduction to boundary layer meteorology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988, 666 p.
29. Bosart L.F., Cussen J.P. Gravity wave phenomena accompanying east coast cyclogenesis. *Monthly Weather Review*. 1973,101(5):446–454. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1973\)101<0446:GWPAEC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1973)101<0446:GWPAEC>2.3.CO;2)
30. Viana S., Yagüe C., Maqueda G., Morales G. Study of the surface pressure fluctuations generated by waves and turbulence in the nocturnal boundary layer during SABLES2006 field campaign. *Física de la Tierra*. 2007,19(19):55–71.
31. Fiedler F., Panofsky H.A. Atmospheric scales and spectral gaps. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1970,51:1114–1120. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1970\)051<1114:ASASG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1970)051<1114:ASASG>2.0.CO;2)
32. Ramis C., Monserrat S. Ondas gravitatorias troposféricas. Estudio de su estabilidad mediante modelos de capas. *Física de la Tierra*. 1991,3:245–282.
33. Grigor'ev G.I. Acoustic-gravity waves in the Earth atmosphere (review). *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Radiofizika / Radiophysics and Quantum Electronics*. 1999,42(1):1–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/BF02677636>
34. Blanc E., Farges T., Le Pichon A., Heinrich P. Ten year observations of gravity waves from thunderstorms in Western Africa. *Journal of Geophysical Research*. 2014,119(11):6409–6418. <https://doi.org/10.1002/2013JD020499>
35. Francis S.H. A theory of medium-scale travelling ionospheric disturbances. *Journal of Geophysical Research*. 1974,79(34):5245–5260. <https://doi.org/10.1029/JA079i034p05245>
36. Gershman B.N., Grigor'ev G.I. Traveling ionospheric disturbances – A review. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1968,11:1–13. <https://doi.org/10.1007/BF01033534>
37. Kunitsyn V.E., Suraev S.N., Akhmedov R.R. [Modeling of the propagation of acoustic-gravity waves in the atmosphere from various surface sources]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya = Moscow University Physics Bulletin*. 2007,2:59–63. (In Russ.).
38. Vadas S.L., Fritts D.C. Thermospheric responses to gravity waves: Influences of increasing viscosity and thermal diffusivity. *Journal of Geophysical Research*. 2005,110:D15103. doi:10/1029/2004JD005574
39. Borchevskina O.P. [*Lidar and satellite sounding of tropospheric and ionospheric disturbances generated by acoustic-gravity waves*]: thesis ... Cand. of Sci. (Phys.-Math.). Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 2017. (In Russ.).
40. Koch S.E., Golus R.E. A mesoscale gravity wave event observed during CCOPE. *Monthly Weather Review*. 1988,116(12):2527–2592.
41. Romanova N.N., Yakushkin I.G. [Internal gravity waves in the lower atmosphere and sources of their generation: a review]. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Fizika Atmosfery i Okeana*. 1995,31(2):163–186. (In Russ.).
42. Fritts D.C. Shear excitation of atmospheric gravity waves. Pt I. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1982,39(9):1936–1952.
43. Fritts D.C. Shear excitation of atmospheric gravity waves. Pt II. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1984,41(4):524–537.
44. Shakina N.P. [*Hydrodynamic instability in the atmosphere*]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990, 308 p. (In Russ.).

45. Vadas S.L. Horizontal and vertical propagation, and dissipation of gravity waves in the thermosphere from lower atmospheric and thermospheric sources. *Journal of Geophysical Research*. 2007,112:A06305. <https://doi.org/10.1029/2006ja011845>
46. Gavrilov N.M., Kshevetskii S.P. Dynamical and thermal effects of nonsteady nonlinear acoustic-gravity waves propagating from tropospheric sources to the upper atmosphere. *Advances in Space Research*. 2015,56(9):1833–1843. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.01.033>
47. Gossard E.E. Spectra of atmospheric scalars. *Journal of Geophysical Research*. 1960,65(10):3339–3351. <https://doi.org/10.1029/JZ065i010p03339>
48. Herron T.J., Tolstoy I., Kraft D.W. Atmospheric pressure background fluctuations in the mesoscale range. *Journal of Geophysical Research*. 1969,74(6):1321–1329. <https://doi.org/10.1029/JB074i006p01321>
49. Golitsyn G.S. [*Dynamics of natural phenomena: climate, planetary atmospheres, convection*]. Moscow: Fizmatlit, 2004, 344 p. (In Russ.).

Об авторах

Сотрудники лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия:

✉ **Ковалев Дмитрий Петрович**, доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории, d.kovalev@imgg.ru. <https://orcid.org/0000-0002-5184-2350>

Ковалев Петр Дмитриевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, p.kovalev@imgg.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7509-4107>

Борисов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, a.borisov@imgg.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9026-4258>

Зарочинцев Виталий Сергеевич, научный сотрудник, zarochintsev@imgg.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4015-9441>

About the Authors

Employees of the Laboratory of Wave Dynamics and Coastal Currents, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia:

✉ **Kovalev, Dmitry P.**, Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Laboratory, d.kovalev@imgg.ru. <https://orcid.org/0000-0002-5184-2350>

Kovalev, Peter D., Doctor of Engineering, Leading Researcher, p.kovalev@imgg.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7509-4107>

Borisov, Aleksander S., Cand. Sci (Engineering), Senior Researcher, a.borisov@imgg.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9026-4258>

Zarochintsev, Vitalij S., Researcher, zarochintsev@imgg.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4015-9441>

Поступила 12.02.2026

Принята к публикации 10.04.2026

Received 12 February 2026

Accepted 10 April 2026

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



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

УДК 550.34;(571.61/.64)

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.2.205-224>
<https://www.elibrary.ru/fkuysy>

Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2025 году

Д. А. Сафонов¹, Е. П. Семенова², Д. В. Костылев^{1,2}

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

² Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. Работа продолжает цикл ежегодных кратких обзоров сейсмичности южной части Дальнего Востока России, основанных на данных каталога регионального информационно-обрабатывающего центра «Южно-Сахалинск» Сахалинского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН». Приведены основные параметры сейсмичности изучаемой территории в 2025 г.: карты эпицентров землетрясений и их максимальных макросейсмических проявлений, статистическая оценка уровня сейсмичности СОУС'09, графики Бенюфа, карты плотности условной упругой деформации. 29 июля 2025 г. на стыке Курило-Охотского и Камчатского регионов произошло сильнейшее землетрясение, $M = 8.8$. Реализация форшоковой и афтершоковой активности в очаговой зоне этого землетрясения составила примерно половину всех сейсмических событий изучаемой территории. Приведена краткая информация по этому землетрясению, основанная преимущественно на данных Геофизической службы РАН. Дана краткая информация о других значимых и интересных для детального изучения землетрясениях юга Дальнего Востока. Уровень сейсмичности Курило-Охотского региона в 2025 г. оценивается как высокий, Сахалинского региона – фоновый средний, Приамурья и Приморья – фоновый пониженный.

Ключевые слова: землетрясения, сейсмическая активность, Приамурье, Приморье, Сахалин, Курило-Охотский регион

Seismicity of the south of the Russian Far East in 2025

Dmitry A. Safonov¹, Elena P. Semenova², Dmitry V. Kostylev^{1,2}

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

² Sakhalin Branch of the FRC “Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences”,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. This study continues a series of annual brief reviews on the seismic activity in the southern part of the Russian Far East, based on the data from the catalog of the “Yuzhno-Sakhalinsk” Regional Information Processing Center, part of the Sakhalin Branch of the Federal Research Center “Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences” (SB FRC GS RAS). The main seismic parameters for the study area in 2025 are presented: maps of earthquake epicenters and their maximum macroseismic effects, a statistical estimate of the seismic activity level using the SESL'09 scale, Benioff graphs, and density maps of nominal elastic deformation. On July 29, 2025, a strong earthquake with a magnitude of 8.8 occurred at the junction of the Kuril-Okhotsk and Kamchatka regions. Foreshock and aftershock activity in the focal zone of this earthquake accounted for approximately half of all seismic events in the study area. Brief information on this earthquake is provided, based primarily on the data from the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences. Brief information is also provided on other significant earthquakes in the southern Far East that are of interest for detailed study. The seismicity level of the Kuril-Okhotsk region in 2025 is estimated to be high; that of the Sakhalin region, average background; and that of the Amur region and Primorye, low background.

Keywords: earthquakes, seismic activity, Amur region, Primorye, Sakhalin, Kuril-Okhotsk region

Финансирование и благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного финансирования Министерства науки и высшего образования Российской Федерации с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Для цитирования: Сафонов Д.А., Семенова Е.П., Костылев Д.В. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2025 году. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 2, с. 205–224. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.2.205-224>; <https://www.elibrary.ru/fkuysy>

Funding and Acknowledgements

The study was carried out within the framework of state funding of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation using the data obtained from a unique research facility “Seismic infrasound array for monitoring Arctic cryolitozone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, neighbouring territories, and the world” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

For citation: Safonov D.A., Semenova E.P., Kostylev D.V. Seismicity of the south of the Russian Far East in 2025. *Geosystems of transition zones* = *Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 2, p. 205–224. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.2.205-224>; <https://www.elibrary.ru/fkuysy>

Введение

Статья продолжает серию ежегодных кратких обзоров [1, 2] сейсмичности территории юга Дальнего Востока России на основе оперативных данных Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН). Анализ сейсмичности изучаемой территории (границы показаны на рисунках далее) основан на информации об основных параметрах землетрясений регионов Курило-Охотского, Сахалинского, Приамурья и Приморья, полученных в оперативном режиме и занесенных в базу данных регионального информационно-обрабатывающего центра (РИОЦ) «Южно-Сахалинск», входящего в структуру СФ ФИЦ ЕГС РАН.

В 2025 г. в пределах изучаемого региона произошло крайне сильное и редкое сейсмическое событие – Камчатское землетрясение 29 июля, $M = 8.8$ [3]. Хотя эпицентр этого землетрясения расположен севернее границы рассматриваемого в обзоре Курило-Охотского региона, по крайней мере половина очаговой области и значительная часть афтершоков находятся в его границах (см. ниже). Детальный анализ этого землетрясения не входит в задачи данного обзора, однако сейсмичность указанного региона невозможно рассматривать иначе как в привязке к процессу подготовки и реали-

зации такого события, поэтому данному землетрясению в границах краткой информации уделено особое внимание.

Цель работы – оценить сейсмичность южной части Дальнего Востока РФ за истекший календарный год по предварительным данным, полученным в оперативном режиме. Помимо краткой характеристики Камчатского землетрясения и его афтершоков, в статье рассмотрены другие сильные по магнитуде и макросейсмическому эффекту землетрясения, детальные данные по которым станут доступны после окончательной обработки в течение 2026 г.

Обзор сейсмичности выполнен с использованием основных характеристик: статистической оценки уровня сейсмичности СОУС’09 и графиков Беньофа. Для демонстрации пространственного распределения сейсмичности приведены карты эпицентров и плотности условной упругой деформации.

Исходные данные

К концу 2025 г. в сети сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН (международный код сети – SAGSR*) официально числились 34 сейсмические и 3 инженерно-сейсмометрические станции. С двух пунктов наблюдений – «Малокурильское» (SHO) и «Экимчан»

* Sakhalin Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences. Sakhalin Regional Seismic Network of the Russian Federation, 2000. *International Federation of Digital Seismograph Networks*. <https://doi.org/10.7914/2w5r-ea46>

(ЕКМР) по техническим причинам данные в течение года не поступали. Таким образом, число действующих сейсмических станций в 2025 г. сократилось до 32.

В 2025 г. в рамках программы по оптимизации размещения и использования сейсмических станций на юге о-ва Сахалин был осуществлен перевод автономных сейсмических станций локальной сети «Мальково» (MLKV) и «Быков» (BKV) в общую систему сбора данных филиала в режиме работы с передачей данных в реальном времени. Три станции локальной сети – «Ожидаево» (OJD), «Холмск» (HLMS) и «Стародубское» (STRD) были закрыты. Две станции: «Корсаков» (KSKV) и Лесное (LSNR) – продолжили работу в отложенном режиме. Данные этих станций используются в рамках групповой обработки землетрясений Сахалинского региона. Составление отдельного каталога Южного Сахалина на основе записей локальной сети сейсмостанций было прекращено.

Работа станции сильных движений «Долинск» (DOL) прекращена в связи с разрушением сейсмокамеры. Оборудование будет установлено в 2026 г. на пункте наблюдений «Быков» (BKV) в режиме передачи данных, близком к реальному времени.

В целом, перераспределение оборудования, включение еще двух пунктов наблюдений на юге о. Сахалин в систему передачи данных в режиме реального времени и привлечение данных сейсмических станций иных организаций позволяет поддерживать регистрационные возможности сети на прежнем уровне с представительной магнитуды $M_{\min} = 4.0$ [4]. Вблизи Южных и Северных Курильских островов, на территории Сахалинского региона, юга Приморского края, а также в зоне Зейского водохранилищного района благодаря более плотной сети сейсмостанций порог уверенной регистрации составляет $M_{\min} = 3.0$. Карта регистрационных возможностей сети сейсмостанций, опубликованная в статье прошлого года [5], хорошо отражает положение на 2025 г.

Материалы представленной статьи по-прежнему опираются на результаты оперативной обработки землетрясений, проводимой в течение прошедшего года и собираемой в базе

данных РИОЦ «Южно-Сахалинск». В отличие от предыдущих публикаций авторов [1, 2], в настоящей работе опробован новый подход к систематизации землетрясений по энергетическим характеристикам, а также к оценке величины сейсмической энергии, предложенный в работах [5, 6]. Вкратце изложим этот подход здесь.

Наиболее массовой энергетической характеристикой землетрясений каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» в 2025 г. остается региональная магнитуда M_L [7], основанная на магнитуде Ч.Ф. Рихтера для Калифорнии [8] и определяемая путем эмуляции записей региональных цифровых сейсмических станций к прибору Вуда–Андерсена. В то же время для коровых землетрясений Приамурья и Приморья, а также Сахалинского региона оценка величины слабых и умеренно-сильных землетрясений (с учетом масштаба) проводится с использованием энергетического класса Т.Г. Раутиан K_p [9]. Однако у этих энергетических шкал есть ограничение по допустимой величине событий. Для землетрясений с $M > 6.0$ использование M_L и K_p приводит к недооценке величины землетрясений. Для наиболее сильных региональных событий определяется сейсмический момент и моментная магнитуда $M_{w_{\text{рег}}}$ [10, 11], которая не имеет верхней границы применимости. Помимо этого, каталог РИОЦ «Южно-Сахалинск» содержит определения еще нескольких энергетических оценок землетрясений, в том числе энергетического класса О.Н. и С.Л. Соловьевых K_C [12], магнитуды по поверхностным волнам M_S .

Для коровых землетрясений Приамурья и Приморья, Сахалинского региона энергия E (Дж) слабых и умеренно сильных землетрясений каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» с $M \leq 6.2$ ($K_p \leq 14$) оценивалась по формуле [9]:

$$\lg E = K_p \quad (1)$$

При этом использовались непосредственные определения K_p из каталога, а в случае их отсутствия проводился пересчет из M_L .

Расчетная магнитуда M , используемая для построения карт эпицентров коровых землетрясений Приамурья и Приморья и

Сахалинского региона, восстанавливалась из K_p с использованием следующих формул. Для коровых землетрясений Сахалинского региона [5]

$$M = M_L = 0.68K_p - 3.27;$$

для коровых событий Приамурья и Приморья по новой формуле, специально полученной для настоящей работы на основе 192 землетрясений из каталогов этого региона за 2023–2025 гг.:

$$M = M_L = 0.63K_p - 2.12.$$

Для землетрясений Курило-Охотского региона, а также глубокофокусных событий под территорией Сахалина и Приморья энергия слабых и умеренно-сильных землетрясений с $M \leq 6.2$ оценивалась по формуле из работы [6] путем перехода к энергии через класс С.А. Федотова K_s :

$$\lg E = K_s = 3.1 + 1.8M_L. \quad (2)$$

В случае отсутствия непосредственных определений M_L для нескольких неглубоких ($h < 70$ км) землетрясений проведена ее оценка по следующим формулам [5, 6]:

$$M = M_L = 0.63K_c - 1.79; \quad (3)$$

$$M = M_L = (MS + 2.79) / 1.43. \quad (4)$$

Для глубоких ($h > 70$ км) событий пропусков в определении M_L в каталоге в 2025 г. не отмечено.

Для событий с $M \geq 6.3$ энергетическая оценка событий проводилась на основе $M_{w_{\text{рег}}}$, однако величина энергии, как и в предыдущие годы, рассчитывалась с использованием формулы Гутенберга–Рихтера для MS [13]:

$$\lg E = 4.8 + 1.5 MS. \quad (5)$$

Переход от M_w к MS проведен по формуле, рассчитанной для сильных ($MS \geq 6.3$) Курило-Охотских землетрясений [14]:

$$M = MS = 0.96 M_w + 0.37,$$

которая, впрочем, в случае событий магнитудой около 6.3 дает близкие значения $MS \approx M_w$.

В таком подходе есть заметный недостаток, указанный ранее [6]: при расчете энергии не удалось добиться плавного перехода от одной формулы к другой. Так, при $M = 6.3$ расчет энергии по формуле (2) дает результат на 30 % больше, чем по формуле (5). Однако с учетом того, что величина $M_L > 6.0$ обычно в среднем недооценивается по причине насыщения магнитудной шкалы, завышение сейсмической энергии по формуле (2) должно это компенсировать. Кроме того, с учетом логарифмического характера магнитудных шкал, погрешность энергии в 30 % примерно соответствует ее разбросу за счет точности самих магнитудных оценок.

В целом, с соблюдением изложенных выше правил, при расчете магнитуды и энергии сильных событий ($M > 6.0$) применялся индивидуальный подход к каждому землетрясению с сопоставлением оценок на основе различных магнитудных шкал, применяемых как в СФ ФИЦ ЕГС РАН, так и в других сейсмологических агентствах. Столь сильных землетрясений обычно в течение года происходит немного, но каждое из них существенно влияет на оценку сейсмичности.

Для сравнения новых данных с каталогами землетрясений прежних лет необходимо привести все каталоги к изложенной методике расчета энергии. Каталоги 2023–2024 гг. унифицировались по тем же принципам, что и 2025 г., поскольку взяты из базы данных РИОЦ «Южно-Сахалинск». Помимо этого, как и в предыдущих обзорах, были использованы опубликованные региональные каталоги [15–18]: Приамурья и Приморья за 1975–2022 гг., Сахалинского региона 1962–2022, Курило-Охотского региона 1920–2022 гг.

Для Курило-Охотского региона пересчет сейсмической энергии более ранних каталогов не является принципиальным, поскольку подавляющее влияние на суммарную сейсмическую энергию ΣE оказывают сильные землетрясения, а метод оценки их сейсмической энергии почти не изменился. Для коровых землетрясений Приамурья и Приморья сейсмическую энергию землетрясений удалось

пересчитать, т.к. каталоги этого региона на всем временном интервале содержат данные по классу Раутиан K_p .

Более сложным оказалось согласование методик расчета сейсмической энергии каталогов коровых землетрясений Сахалинского региона, т.к. до 2023 г. K_p здесь определялся крайне нерегулярно. Основной энергетической характеристикой коровых землетрясений сахалинских каталогов до 2023 г. являлась магнитуда по поверхностной волне MLH , в которую пересчитывались K_p и энергетический класс Соловьева K_C . Далее с использованием MLH и формулы Гутенберга–Рихтера (5) оценивалась сейсмическая энергия. В случае отсутствия непосредственных оценок энергетический класс Раутиан K_p в сахалинском каталоге для событий с $M < 6.3$ можно получить пересчетом через K_C по формуле [5]:

$$K_p = (K_C + 2.07)/1.05, \quad (6)$$

в случае отсутствия K_C – через MLH и формулу Т.Г. Раутиан [9], которая использовалась для расчетов ранее [18]:

$$K_p = 1.8MLH + 4. \quad (7)$$

На рис. 1 а сопоставлены расчетные значения класса Раутиан K_p , полученные пересчетом из K_C и MLH , с оценками K_p , определенными напрямую. Используются опубликованные данные каталогов «Землетрясений Северной Евразии» [18]. Несмотря на то что формула (6) получена по данным оперативного каталога РИОЦ, она позволяет довольно неплохо восстановить K_p . Формула (7), опубликованная в 1964 г., получена для Средней Азии и для другой магнитудной шкалы, тем не менее и она, хоть и с большим разбросом, позволяет в среднем оценить значения K_p .

Наиболее проблемным оказалось сопоставление энергетических оценок глубокофокусных ($h > 200$ км) землетрясений как Сахалина, так и Приморья. M_L здесь определяется тоже относительно недавно, а сильные события происходят не каждый год, поэтому получить надежные переходные формулы пока не удалось. В основном все события, происходя-

щие здесь, ранее сводились к MLH по соответствующим формулам [18, 19]. В случае магнитудных шкал по объемным волнам MPV и MSH по записям средне-длиннопериодной аппаратуры СКД этим формулам можно доверять, однако такие магнитуды определяются редко, для наиболее сильных землетрясений. Для шкал на основе тех же волн и короткопериодной аппаратуры СКМ – $MPVA$ и $MSHA$ – при переходе к MLH использовались переходные соотношения для «старших» шкал MPV и MSH [19], что неоправданно. К тому же сами шкалы $MPVA$ [20] и особенно $MSHA$ дают энергетическую оценку землетрясений с огромным разбросом значений на разных станциях, что приводит к довольно низкой точности. Также установлено [5, 21], что значения $MPVA$ сильно зависят от глубины землетрясений, это также не учитывалось при пересчете. В совокупности с использованием неточных переходных формул разброс расчетных магнитуд для тех землетрясений, где нет других шкал, кроме $MPVA$ и особенно $MSHA$, считавшейся приоритетной перед $MPVA$, просто огромен. В основном это касается слабых событий, но в мантии под территорией Сахалина и Приморья в течение года других может и не быть, как, например, в 2025 г. На рис. 1 б для примера показан пересчет в M_L значений каталога глубоких землетрясений Сахалинского региона 2018–2022 гг. с использованием трех подходов: через обобщенную магнитуду M_p (MLH) для Курило-Охотского региона [22]; по магнитудным формулам для $MPSP$ по каталогу России (аналог $MPVA$, используемый в каталогах центрального офиса ФИЦ ЕГС РАН) [21]; по формуле для $MPVA$ Сахалинского региона на основе каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» [5]. Общее для всех трех подходов – огромный разброс расчетных значений относительно непосредственно определяемых, что является следствием сомнительных магнитудных оценок каталога.

По этой причине в обзоре сейсмичности 2025 г. не будет сравнения суммарной сейсмической энергии глубоких землетрясений Сахалинского региона, как и Приморья, с ее оценками за предыдущие годы. Данные сведения изложены, чтобы обозначить проблему, которую в дальнейшем предстоит решить.

Принятый к рассмотрению оперативный каталог землетрясений на основе базы данных РИОЦ «Южно-Сахалинск» ограничен снизу по магнитуде $M_L = 2.2$. Из рабочего каталога исключены все сейсмические события, полученные по данным менее трех сейсмических станций, а также отнесенные к взрывам.

Общее количество землетрясений полученного каталога составило 5144 (рис. 2), включая 4890 землетрясений Курило-Охотского региона, 146 – Сахалинского региона (125 коровых и 21 глубокофокусное), 108 – региона Приамурье и Приморье (101 коровое и 7 глубокофокусных). Помимо этого, на рис. 2 дополнительно показаны землетрясения из базы данных РИОЦ «Южно-Сахалинск» с эпицентрами у побережья Камчатки за границей Курило-Охотского региона, что необходимо для описания очаговой области Камчатского землетрясения. В статистике они не учитываются.

194 землетрясения с эпицентрами в пределах зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН имели ощутимые проявления на территории регионов, согласно опросам оперативных дежурных сейсмостанций. Кроме того, на этой территории ощущалось 31 землетрясение с эпицентрами вне указанных границ. Две трети

ощутимых событий (147) относятся к очаговой области Камчатского землетрясения. Положение ощутимых событий и их максимальная зарегистрированная ощутимость показаны на рис. 3.

Камчатское землетрясение 29 июля 2025 г. 23:36 UTC, $M = 8.8$

Это одно из крупнейших сейсмических событий XXI в., по магнитуде входит в десятку среди всех инструментально зарегистрированных землетрясений [23]. Оно вызвало огромный интерес в российском и мировом научном сообществе. К моменту написания обзора доступны некоторые публикации, посвященные этому событию, например [3, 23, 24], хотя основной массив научных статей, вероятно, еще ожидает печати. Приведем краткую информацию о землетрясении, основываясь преимущественно на данных ФИЦ ЕГС РАН.

Основное событие предварялось серией сильных (до $M = 7.6$) землетрясений севернее очаговой зоны, которые многие исследователи считают форшоками.

Основной подземный толчок был зафиксирован 30 июля в 11:24 по местному камчатскому времени. Очаг располагался в акватории

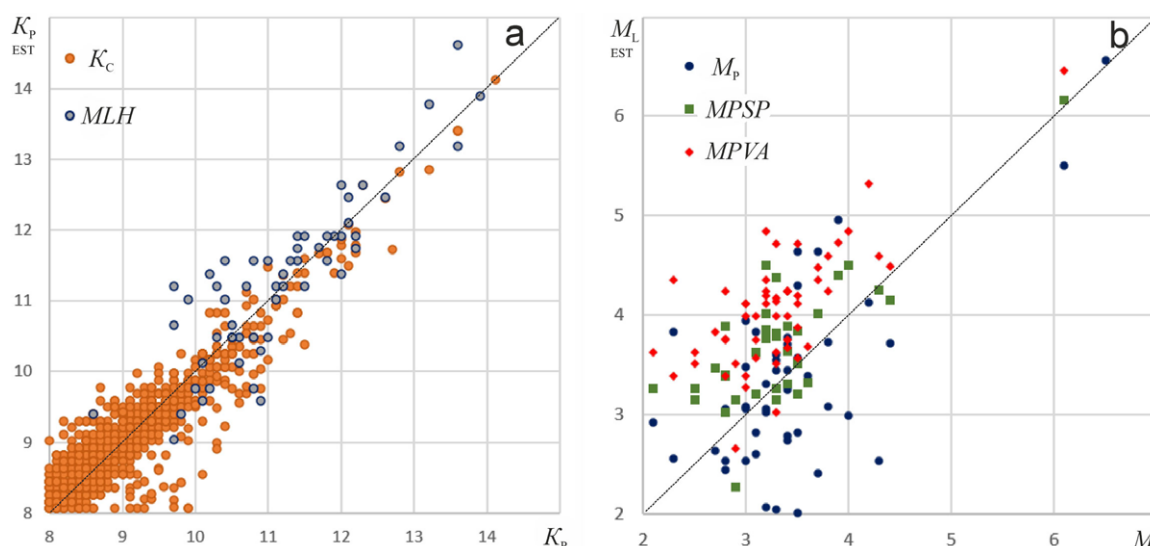


Рис. 1. Сопоставление прямых значений энергетического класса K_r коровых (а) и магнитуды M_L глубоких (б) землетрясений Сахалинского региона с пересчитанными, полученными на основе других энергетических шкал (пояснения в тексте). Пунктиром показана линия равных значений 1:1.

Fig. 1. Comparison of the direct values of the energy class K_r for crustal earthquakes (a) and the M_L magnitude for deep earthquakes (b) in the Sakhalin region with converted values based on other energy scales (explanations are provided in the text). The dotted line indicates the 1:1 equivalence line.

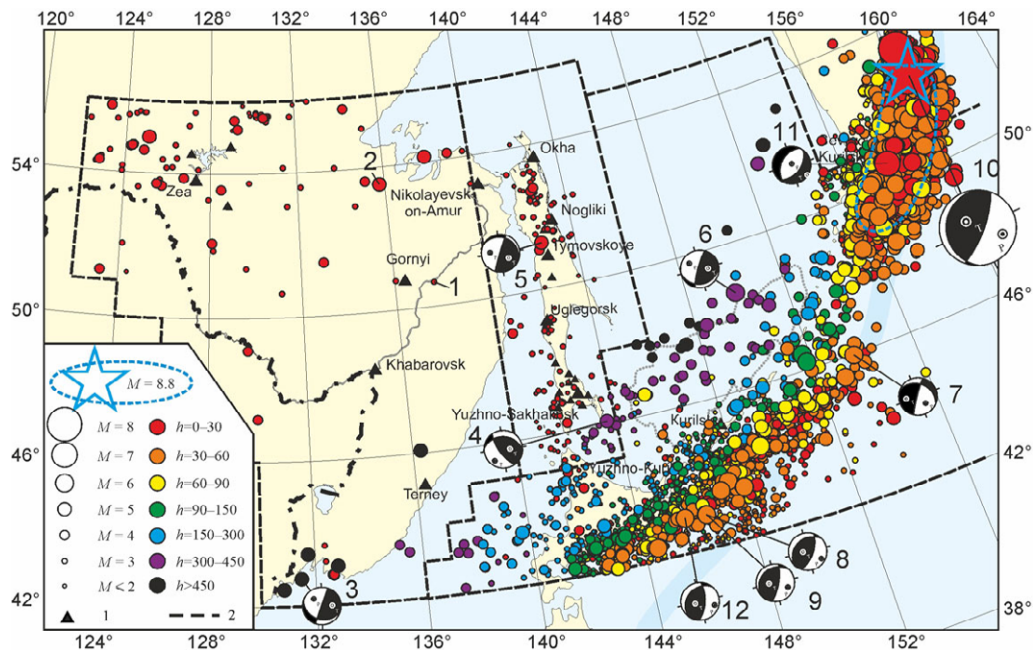


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2025 г. M – магнитуда; h – глубина гипоцентра, км; 1 – сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН, действующие в 2025 г.; 2 – границы регионов. Номера эпицентров землетрясений согласно таблице. Приведены механизмы очагов наиболее сильных землетрясений. Очаговая зона Камчатского землетрясения 29 июля 2025 г. показана синим пунктиром.

Fig. 2. Map of earthquake epicenters in the Sakhalin Branch of the Federal Research Center “Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences” (SB FRC GS RAS) area of responsibility in 2025. M , magnitude; h , hypocenter depth, km; 1, seismic stations of the SB FRC GS RAS operating in 2025; 2, region borders. Numbers of earthquake epicenters are given in accordance with Table. Focal mechanisms of the strongest earthquakes are provided. Focal zone of 29.07.2025 Kamchatka earthquake is marked with blue dashed line.

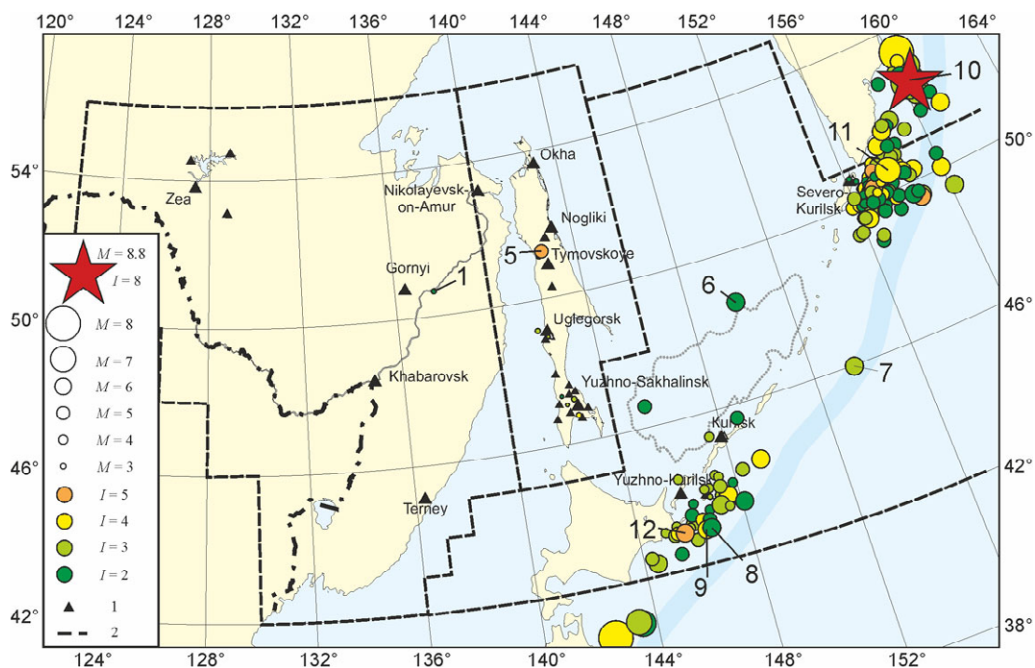


Рис. 3. Карта эпицентров ощутимых землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2025 г. M – магнитуда; I – максимальная интенсивность сотрясений по данным СФ, балл. Остальные условные обозначения см. к рис. 2.

Fig. 3. Map of epicenters of felt earthquakes in the SB FRC GS RAS area of responsibility in 2025. M , magnitude; I , maximum shaking intensity according to the Sakhalin Branch data, point. For other symbols see Fig. 2.

Тихого океана к юго-востоку от Петропавловска-Камчатского вдоль Курило-Камчатского желоба. Сейчас различные мировые и российские сейсмологические центры оценивают магнитуду этого события в диапазоне $M_w = 8.7-8.8$, хотя первые энергетические оценки были несколько ниже. Так, оперативными дежурными сейсмостанции Южно-Сахалинск предварительно получена $MS = 7.9$, впоследствии пересмотренная до $MS = 8.3$. С учетом насыщения шкалы магнитуд по поверхностным волнам последняя оценка адекватна, однако и ее раннего меньшего значения оказалось достаточно для оперативного реагирования на цунамигенное событие.

Положение эпицентра события к востоку от Петропавловска-Камчатского адекватно оценено оперативными службами ФИЦ ЕГС РАН, а также другими агентствами. Судя по положению эпицентра (№ 10 на рис. 1), мы имеем дело с классическим случаем одностороннего вспарывания. Процесс начался в северо-восточной части очага, на траверсе Авачинского залива, и распространился в юго-западном направлении, к о. Парамушир. Очаг имеет типичный субдукционный взбросовый механизм [23] (рис. 2). Длина очаговой зоны, судя по конфигурации облака крупнейших афтершоков, составила не менее 400 км. Максимальные смещения вдоль сейсморазрыва и, как следствие, области максимальной генерации сейсмической энергии смещены к юго-западной части очаговой зоны [23, 25], это объясняет макросейсмический эффект и максимумы волны цунами.

Макросейсмический эффект проявился на значительной части территории Дальнего Востока России. В Петропавловске-Камчатском, Вилучинске и Елизове интенсивность сотрясений достигала 6–7 баллов по шкале MSK-64. Наибольшая интенсивность сотрясений зарегистрирована в Северо-Курильске – 7–8 баллов. В этих населенных пунктах было зафиксировано множество повреждений зданий: трещины в стенах, осыпание штукатурки, элементов декора. Отмечалось падение крупной мебели, заклинивание входных дверей, сквозные трещины в межкомнатных перегородках, повреждение трубопроводов, растрескивание асфальтового покрытия. Зафиксированы трав-

мы у нескольких человек, однако человеческих жертв в российских регионах удалось избежать.

Была объявлена тревога цунами для побережья Камчатки и Курильских островов. Волны цунами регистрировались по всему восточному и на южной части западного побережья п-ова Камчатка, здесь высота волн могла достигать 2 м, высота вертикального заплеска – 16–18 м. Максимальная высота цунами зафиксирована в Северо-Курильске – визуально до 7 м., затоплен порт, в порту сильно пострадал рыбообрабатывающий завод. Тревогу цунами объявили почти вдоль всего побережья северной части Тихого океана, однако высота волны оказалась относительно небольшой: так, в Японии она не превысила 1 м.

Событие повлекло за собой мощнейший афтершоковый процесс. В первые месяцы после главного толчка Камчатским филиалом ФИЦ ЕГС РАН было зарегистрировано несколько десятков тысяч афтершоков [3]. По данным РИОЦ «Южно-Сахалинск» Сахалинского филиала, до конца 2025 г. в очаговой зоне Камчатского землетрясения произошло 18 сильных ($M \geq 6.0$) афтершоков.

Можно отметить неравномерное распределение афтершоков вдоль очаговой зоны. Так, большее количество сильных афтершоков произошло в юго-западной ее части. В то же время два наиболее сильных афтершока – 13 сентября в 02:37 UTC, $M_w = 7.3$ и 18 сентября в 18:58 UTC, $M_w = 7.9$ – произошли в северо-восточной, «молчавшей» до тех пор части очаговой зоны.

Можно также отметить разницу в механизмах очагов афтершоков. Так, в отличие от классического взброса главного события и его двух крупнейших афтершоков на севере, самое сильное событие юго-западной части афтершокового облака, произошедшее 3 августа в 05:37 UTC, $M_w = 6.6$, имело классический сбросовый механизм очага (№ 11 на рис. 2), как и многие более слабые афтершоки. По всей видимости, межплитовая подвижка привела к перераспределению упругой энергии внутри Тихоокеанской плиты, что стало причиной многочисленных землетрясений в верхней ее части, находящейся в районе глубоководного желоба в условиях растяжения. Многие афтершоки,

в т.ч. не самые сильные, также вызывали значительный макросейсмический эффект, более зависящий от близости к населенным пунктам, чем от магнитуды (рис. 3). Так, сильный афтершок 18 сентября с $M_w = 7.9$ ощущался в Петропавловске-Камчатском с интенсивностью в 6 баллов, что сопоставимо с главным событием.

СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2024 г. разработал комплекс оценки сейсмических воздействий на строительные объекты на основе инженерно-сейсмометрических станций (ИСС), которые были установлены на зданиях городской застройки на о. Шикотан (с. Малокурильское и с. Крабозаводское) и о. Парамушир (г. Северо-Курильск) [26]. Работа станции инженерно-сейсмометрического мониторинга в г. Северо-Курильск позволила получить крайне важные инструментальные данные о сейсмическом воздействии этого землетрясения и его афтершоков. Так, по акселерограммам ИСС получены данные о пиковых ускорениях (PGA)

несущих конструкций объекта мониторинга, дающих возможность оценить инструментальную макросейсмическую интенсивность сотрясений. Уравнение, связывающее инструментальную интенсивность в баллах с таким параметром движения грунта, как ускорение, по [27] имеет вид:

$$I = 2.5 \lg PGA + 1.89, \quad (8)$$

где I – инструментальная интенсивность сотрясений; PGA – пиковое ускорение грунта.

Всего за период с 29 июля по 31 декабря 2025 г. 60 событий имели воздействие на объект мониторинга с силой, согласно уравнению (8) равной или выше 5 баллов (рис. 4). Из них восемь сейсмических событий имели расчетную силу воздействия $I \geq 7.0$. Для этих событий на рис. 4 приведена дополнительная информация о времени, магнитуде и инструментальной интенсивности на объекте мониторинга.

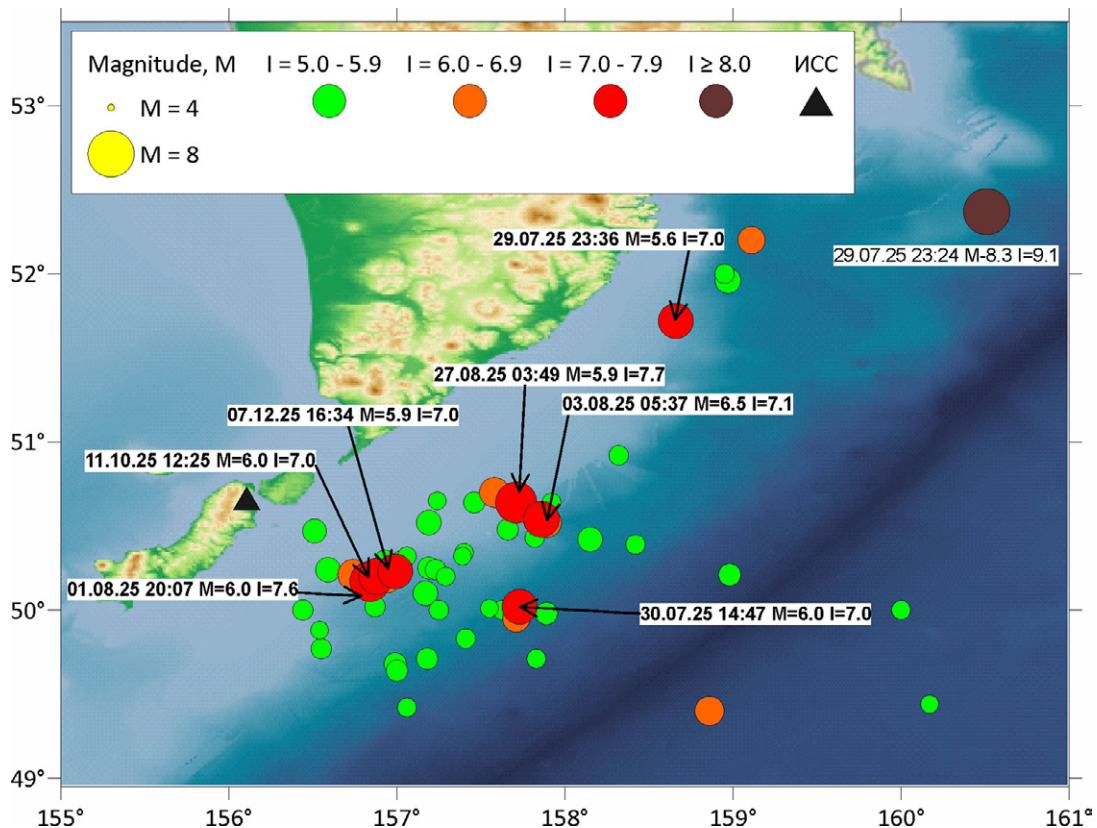


Рис. 4. Землетрясение 29 июля 2025, $M = 8.8$ и его афтершоки с инструментальной интенсивностью выше 5 баллов по данным инженерно-сейсмометрических станций в г. Северо-Курильск.

Fig. 4. The earthquake on July 29, 2025, $M = 8.8$ and its aftershocks, with instrumental intensity over 5 points, according to the data from engineering seismological stations in Severo-Kurilsk.

Как видно из рис. 4, основное количество ощутимых землетрясений сосредоточено в непосредственной близости от о. Парамушир в диапазоне 156° – 158° в. д., где землетрясения с $M \geq 5.5$ вызывают 7-балльные сотрясения. Анализ записей акселерограмм 60 землетрясений, приведенных на рисунке, показал, что все они имели основное воздействие на объект мониторинга в горизонтальной плоскости.

Полученные данные крайне важны для уточнения оценок воздействия землетрясений на инженерные объекты. Землетрясение 29 июля, а также его афтершоки позволили существенно пополнить объем накопленной информации.

С научной точки зрения землетрясение 2025 г. уникально также тем, что его очаг практически полностью перекрыл очаговую зону события 1952 г., $M = 9.0$, предоставив ученым бесценный материал для изучения циклов накопления и сброса тектонических напряжений в зонах субдукции.

Обзор других землетрясений 2025 года

В *Приамурье и Приморье* в 2025 г. зарегистрировано 101 коровое землетрясение с $K_p \geq 7.0$ ($M \geq 2.2$). Большая часть этих событий сосредоточена в северной части региона и относится к рассеянной слабой сейсмичности зон Становой и Монголо-Охотской разломных систем. Несколько слабых сейсмических событий было зарегистрировано на юге Приморья, хотя нельзя исключать, что они имеют техногенный характер. Семь глубокофокусных землетрясений в диапазоне глубин $h = 378$ – 587 км с эпицентрами на территории Приморья относятся к глубокой части погруженной в мантию Тихоокеанской плиты.

Единственное землетрясение в регионе в 2025 г., при котором зарегистрирован макросейсмический эффект, произошло 14 апреля в 11:32 UTC ($K_p = 8.6$, $M_L = 3.3$, $h = 4$ км; № 1) (здесь и далее номер события приводится в соответствии с приведенной ниже таблицей и картами на рисунках 2, 3). По информации, собранной сотрудниками сейсмостанции «Горный», в Комсомольске-на-Амуре ощутили сла-

бый толчок, похожий на далекий подземный взрыв, интенсивность сотрясений оценена в 2 балла.

Наиболее сильное по магнитуде коровое событие ($K_p = 11.2$, $M_L = 4.8$, $h = 27$ км; № 2) произошло 1 мая в 10:21 UTC, сведений о его ощутимых проявлениях не отмечено. Наиболее сильное из глубокофокусных ($M_L = 5.5$, $h = 552$ км; № 3) – 25 октября в 11:45 UTC, оно также не ощущалось. Был получен механизм очага, согласно которому произошла взрезывающая сейсмодислокация с вертикальной плоскостью юго-юго-западного простирания и субгоризонтальной – восток-юго-восточного.

В *Сахалинском регионе* в 2025 г. отмечено 125 землетрясений с гипоцентрами в земной коре. Большая их часть рассеяна в зонах наиболее активных островных разломных систем – Западно-Сахалинской на юге и в средней части острова, вблизи Верхне-Пильтунского разлома, на севере; отмечается также слабая сейсмичность в Татарском проливе и на восточном шельфе острова.

Мантийных событий в пределах погруженной Тихоокеанской плиты с эпицентрами на территории региона зарегистрировано 21, в диапазоне глубин $h = 251$ – 407 км. Среди этих событий наиболее сильное произошло 9 мая в 06:15 UTC ($M_L = 4.8$, $h = 352$ км; № 4), эпицентр расположен у южной оконечности Тонино-Анивского п-ова, механизм очага взбросо-сдвигового типа.

Наиболее сильное региональное событие года зарегистрировано 6 ноября в 10:53 UTC ($K_p = 12.8$, $M_L = 5.0$, $h = 6$ км; № 5). Эпицентр события расположен севернее пгт. Тымовское в зоне Центрально-Сахалинского (Тымпоронайского) разлома. Полученное решение механизма очага (не слишком высокого качества) говорит о взрезовом характере сейсмодислокации в очаге вдоль вертикальной плоскости юго-юго-западного простирания вкрест основным разломным структурам района, направленным здесь в юго-юго-восточном направлении, вторая субгоризонтальная возможная плоскость сейсмодислокации северо-западного простирания менее вероятна.

Событие ощущалось во многих населенных пунктах центральной части острова (см. таблицу), сильнее всего в наиболее близких – Чир-Унвд, Адо-Тымово, Иркир, Арги-Паги, где интенсивность сотрясений оценивается в 4–5 баллов. По сведениям, собранным по телефону, жители ощутили сильный толчок, двигалась мебель, падали небольшие предметы, раскачивались люстры, цветы, открывались двери шкафов. Люди в испуге выбегали на улицу. Некоторые слышали гул и грохот.

В *Курило-Охотском регионе* в 2025 г. помимо описанного выше Камчатского землетрясения, $M = 8.8$ и его афтершоков произошло еще несколько сейсмических событий намного меньшего масштаба, пять из которых можно отнести к сильным ($M \geq 6.0$). Всего в течение года здесь отмечено 4890 землетрясений в диапазоне глубин $h = 0$ –526 км.

Около половины этих событий находится вне афтершоковой области Камчатского землетрясения, преимущественно в районе Южных Курил и Хоккайдо между островами и глубоководным желобом, где сочетаются высокая сейсмическая активность и хорошие условия для регистрации землетрясений.

Вне указанного района наиболее сильным оказалось событие 13 апреля в 09:13 UTC ($M_L = 6.0$, $h = 394$ км; № 6). Его эпицентр находится в юго-восточной части Охотского моря у северной границы Курильской котловины (отмечена пунктиром на рис. 2, 3). Несмотря на удаленность, событие ощущалось в пос. Малокурильское и на восточных побережьях Хоккайдо и Хонсю. При этом в более близких к эпицентру поселках Курильских островов, Сахалина и Хоккайдо сотрясения отмечены не были. Такое распределение интенсивности сотрясений часто отмечается для глубоководных событий и объясняется тем, что сила сотрясений зависит больше от близости пунктов наблюдения к погруженной плите, являющейся волноводом, чем от эпицентральной дистанции. Механизм очага относительно поверхности взрезовой, с юго-западной ориентацией вертикальной плоскости; в координатах наклонной погруженной плиты [28] событие

произошло в условиях сжатия и может трактоваться как взбросовое.

13 июня в 18:35 UTC произошло сильное землетрясение ($M_L = 6.0$, $h = 40$ км; № 7) в районе Средних Курил, с эпицентром в районе глубоководного желоба; оно ощущалось на о. Итуруп с интенсивностью в 2–3 балла. Механизм очага оказался необычным для этой части субуксионной системы – взрезовым с одной вертикальной плоскостью, ориентированной вдоль желоба, второй – вкрест него с наклоном в 30° к северо-востоку. Учитывая глубину гипоцентра $h = 40$ км, можно предположить внутриплитовый характер события, хотя даже в этом случае не вполне понятно, к какой системе тектонических напряжений отнести такой очаг.

В течение года на юго-западном фланге островной дуги наблюдалось несколько сейсмических активизаций роевого типа, одна из них – в июне – включала в себя два сильных события: 18 июня в 23:08 UTC ($M_L = 6.0$, $h = 54$ км; № 8) и 21 июня в 21:23 UTC ($M_L = 6.0$, $h = 45$ км; № 9), а также 96 более слабых землетрясений в той же очаговой зоне до конца месяца. Механизм очага наиболее сильных событий серии оказался классическим взбросом с ориентацией нодальных плоскостей вдоль островной дуги, что характерно для межплитовых событий. Первое из сильных событий вызвало сотрясения на Южных Курилах интенсивностью до 4 баллов MSK-64 в Малокурильском и до 4 баллов JMA (примерно 5 баллов MSK-64) на востоке Хоккайдо. Интенсивность проявлений второго события оказалась примерно на балл ниже.

Наиболее сильным по интенсивности сотрясений в южной части региона оказалось событие 24 октября в 16:40 UTC ($M_L = 6.1$, $h = 52$ км; № 12) с эпицентром у северо-восточного побережья Хоккайдо. В населенных пунктах Курильских островов интенсивность сотрясений достигала 4–5 баллов MSK-64, инструментальная интенсивность сотрясений на Хоккайдо оценивается в 5 баллов JMA (6 баллов MSK-64) (см. таблицу). Механизм очага землетрясения – взброс (поддвиг) с небольшой сдвиговой компонентой.

Таблица. Параметры наиболее значимых землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН 2025 г. (по данным РИОЦ «Южно-Сахалинск»)

Table. Parameters of the most significant earthquakes in the SB FRC GS RAS area of responsibility in 2025 (according to the data of the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC)

No.	Дата / Date	Время / Time, t_0 ,	φ, N	λ, E	h , km	M^P M_w	Интенсивность сотрясений (населенный пункт, балл) / Shaking intensity (locality, points)
	dd.mm.yyyy	hh:mm:ss					
Приамурье и Приморье / Amur–Primorye region							
1	14.04.2025	11:32:40	50.67	137.68	4	3.3 –	Комсомольск-на-Амуре, 2
2	01.05.2025	10:21:09	53.52	135.77	27	4.9 –	Нет данных об ощутимости
3	25.10.2025	11:45:22	42.75	131.48	552	5.5 4.9	Нет данных об ощутимости
Сахалинский регион / Sakhalin region							
4	09.05.2025	06:15:26	46.07	143.66	352	4.8 4.4	Нет данных об ощутимости
5	06.11.2025	10:53:59	51.27	142.54	6	5.4 4.8	Чир-Унвд, Адо-Тымово, Иркир, Арги-Паги, 4–5; Тымовское, Ноглики, 4; Виахту, Хоз, Михайловка, Воскресеновка, Мгачи, 3–4; Александровск-Сахалинский, Арково, Красная Тымь, Кировское, Восход, 3; Ныш, Зональное, 2–3; Бошняково, Ясное, 2
Курило-Охотский регион / Kuril-Okhotsk region							
6	13.04.2025	09:13:31	48.63	149.96	392	6.0 5.8	Малокурильское, 3; Хоккайло, Хонсю, до 2 по шкале JMA*
7	13.06.2025	18:35:14	45.96	153.62	40	6.0 5.9	Курильск, Рейдово, Горячие Ключи, Горный, 2–3
8	18.06.2025	23:08:06	42.92	146.49	54	6.0 5.8	Малокурильское, 4; Южно-Курильск, 3–4; Лагунное, Горячий Пляж, Менделеево, Головнино, 3; Хоккайдо, до 4 по шкале JMA**
9	21.06.2025	21:23:20	42.93	146.48	45	6.0 6.0	Южно-Курильск, Головнино, Малокурильское, 2–3; Хоккайдо, до 3 по шкале JMA***
10	29.07.2025	23:24:51	52.51	160.37	14	8.8 8.8	Северо-Курильск, 7–8, цунами до 7 м; Петропавловск-Камчатский, Вилучинск, Термальный, Паратунка, Елизово, Раздольный, 6–7
11	03.08.2025	05:37:55	50.54	157.86	19	6.8 6.7	Северо-Курильск, Петропавловск-Камчатский, Вилучинск, Елизово, 4
12	24.10.2025	16:40:10	42.97	145.69	52	6.1 5.8	Южно-Курильск, Лагунное, Горячий Пляж, Менделеево, Головнино, 4–5; Малокурильское, 3–4; Хоккайдо, до 5 по шкале JMA****

*<https://earthquake.tenki.jp/bousai/earthquake/detail/2025/04/13/2025-04-13-18-15-01.html>

**<https://earthquake.tenki.jp/bousai/earthquake/detail/2025/06/19/2025-06-19-08-08-21.html>

***<https://earthquake.tenki.jp/bousai/earthquake/detail/2025/06/22/2025-06-22-06-23-34.html>

****<https://earthquake.tenki.jp/bousai/earthquake/detail/2025/10/25/2025-10-25-01-40-18.html>

Основные характеристики сейсмичности

Как и в предыдущих обзорах, проведена статистическая оценка уровня сейсмичности с использованием методики СОУС'09 [29] (рисунки 5 и 6), для этого построена функция F распределения сейсмической энергии с учетом вновь полученных данных и оценен интервал для величины суммарной сейсмической энергии землетрясений изучаемых регионов в 2025 г. согласно предложенной В.А. Салтыковым градации:

- экстремально высокий – $F \geq 0.995$,
- высокий – $0.975 < F < 0.995$,
- фоновый повышенный – $0.85 < F < 0.975$,
- фоновый средний – $0.15 < F < 0.85$,
- фоновый пониженный – $0.025 < F < 0.15$,
- низкий – $0.005 < F < 0.025$,
- экстремально низкий – $F < 0.005$.

С учетом нового подхода к оценке величины сейсмической энергии ΣE , функции распределения F последних лет существенно отличаются от приведенных в предыдущих обзорах [1, 2]. В основном это касается коровых событий Сахалина и Приамурья и Приморья. Для глубокофокусных землетрясений этих регионов, как сказано выше, согласования каталогов и сравнения уровня сейсмичности не проводилось.

На рис. 5 на примере коровых землетрясений Сахалинского региона рассмотрены изменения в статистической оценке. Величина суммарной сейсмической энергии событий Сахалина существенно выросла – примерно на половину порядка, это не коснулось только самых верхних значений с $F > 0.95$, т.к. методика оценки энергии наиболее сильных землетрясений изменилась незначительно. Как показано в работе [6], использование формулы Гутенберга–Рихтера (5) на основе MLH , получаемой пересчетом из других магнитуд, занижает оценку сейсмической энергии слабых землетрясений. Таким образом, новые оценки энергии таких событий, предположительно, более корректны.

Уровень сейсмичности последних лет также претерпел переоценку, причем для 2021 и 2023 гг. он понизился, а для 2024, напротив, – вырос. Это связано с изменением выбора основной энергетической шкалы катало-

га и случайной погрешностью в определении магнитуды и энергетического класса наиболее сильных землетрясений года. Так, в 2022 г., как и в 2025, произошли относительно сильные события, точность определения магнитуды которых обычно выше, поэтому оценка уровня сейсмичности изменилась незначительно. В остальные годы ΣE складывается из более слабых событий; вероятно, поэтому и результат менее устойчивый. В целом рис. 5 демонстрирует условность подобных оценок, зависящих от подхода к использованию каталога. Уровень коровой сейсмичности Сахалинского региона в 2025 г. можно оценить как $F = 0.41$ – фоновый средний.

В регионе Приамурья и Приморья сейсмичность в 2025 г. (рис. 6 а) находилась на фоновом пониженном уровне ($F = 0.10$), что является следствием отсутствия сильных и умеренно-сильных землетрясений. Слабая сейсмическая активность наблюдалась в регионе и в предшествующие 2021–2024 гг. Последние сейсмические события в коре региона, которые можно отнести к умеренно-сильным ($M = 4.0$ – 5.4), произошли в 2020 г.

В Курило-Охотском регионе (рис. 6 б), как и следовало ожидать исходя из величины Камчатского землетрясения 29 июля, $M = 8.8$,

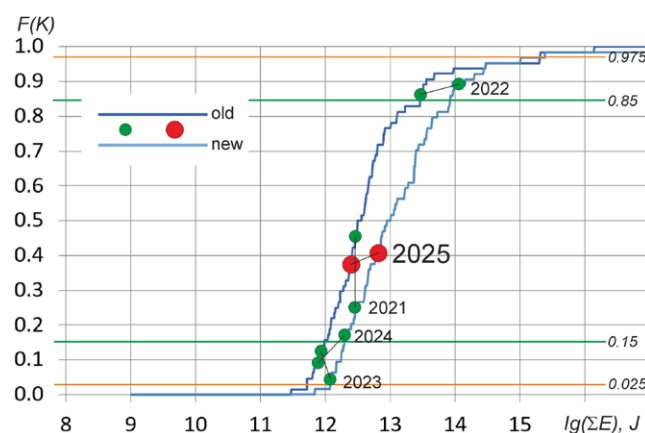


Рис. 5. Эмпирическая функция распределения годовой сейсмической энергии коровых $h \leq 40$ км землетрясений Сахалинского региона с оценкой величины сейсмической энергии по старой и новой методике. Отмечены точки, соответствующие уровню сейсмичности каждого года периода 2021–2025 гг.

Fig. 5. Empirical distribution function of the yearly seismic energy of crustal earthquakes in the Sakhalin region with focal depths $h \leq 40$ km, with seismic energy estimates calculated using both the old and new methods. The dots corresponding to each year of the period 2020–2024 are marked.

уровень неглубокой ($h \leq 70$ км) сейсмичности высокий ($F = 0.99$). В каталог региона 1920–2025 гг. были включены как Камчатское землетрясение 1952 г., $M = 9.0$, так и событие 29 июля 2025 г., $M = 8.8$. Хотя эпицентры этих землетрясений находятся за пределами региона, их очаг наполовину располагается в его пределах. Таким образом, в рассматриваемом временном диапазоне каталога единственным годом с более высокой сейсмичностью, чем 2025, был 1952. Уровень глубокой сейсмичности ($h > 70$ км) в 2025 г. оценивается как фоновый средний ($F = 0.45$).

В нашем обзоре прошлого года [2] при построении эмпирической функции распределения годовой сейсмической энергии Курило-Охотского региона была допущена ошибка – использовался каталог 1981–2024 гг., хотя указан каталог с 1920 г. По этой причине есть различие с оценкой уровня сейсмичности 2021–2024 гг., сделанной в данном обзоре, а также более ступенчатый график. Более корректный, хотя и не разделенный на глубинные интервалы график показан в обзоре 2023 г. [1].

Отследить относительную величину сейсмических событий во времени и общий ход фоновой сейсмичности помогает график Бенъофа. На рис. 7 показаны пятилетние графики Бенъофа Сахалинского и Курило-Охотского регионов, построенные по однородным данным РИОЦ «Южно-Сахалинск» 2021–2025 гг.,

что позволило избежать описанной выше проблемы несовместимости каталогов. При этом, так же как и в ранее приведенных материалах, события разделены по глубинным диапазонам. Для Приамурья и Приморья график в этом году решено не приводить, т.к. сильных событий там не наблюдается уже пять лет.

На графике коровой сейсмичности Сахалина (оранжевая линия на рис. 7 а) отмечены наиболее крупные события за пять лет. Наибольшую ступень создают два землетрясения февраля 2022 г. Участок кривой перед ними со сниженным наклоном можно трактовать как небольшой период затишья, хотя такой же уровень наклона, но меньшей продолжительности наблюдается и на некоторых других участках. Кроме того, сомнительно, что подготовка столь слабых событий может значительно повлиять на региональную сейсмичность в целом. Так, землетрясение 2025 г. 16 ноября, $M = 5.4$ периодом затишья не предваряется. Наиболее сильным глубокофокусным событием (синяя линия на рис. 7 а) остается землетрясение 2 июля 2022 г., $M = 6.1$. В 2025 г. наиболее сильное землетрясение 9 мая, $M = 4.8$ почти не выделяется на уровне более слабых событий.

Доминирует на графике Бенъофа Курило-Охотского региона в 2021–2025 гг. Камчатское землетрясение 29 июля 2025 г., $M = 8.8$. Два крупнейших региональных события, произошедших в этот период до него, показанные на

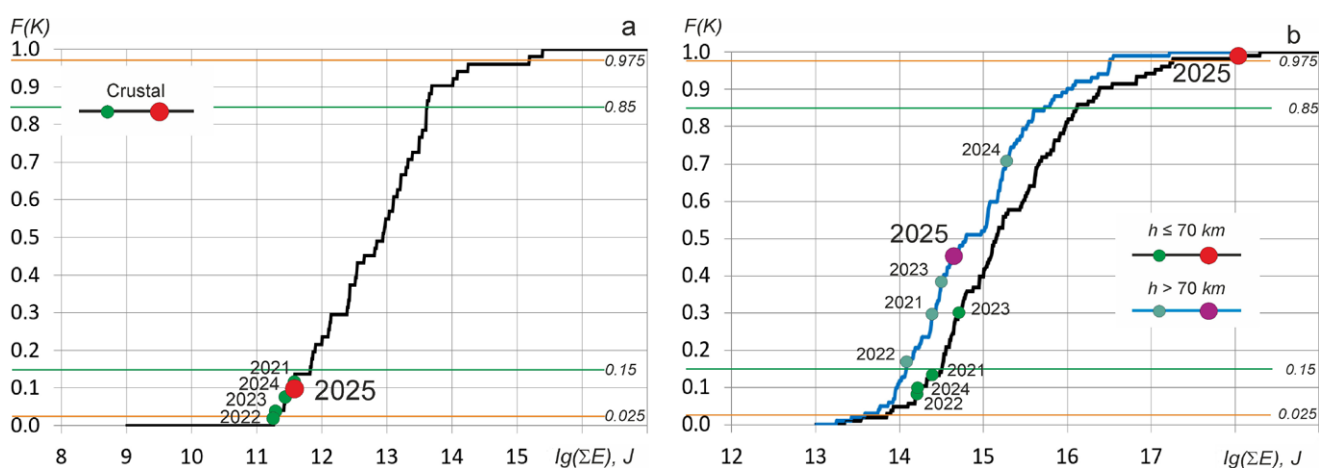


Рис. 6. Эмпирическая функция распределения годовой сейсмической энергии для коровых землетрясений региона Приамурье и Приморье (а), а также неглубоких ($h \leq 70$ км) и глубоких ($h > 70$ км) землетрясений Курило-Охотского региона (б). Отмечены точки, соответствующие уровню сейсмичности каждого года периода 2021–2025 гг.

Fig. 6. Empirical distribution function of yearly seismic energy for crustal earthquakes in the Amur and Primorye region (a), and shallow ($h \leq 70$ км) and deep ($h > 70$ км) earthquakes in the Kuril-Okhotsk region (b). The dots corresponding to each year of the period 2021–2025 are marked.

рис. 7 б, почти не выделяются на фоне создаваемой им ступени. Камчатскому землетрясению, вероятно, предшествует небольшая сейсмическая активизация в конце мая – июле 2025 г., отметившаяся ступенями на графике как неглубоких событий (оранжевый), так и, с небольшим запозданием, глубоких (синий). События этой активизации (см. таблицу) произошли в разных частях Курило-Охотского региона. Большой угол наклона графика неглубоких событий после Камчатского землетрясения связан с афтершоковой активностью.

Для демонстрации распределения сейсмичности по площади территории помимо карт эпицентров (рисунки 2, 3) построена карта величины плотности условной упругой деформации $\Sigma E^{1/2}$ в единицу времени (1 год) (рис. 8). Методика построения повторяет применявшуюся ранее [1]. В этом обзоре в область построения была включена территория Южной Камчатки. Энергия землетрясения 29 июля, $M = 8.8$ распределена по расчетным кластерам в соответствии с моделью конечного источника [25].

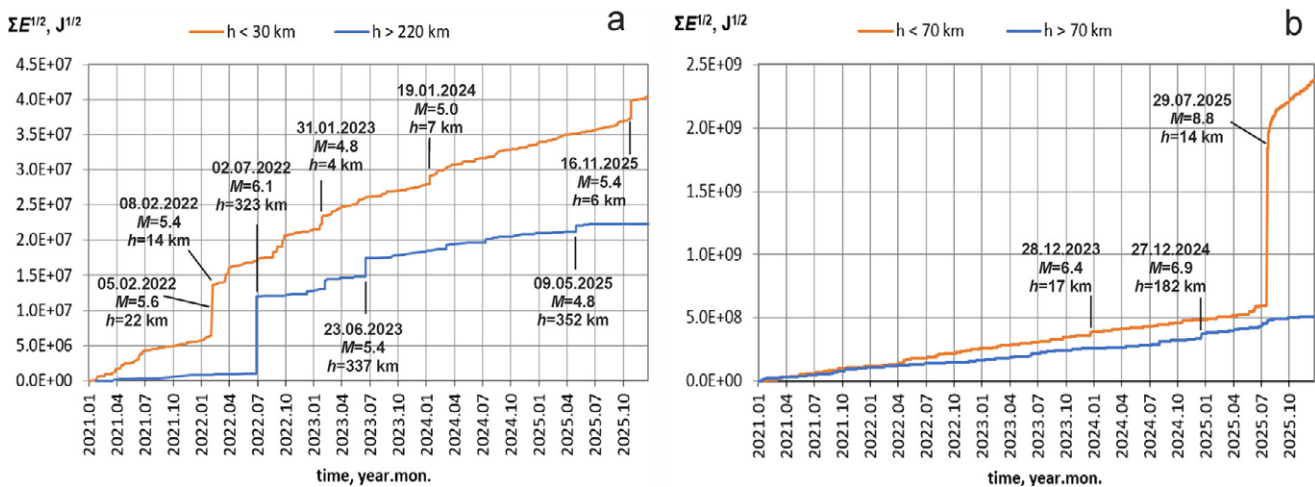


Рис. 7. Графики Беньофа за 2021–2025 гг. для зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН: для Сахалинского (а) и Курило-Охотского (б) региона.

Fig. 7. Benioff graphs for the SB FRC GS RAS area of responsibility in 2021–2025: the Sakhalin region (a) and the Kuril-Okhotsk region (b).

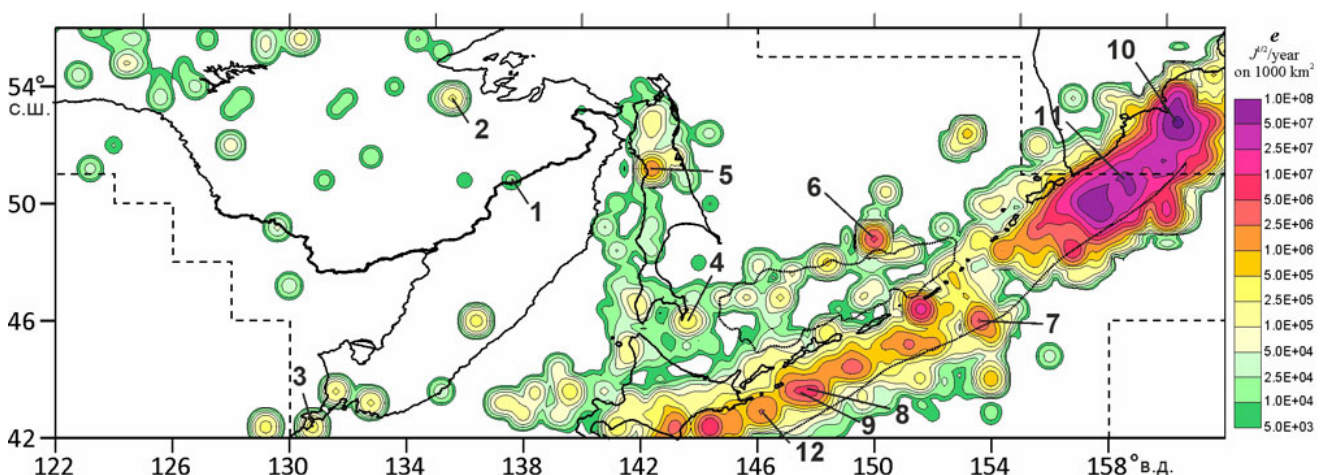


Рис. 8. Плотность условной упругой деформации изучаемой территории по данным каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» 2025 г. Показано положение региональных землетрясений согласно таблице. Штриховой линией отмечена граница зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН, точками – положение Курильского глубоководного желоба и Курильской глубоководной котловины.

Fig. 8. Density of nominal elastic deformation for the studied area according to the data of the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC earthquake catalog in 2025. The position of the most significant regional earthquakes is shown according to Table. The dashed line indicates the border of the area of responsibility of the SB FRC GS RAS; dots indicate the position of the Kuril Trench and the Kuril deep-sea basin.

В 2025 г. (рис. 8) максимальное значение параметра плотности условной упругой деформации ($e = 3 \cdot 10^8$ Дж^{1/2}/год на 1000 км²) даже с учетом распределения энергии на весь очаг Камчатского землетрясения почти на порядок превысило максимальное значение прошлого года. Разумеется, максимальные показатели наблюдаются в очаговой зоне крупнейшего в этом веке землетрясения. При этом форма области максимальных значений повторяет положение очага события $M = 8.8$ и его афтершокового облака, однако пиковые значения e смещены к его концам. На северо-востоке вблизи эпицентра события $M = 8.8$ произошли также крупнейший форшок 20 июля, $M = 7.6$ и крупнейший афтершок 18 сентября, $M = 7.9$, энергия которых также распределена на несколько кластеров пропорционально размеру очага таких событий. Пиковое значение параметра e , указанное выше, сложилось суммарно от перечисленных землетрясений. На юго-западе пиковые значения $e = 1.3 \cdot 10^8$ Дж^{1/2}/год на 1000 км² в основном стали следствием большего вклада энергии очага основного события $M = 8.8$, т.к. находящиеся здесь кластеры получили большую часть энергии этого землетрясения пропорционально величине смещения в модели конечного источника [25], хотя детальность карты не позволяет полностью повторить это распределение. Тем не менее, вклад афтершоков, например события с $M = 7.6$ (№ 11 на рис. 8), также присутствует. Это заметно по некоторым крупным афтершокам, локализованным несколько в стороне вокруг основного облака.

На остальной изучаемой территории максимумы параметра Беньофа наблюдаются в очаговых зонах наиболее сильных землетрясений и роевых событий, большинство из которых описано выше (см. таблицу). Основная полоса сейсмогенерации, как обычно, протягивается между Курильской островной грядой и глубоководным желобом. Параллельно ей под южной частью Охотского моря, Южным Сахалином и северо-востоком Японского моря идет полоса глубоководной сейсмичности на глубинах $h = 250\text{--}400$ км. При этом максимумы параметра e соответствуют средним многолетним значениям, полученным по ката-

логу 1981–2023 гг. [1]. Полоса слабой коровой сейсмичности, ориентированная в меридиональном направлении, выделяется вдоль о. Сахалин, разрозненные области в районе эпицентров слабых событий отмечаются в Приамурье и Приморье.

Заключение

Сеть сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2025 г. продолжила сокращаться по причине износа оборудования и сложности доступа к наиболее удаленным пунктам регистрации. На конец года в ней официально числилось 34 сейсмостанции и 3 инженерно-сейсмометрических пункта. Перераспределение оборудования и обмен данными с соседними сейсмологическими сетями позволяет поддерживать прежний уровень представительной регистрации землетрясений в пределах регионов зоны ответственности.

По данным оперативного каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск», в 2025 г. на юге Дальнего Востока России зарегистрировано 5144 землетрясения магнитудой $M_L \geq 2.2$: 4890 в Курило-Охотском регионе, 146 (21 глубокофокусное) в Сахалинском, 108 (7 глубокофокусных) в Приамурье и Приморье. 194 землетрясения с эпицентрами в пределах зоны ответственности филиала имели ощутимые проявления на территории регионов. Также зарегистрированы сотрясения 31 события с эпицентрами вне зоны ответственности.

Примерно половина зарегистрированных сейсмических событий каталога, а также две трети ощутимых событий относятся к форшоковой и афтершоковой активности в очаговой зоне Камчатского землетрясения 29 июля 2025 г. 23:36 UTC, $M = 8.8$, ставшего одним из крупнейших сейсмических событий XXI в. Это событие стало результатом поддвига Тихоокеанской тектонической плиты под Охотскую и привело к сильным сотрясениям, интенсивность которых достигала максимума в 7–8 баллов в г. Северо-Курильск, а также волне цунами высотой до 7 м в портовой зоне этого города. В результате вовремя объявленной тревоги цунами жертв удалось избежать.

Помимо землетрясения 29 июля, $M = 8.8$, его форшоков и афтершоков в пределах изучаемой территории отмечено еще 5 событий в Курило-Охотском регионе, которые можно отнести к сильным ($M \geq 6.0$). Они произошли в основном в конце мая – июле, что, возможно, было проявлением сейсмической активизации региона, предварявшей сильнейшее событие 29 июля.

По критерию суммарной сейсмической энергии, оцениваемой по методике СОУС'09, в 2025 г. уровень сейсмичности Курило-Охотского региона относится к высокому ($F = 0.99$); уровень глубокофокусной ($h > 70$ км) сейсмичности этого региона – фоновый средний ($F = 0.45$). Уровень коровой сейсмичности Сахалинского региона фоновый средний ($F = 0.41$). В регионе Приамурье и Приморье уровень фоновый пониженный ($F = 0.10$), причем эта оценка остается неизменной уже пятый год.

Пиковые значения плотности условной упругой деформации по площади трех регионов в 2025 г., согласно карте распределения этого параметра, относятся к очаговой зоне Камчатского землетрясения 29 июля, $M = 8.8$, что связано как с высокой сейсмической энергией главного события, так и с его форшоками и афтершоками. При этом максимумы параметра Беньофа смещены к краям очага. На остальной изучаемой территории максимумы параметра Беньофа наблюдаются в очаговых зонах наиболее сильных землетрясений и роевых событий, их величина соответствует средним многолетним значениям.

Список литературы

1. Сафонов Д.А., Семенова Е.П. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2023 году. *Геосистемы переходных зон*. 2024,8(2):77–90. <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2.077-090>
2. Сафонов Д.А., Семенова Е.П., Костылев Д.В., Щукин М.А. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2024 году. *Геосистемы переходных зон*. 2025,9(2):182–196. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.2.182-196>
3. Чебров Д.В. Камчатское мега-землетрясение 29 июля 2025 г. ($M_w = 8.8$). *Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр»*. *Науки о Земле*. 2025,3(67):113–117. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2025-3-67-113-117>
4. Дягилев Р.А. Программа расчета регистрационных возможностей сейсмических сетей и групп, SARRA: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2020662170 от 09.10.2020 г. М.: РОСПАТЕНТ, 2020.
5. Сафонов Д.А. Новые переходные соотношения для энергетических характеристик землетрясений Сахалинского региона. *Геосистемы переходных зон*. 2025,9(1):22–36. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.022-036>
6. Сафонов Д.А. Оценка сейсмической энергии землетрясений Курило-Охотского региона через магнитуду M_L . *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2026,53(2):62–78. <https://doi.org/10.21455/VIS2026.2-4>
7. Safonov D.A., Semenova E.P. Regional magnitude M_{wa} in the Russian Far East. *Seismic Instruments*. 2022,58(S1):S42–S57. <https://doi.org/10.3103/S074792392207009X>
8. Richter C.F. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1935,25(1):1–32.
9. Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км. В кн.: *Экспериментальная сейсмика*. М.: Наука, 1964, с. 88–93. (Труды ИФЗ АН СССР, № 32(199)).
10. Sokos E., Zahradnik J. Evaluating centroid moment tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. *Seismological Research Letters*. 2013,84(4):656–665. <https://doi.org/10.1785/0220130002>
11. Сафонов Д.А., Коновалов А.В. Использование программы ISOLA для определения тензора сейсмического момента землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов. *Тихоокеанская геология*. 2017,36(3):102–112. URL: http://itig.as.khb.ru/POG/2017/n_3/PDF_3_17/102-112.pdf
12. Соловьёва О.Н., Соловьёв С.Л. Соотношение между энергетическим классом и магнитудой курильских землетрясений. *Физика Земли*. 1967,2:13–23.
13. Richter C.F. *Elementary seismology*. New York: Freeman and Co., 1958, 768 p.
14. Сафонов Д.А. Соотношение между магнитудами M_{LH} и M_w для Курило-Охотского региона и его использование для транзитных пересчетов в другие магнитуды. *Вулканология и сейсмология*. 2025,2:20–37.
15. Поплавская Л.Н. (ред.) *Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006, 103 с.
16. Ким Ч.У., Андреева М.Ю. *Каталог землетрясений Курило-Камчатского региона (1737–2005 гг.)*.

- Препринт. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2009, 126 с.
17. Сафонов Д.А., Нагорных Т.В., Коваленко Н.С. *Сейсмичность региона Приамурье и Приморье*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2019, 104 с. doi:10.30730/978-5-6040621-0-4.2019-1
 18. Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Костылев Д.В. Сейсмичность Приамурья и Приморья, Сахалина и Курило-Охотского региона в 2018–2019 гг. *Землетрясения Северной Евразии*. 2023,26:154–170. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.01>
 19. Кондорская Н.В., Горбунова И.В., Киреев И.А., Вандышева Н.В. О составлении унифицированного каталога сильных землетрясений Северной Евразии по инструментальным данным (1901–1990 гг.). *Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии*. Вып. 1. М.: ИФЗ РАН, 1993, с. 70–79.
 20. Волкова Л.Ф., Поплавская Л.Н. Региональная шкала MPV(A) для оценки магнитуд дальневосточных землетрясений с нормальной глубиной очага. В кн.: *Сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке*. Владивосток: 1989, с. 39–40.
 21. Габсатарова И.П., Пойгина С.Г. Унификация сейсмологических каталогов по магнитуде. *Землетрясения России в 2021 году*. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023, с. 138–141.
 22. Сафонов Д.А., Семёнова Е.П. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2021 году. *Геосистемы переходных зон*. 2022,6(2):85–99. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.085-099>
 23. Mikhailov V.O., Konvisara A.M., Smirnova V.B., Timoshkina E.P., Titkov N.N., Khairtdinov S.A. Chebrov D.V. The rupture surface model of the July 29, 2025 Mw 8.8 Kamchatka earthquake based on satellite geodesy and interferometry data. *Doklady Earth Sciences*. 2025,525:35. <https://doi.org/10.1134/S1028334X25608752>
 24. Виноградов Ю.А., Рыжикова М.И., Петрова Н.В., Коломиец М.В. Сильные землетрясения земного шара во II полугодии 2025 г. по данным ССД ФИЦ ЕГС РАН. *Российский сейсмологический журнал*. 2026,8(1):7–30. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2026.1.01>
 25. *United States Geological Survey*. Finite Fault Model for the Mw 8.8 Kamchatka Earthquake (Event ID: us6000qw60). 2026. Retrieved January 26. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000qw60/finite-fault>
 26. Костылев Д.В., Костылева Н.В. Система инженерно-сейсмометрических наблюдений на Курильских островах в условиях постоянных интенсивных сейсмических воздействий. *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. 2025,6(81):30–37. EDN: QEXYGO.
 27. Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О., Бержинский Ю.А., Клячко М.А., Шестомеров Г.С., Стром А.Л. Проект новой российской сейсмической шкалы. *Инженерные изыскания*, 2011,10 62–71. EDN: OWELIF
 28. Сафонов Д.А. Реконструкция поля тектонических напряжений глубокой части южного сегмента Курило-Камчатской и северного сегмента Японской зоны субдукции. *Геодинамика и тектонофизика*. 2020,11(4):743–755. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-4-0504>
 29. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки. *Вулканология и сейсмология*. 2011,2:53–59. EDN: NSYPHR

References

1. Safonov D.A., Semenova E.P. Seismicity of the South Far East of Russia in 2023. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*. 2024,8(2):77–90. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2.077-090>
2. Safonov D.A., Semenova E.P., Kostylev D.V., Shchukin M.A. Seismicity of the south of the Russian Far East in 2024. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*. 2025,9(2):182–196. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.2.182-196>
3. Chebrov D.V. The Mw = 8.8 Kamchatka megathrust earthquake of July 29, 2025. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*. 2025,3(67):113–117. (In Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2025-3-67-113-117>
4. Dyagilev R.A. *Software for Calculating Recording Capabilities of Seismic Networks and Groups, SARRA*: Certificate for the State Registration of Software Package for Computer. No. RU 2020662170 of October 10. Moscow: ROSPATENT, 2020. (In Russ.).
5. Safonov D.A. New transition relationships for the energy characteristics of earthquakes in the Sakhalin region. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*. 2025,9(1):22–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.022-036>
6. Safonov D.A. Estimation of seismic energy of earthquakes in the Kuril-Okhotsk region using magnitude ML. *Voprosy inzhenernoi seismologii = Problems of Engineering Seismology*. 2026,53(2):62–78. (In Russ.). <https://doi.org/10.21455/VIS2026.2-4>
7. Safonov D.A., Semenova E.P. Regional magnitude M_{wa} in the Russian Far East. *Seismic Instrument*. 2022,58(S1):S42–S57. <https://doi.org/10.3103/S074792392207009X>

8. Richter C.F. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1935,25(1):1–32.
9. Rautian T.G. [On determining the energy of earthquakes at distances up to 3000 km]. In: *Eksperimental'naya seismika = Experimental seismic*. Moscow: Nauka, 1964, p. 88–93. (In Russ.). (Trudy IFZ AN SSSR, № 32(199)).
10. Sokos E., Zahradník J. Evaluating centroid-moment-tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. *Seismological Research Letters*. 2013,84(4):656–665. <https://doi.org/10.1785/0220130002>
11. Safonov D.A., Kononov A.V. Moment tensor inversion in the Kuril-Okhotsk and Sakhalin regions using ISOLA software. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2017,36(3):102–112. (In Russ.). URL: http://itig.as.khb.ru/POG/2017/n_3/PDF_3_17/102-112.pdf
12. Solovieva O.N., Soloviev S.L. Relation between energy class and magnitude of Kuril earthquakes. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 1967,2:13–23. (In Russ.).
13. Richter C.F. *Elementary seismology*. New York: Freeman and Co., 1958, 768 p.
14. Safonov D.A. [Relationship between the magnitudes M_{LH} and M_w for the Kuril-Okhotsk region and its use for transit calculations to other magnitudes]. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2025,2:20–37. (In Russ.).
15. Poplavskaya L.N. (ed.) [*Regional catalog of earthquakes on Sakhalin Island, 1905–2005*]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 2006, 103 p. (In Russ.).
16. Kim Ch.U., Andreeva M.Yu. [*Earthquake catalog of the Kuril-Kamchatka region (1737–2005)*]. Preprint. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 2009, 126 p. (In Russ.).
17. Safonov D.A., Nagornyy T.V., Kovalenko N.S. *Seismicity of the Amur and Primorye regions*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG FEB RAS, 2019, 104 p. (In Russ.).
18. Fokina T.A., Safonov D.A., Kostylev D.V. Seismicity of the Amur Region and Primorye, Sakhalin and the Kuril-Okhotsk region in 2018–2019. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii = Earthquakes of Northern Eurasia*, 2023,26:154–170. (In Russ.). <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.13>
19. Kondorskaya N.V., Gorbunova I.V., Kireev I.A., Vandyshcheva N.V. On the compilation of a unified catalogue of strong earthquakes in Northern Eurasia based on instrumental data (1901–1990). In *Seismicity and seismic zoning of Northern Eurasia*. Vol. 1. Moscow: ИФЗ РАН, 1993, 70–79. (In Russ.).
20. Volkova L.F., Poplavskaya L.N. Regional MPV(A) scale for estimating the magnitudes of Far Eastern earthquakes with normal focal depth. In: *Seismologiya i seismostojkoe stroitel'stvo na Dal'nem Vostoke = Seismology and earthquake-resistant construction in the Far East*. Vladivostok, 1989, p. 39–40.
21. Gabsatarova I.P., Pojgina S.G. Unification of seismological catalogs by magnitude. In: *Zemletriaseniia Rossii v 2021 godu = Earthquakes in Russia, 2021*. Obninsk: GS RAS, 2023, p. 138–141. (In Russ.).
22. Safonov D.A., Semenova E.P. Seismicity of the South Far East of Russia in 2021. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*. 2022,6(2):85–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.085-099>
23. Mikhailov V.O., Konvisara A.M., Smirnova V.B., Timoshkina E.P., Titkov N.N., Khairtdinov S.A., Chebrov D.V. The rupture surface model of the July 29, 2025 Mw 8.8 Kamchatka earthquake based on satellite geodesy and interferometry data. *Doklady Earth Sciences*. 2025,525:35. <https://doi.org/10.1134/S1028334X25608752>
24. Vinogradov Yu.A., Ryzhikova M.I., Petrova N.V., Kolomiets M.V. Global earthquakes in the 2025 second half according to the GS RAS. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal = Russian Journal of Seismology*. 2026,8(1):7–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2026.1.01>
25. United States Geological Survey. *Finite Fault Model for the Mw 8.8 Kamchatka Earthquake* (Event ID: us6000qw60), 2026. Retrieved January 26. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000qw60/finite-fault>
26. Kostylev D.V., Kostyleva N.V. System of engineering seismometric observations on the Kuril Islands under conditions of constant intensive seismic impacts. *Prirodnye i tekhnogennye riski. Bezopasnost' sooruzhenij = Natural and man-made risks. Safety of structures*. 2026,6(81):1–37. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/qexygo>
27. Aptikaev F.F., Erteleva O.O., Berzhinskij Yu.A., Klyachko M.A., Shestoporov G.S., Strom A.L. Project of a new Russian seismic scale. *Inzhenernye izyskaniya = Engineering surveys*. 2011,10:62–71. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/owelif>
28. Safonov D.A. Reconstruction of the tectonic stress field in the deep parts of the Southern Kuril-Kamchatka and Northern Japan subduction zones. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2020,11(4):743–755. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-4-0504>
29. Saltykov V.A. A statistical estimate of seismicity level: The method and results of application to Kamchatka. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2011,5:123–128. <https://doi.org/10.1134/S0742046311020060>

Об авторах

✉ Сафонов Дмитрий Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, d.safonov@imgg.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2201-2016>

Семенова Елена Петровна, начальник сейсмической станции «Южно-Сахалинск», Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия, semenova@seismo.sakhalin.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7435-961X>

Костылев Дмитрий Викторович, кандидат технических наук, директор, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»; старший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, kostylev@seismo.sakhalin.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8150-9575>

About the Authors

✉ Safonov, Dmitry A., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher of the Laboratory of Seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, d.safonov@imgg.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2201-2016>

Semenova, Elena P., Chief of the Seismic station «Yuzhno-Sakhalinsk», Sakhalin Branch of the Federal Research Center “Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences”, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, semenova@seismo.sakhalin.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7435-961X>

Kostylev, Dmitry V., Cand. Sci. (Engineering), Director of the Sakhalin Branch of the Federal Research Center “Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences”; Senior Researcher of the Laboratory of Seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, kostylev@seismo.sakhalin.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8150-9575>

Поступила 10.04.2026

Принята к публикации 20.05.2026

Received 10 April 2026

Accepted 20 May 2026

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



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

УДК 004.93;551.594.6;550.343.6

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.2.225-237>
<https://www.elibrary.ru/gbwhtpy>

Методика поиска информативных признаков перед землетрясениями в электромагнитном регулярном шумовом фоне ОНЧ-диапазона

Ю. И. Сенкевич, Е. И. Малкин, Г. И. Дружин

*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
пос. Паратунка, Камчатский край, Россия*

Резюме. Проблема поиска информативных признаков в электромагнитном регулярном шумовом фоне ОНЧ-диапазона связана с построением прогностической модели землетрясений. Цель работы заключается в разработке и апробации методики выявления информативных признаков путем анализа спектральной плотности мощности электромагнитного излучения с применением технологий глубокого машинного обучения. В ходе исследования применен комплексный подход, включающий непрерывный мониторинг электромагнитных сигналов в ОНЧ-диапазоне (0.3–30 кГц) и обработку данных с помощью сверточных нейронных сетей. На основе анализа массива данных по камчатским землетрясениям за 2016–2019 гг. (29 сильных сейсмических событий) были получены значимые результаты: разработана оригинальная методика подготовки данных для нейросетевой классификации с высокой точностью распознавания (до 96 %), подтверждено наличие предвестников землетрясения в электромагнитном регулярном шумовом фоне ОНЧ-диапазона. Научная новизна исследования заключается в разработке нового подхода к подготовке исходных данных в графическом формате и применении современных нейросетевых технологий для анализа геофизических сигналов, что позволило выявить скрытые паттерны, предшествующие сейсмическим событиям. Практическая значимость работы состоит в создании инструмента для мониторинга предвестников землетрясений, способствующего развитию систем раннего предупреждения и подтверждающего перспективность применения методов машинного обучения для анализа геофизических данных и прогнозирования природных явлений.

Ключевые слова: землетрясение, предвестники, электромагнитное излучение, нейросетевой анализ

Methodology for detecting for informative features before earthquakes in the electromagnetic regular noise background of the VLF range

Yuriy I. Senkevich, Evgeny I. Malkin, Gennady I. Druzhin

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

Abstract. The study addresses the pressing scientific challenge of identifying informative features in the electromagnetic regular noise background of the VLF (very low frequency) range, which is related to creating a model for earthquake prediction. The aim of the study is to develop and test a methodology for detecting informative features by analyzing the power spectral density of electromagnetic radiation, using deep machine learning technologies. During the research, a comprehensive approach was applied, which included continuous monitoring of electromagnetic signals in the VLF range (0.3–30 kHz), as well as the data processing using convolutional neural networks. Based on the analysis of a dataset of Kamchatka earthquakes from 2016 to 2019 which included 29 major seismic events significant results were obtained: an original data preparation methodology for neural network classification was developed; high recognition accuracy (up to 96 %) was achieved; and the presence of earthquake precursors in the electromagnetic regular noise background of the VLF range was confirmed. The scientific novelty of the study lies in the development of a new approach for preparing input data in a graphical format and the application of modern neural network technologies for analyzing geophysical signals. This has made it possible to identify

hidden patterns that precede seismic events. The practical significance of the study consists in creating a tool for monitoring earthquake precursors. This tool contributes to the development of early warning systems and confirms the potential of applying machine learning methods to analyze geophysical data and forecast natural phenomena.

Keywords: earthquake, precursors, electromagnetic radiation, neural network analysis

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (№ НИОКТР 124012300245-2).

Funding

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).

Для цитирования: Сенкевич Ю.И., Малкин Е.И., Друзин Г.И. Методика поиска информативных признаков перед землетрясениями в электромагнитном регулярном шумовом фоне ОНЧ-диапазона. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 2, с. 225–237. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.2.225-237>; <https://www.elibrary.ru/gbwhpy>

For citation: Senkevich Yu.I., Malkin E.I., Druzhin G.I. Methodology for detecting for informative features before earthquakes in the electromagnetic regular noise background of the VLF range. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 2, p. 225–237. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.2.225-237>; <https://www.elibrary.ru/gbwhpy>

Введение

Электромагнитный регулярный шумовой фон (РШФ) в диапазоне очень низких (ОНЧ) и крайне низких (КНЧ) частот (КНЧ/ОНЧ-диапазоне) – это постоянно присутствующий квазистационарный уровень естественного электромагнитного излучения. Его главная особенность – устойчивость во времени, что позволило выделить его в отдельную категорию сигналов. Этот фон служит индикатором глобальных процессов в системе «Земля–ионосфера» и является важным параметром для геофизического мониторинга [1–4].

Основным и наиболее значимым источником РШФ в ОНЧ-диапазоне являются грозовые разряды. Молнии генерируют мощные широкополосные электромагнитные импульсы (атмосферики), которые, распространяясь в волноводе «Земля–ионосфера», создают глобальный фоновый шум [3]. Хотя грозы доминируют, определенный вклад в РШФ вносят и другие процессы – например, взаимодействие потоков заряженных частиц с магнитным полем Земли в магнитосфере и ионосфере [5].

Литосфера также участвует в формировании электромагнитного фона в ОНЧ-диапазоне [6–10]. Для объяснения того, как деформации в толще горных пород порождают электромагнитные волны, существует несколько научных моделей. Ключевой из них, по мнению множе-

ства авторов, является пьезоэлектрическая [7, 11–16]. В основе этой модели лежит эффект возникновения электрических зарядов в пьезоэлектрических минералах при их механической деформации. При движении трещины в такой породе возникают поляризационные токи, которые и служат источником электромагнитного излучения.

Однако вклад литосферного излучения в общий уровень РШФ чрезвычайно мал. В отличие от постоянного грозового фона, литосферное излучение, как правило, проявляется в виде кратковременных аномалий, связанных с процессами подготовки и прохождения сейсмических волн. Уровень этих сигналов, как показывают исследования, на несколько порядков слабее грозовых помех, что делает их выделение технически сложной задачей [7, 10]. Одним из методов решения данной задачи является выявление информативных признаков. В основе данного метода лежит поиск специфических паттернов в данных электромагнитного фона, которые обычно разделяют в зависимости от частотного диапазона наблюдений.

В ультранизких частотах основным инструментом является магнитометрия. Ключевые признаки, отличающие сейсмогенный сигнал от фонового геомагнитного шума, включают поляризационное отношение; анализ спектральной плотности мощности; фрактальный анализ [17–25].

В КНЧ/ОНЧ-диапазоне методы обычно основаны на зондировании волновода «Земля–ионосфера» с помощью сигналов от мощных наземных передатчиков [26–30]. Аномалии проявляются в принимаемом сигнале и служат индикатором возмущений, связанных с подготовкой землетрясения. Наиболее изучены ночные флуктуации амплитуды и фазы сигнала радиостанций в ОНЧ-диапазоне, которые могут регистрироваться за 1–3 дня до сейсмического события [26–27]. Также в данном диапазоне наблюдаются импульсные электромагнитные сигналы, не связанные с грозовой активностью. В работе [7] была продемонстрирована методика выделения ОНЧ-сигналов, основанная на приеме импульсных ОНЧ-излучений с направления на эпицентр готовящегося землетрясения. Исходя из предложенной в работе методики, было установлено, что ОНЧ-сигналы, связанные с землетрясением, достигают максимума не в день землетрясения, а за несколько дней до него.

Изучение фактов о связи ОНЧ-сигналов с землетрясениями, основанных на приеме импульсных ОНЧ-излучений с направления на эпицентр готовящегося землетрясения с определением его максимума, позволило подойти к проблеме выделения информативных признаков подготовки землетрясений по данным анализа изменчивости параметров сигналов ОНЧ-диапазона и обосновать подход к ее решению.

Целью настоящего исследования стал поиск возможности прогнозирования сильных камчатских землетрясений на краткосрочном периоде наблюдений (от 1 до 15 сут перед началом события) на основе оценки характера изменчивости спектральной плотности мощности электромагнитного излучения РШФ КНЧ/ОНЧ-диапазонов с использованием глобального машинного обучения.

Обоснование подхода к выделению информативных признаков

В лаборатории электромагнитных излучений ИКИР ДВО РАН на протяжении многих лет осуществляется непрерывный мониторинг динамики параметрической изменчивости

электромагнитных сигналов в регулярном шумовом фоне ОНЧ-диапазона. Особый интерес представляет анализ записей огибающих ОНЧ-излучений в узких частотных полосах на частотах 0.7; 1.2 и 5.5 кГц. Наблюдения показали, что перед землетрясениями энергетического класса $K > 13$ (магнитуда $M \sim 6$) за несколько суток до основного события появляются мощные импульсные излучения, которые можно наблюдать в почасовых значениях среднеквадратичной огибающей (СКО) ОНЧ-излучения. Непосредственно перед землетрясением амплитуда СКО обычно падает. Перед мощным Кроноцким землетрясением ($M = 7.8$) излучение импульсного характера появилось за месяц, а спад амплитуды СКО наблюдался за трое суток до основного события. Также было показано, что за несколько суток до сильного землетрясения амплитуда шумовой составляющей суточного хода ОНЧ-сигнала обычно падает, а после него в течение нескольких суток восстанавливается. Наиболее резкое падение амплитуды наблюдалось на частотах, близких к критической частоте волновода «Земля–ионосфера». Этот процесс можно объяснить следующим образом: перед землетрясением увеличивается электронная концентрация в D- и E-областях ионосферы, что, в свою очередь, приводит к формированию рассеивающей неоднородности в волновом волновом «Земля–ионосфера», которая может рассеивать атмосферники, увеличивая амплитуду СКО. Повышение электронной концентрации может возникать за счет роста механических напряжений в земной коре и усиления трещинообразования, в результате чего увеличивается поток радиоактивных газов с поверхности Земли в атмосферу [30].

Исходя из предположения о возникновении рассеивающей неоднородности над эпицентральной областью будущего землетрясения, для выявления информационных признаков проявления тектонического процесса в электромагнитном РШФ КНЧ/ОНЧ-диапазонов необходим анализ широкополосных сигналов (от 0.3 до 30 кГц) с высоким спектральным разрешением (~ 1 Гц). Объем и сложность таких данных делают ручной анализ практически нереализуемым: требуется

обработка длительных временных рядов, выявление тонких корреляций между спектральными компонентами, учет фоновых шумов и антропогенных помех. Классические методы статистического анализа не позволяют в полной мере извлечь скрытые закономерности геофизических процессов. Поэтому применение нейросетевых алгоритмов становится не просто перспективным направлением, а объективной необходимостью. В современных исследованиях сейсмических процессов использование технологий искусственного интеллекта стало неотъемлемым элементом корректного научного доказательства [31–35]. Так, в работе [36] исследователи предложили использовать нейросети для автоматического обнаружения характерных сигнатур – упорядоченных импульсных последовательностей, которые предшествуют разрушению горных пород. Для решения этой задачи авторы разработали глубокую двунаправленную архитектуру искусственной нейронной сети на основе рекуррентных нейронов с блоками долгой краткосрочной памяти (Deer BI-LSTM), содержащую 1000 скрытых блоков. Выбор такой архитектуры был обусловлен ее способностью учитывать контекст как из «прошлого», так и из «будущего» в анализируемой последовательности данных, что критически важно для выявления закономерностей во временных рядах. Важно подчеркнуть, что разработчики не задавали сети поиск каких-то конкретных, предопределенных паттернов. Вместо этого сеть обучалась на двух наборах данных (LABset и AIRset), самостоятельно извлекая из них наиболее значимые для классификации признаки. Основной задачей сети была бинарная классификация: относить сигналы либо к категории RUPTURE (предвестники разрушения), либо к категории QUIET (шум, отсутствие предвестников).

Обработка и анализ сильно зашумленных нестационарных сигналов электромагнитной природы (а именно такие сигналы рассматриваются в настоящем исследовании) по-прежнему представляет собой нерешенную научную задачу. Одна из причин этого заключается в применении классических методов цифровой обработки сигналов для выявления характери-

стик системы, генерирующей сигнал. Такие методы предполагают ортогональное разложение цифрового ряда в специально подбираемом базисе (например, Фурье, Уолша-Адамара, Хаара и др.). Более адаптированные к обработке нестационарных сигналов методы спектрального разложения типа вейвлет-преобразований также являются методами подбора искусственных базисов. В результате подобных преобразований возникают фантомные признаки и трудно интерпретируемые графические проекции. Динамика литосферных КНЧ/ОНЧ-сигналов не может быть полностью описана системой дифференциальных уравнений, тем более что физика процесса происхождения таких сигналов до конца не ясна.

До недавнего времени, несмотря на большие архивы данных, накопленные лабораторией электромагнитных излучений ИКИР ДВО РАН, масштабный временной анализ был неосуществим в силу технических ограничений вычислительных средств. Внедрение алгоритмов машинного обучения с целью моделирования эволюции состояния системы электромагнитных волн приземной атмосферы позволило обойти эти ограничения. Известные преимущества этих методов определяются возможностью обрабатывать большие многомерные массивы данных, выявлять наиболее информативные параметры наблюдаемого процесса и автоматически находить приемлемые решения [31, 32]. В широком смысле машинное обучение открыло возможность автоматического обнаружения особенностей в массиве цифровых рядов и выявления неявных связей в них. Среди ключевых достоинств применения нейросетевых технологий в исследованиях, проводимых авторами, следует отметить возможность автоматического извлечения скрытых временных признаков. Слои нейросети автоматически обучаются выделять локальные нестационарные паттерны («всплески», «затухания»), а рекуррентные или одномерные свертки – глобальную временную динамику, что подтверждено практикой обработки нестационарных биомедицинских [37, 38], вибрационных и речевых [39] сигналов. Это особенно важно для сигналов с меняющейся во времени

частотой и амплитудой. Освоение мультипроцессорной технологии CUDA, позволяющей выполнять вычисления на графических ускорителях, позволило проводить моделирование долгосрочных и краткосрочных временных зависимостей в сейсмологии [40–42]. Внедрение современных механизмов внимания (Transformer, показано в [43]) позволяет эффективно выявлять корреляции между удаленными событиями в нестационарном сигнале, что критически важно для анализа трендов, прогнозирования сейсмических событий или обнаружения редких аномалий предвестников землетрясений. Это экспериментально подтверждено другими исследователями [44]. Для повышения робастности обработки ОНЧ-сигналов в условиях наличия выбросов и существенной изменчивости формы сигнала была применена архитектура ResNet. Пропускающие пути в ResNet способствовали стабильному обучению глубокой сети, тогда как Dropout снизил риск переобучения на аномальных примерах, а BatchNorm стабилизировал процесс обучения за счет нормализации входных данных каждого слоя. Синтез различных архитектур при подборе состава экспериментальной нейросети демонстрирует устойчивость к низкому отношению сигнал/шум (SNR) и индивидуальной вариативности сигнала, превосходя классические методы (CFARnet, вейвлет-пороги), что убедительно показано на примере [45, 46].

Методика исследования

Авторами разработана методика поиска информационных признаков, оригинальность которой заключена в формировании массива исходных данных в формате спектральной плотности мощности (СПМ) электромагнитного РШФ в виде трехмерной матрицы для последующей обработки с помощью нейронной сети. Исходными данными для преобразования являются временные ряды мгновенных значений напряженности магнитного и электрического полей, полученные путем оцифровки сигнала, принятого на антенный комплекс ОНЧ-пеленгатора ИКИР ДВО РАН

[47], который позволяет независимо регистрировать магнитную и электрическую компоненты излучения с частотой дискретизации 48 кГц. СПМ электромагнитного РШФ определяется с помощью преобразования Фурье в окне Чебышева длиной 48 000 отсчетов (что обусловлено спектральным разрешением, 1 Гц), с перекрытием 98 %. Временное разрешение составляет 1 мин., значение выбирается равным среднемедианной СПМ. Исходя из вышесказанного, суточные матрицы СПМ имеют размерность $24000 \times 1440 \times 3$ (Частота $\times$ Время $\times$ Цвет). Так как размерность матрицы слишком велика для использования в нейросетевых алгоритмах, она последовательно уменьшается с помощью бикубической интерполяции до размеров $256 \times 256 \times 3$. Для проведения экспериментов было собрано три группы изображений. Матрицы группы с именем «1_2m_lemi» соответствуют суткам до начала каждого из 29 сильных камчатских землетрясений из каталога землетрясений Камчатки в период с ноября 2016 по декабрь 2019 г. [48]. Матрицы группы «1_2p_lemi» соответствуют суткам после каждого из тех же 29 землетрясений. Матрицы группы «1_2n_lemi» собраны на 958 суточных интервалах, которые не были привязаны к сильным землетрясениям и по времени отстояли от этих событий не менее чем на 30 сут. Группам были назначены метки с соответствующими именами. Из каждой группы были подготовлены датасеты классов для обучения, валидации и тестирования.

На рис. 1 для примера представлены по три изображения каждой группы, выбранные случайным образом.

Для согласования с возможностями вычислений с применением технологии CUDA, реализованной на видеокарте NVIDIA 2080 с 8 Гб памяти, изображения были адаптированы до размерности $64 \times 64 \times 3$. В ходе предобработки изображений для сбалансированной работы нейросети число изображений выравнивали по классам с применением аугментации с циклическим смещением. Итоговое число изображений в классе «1_2m_lemi» – 1029 файлов, в классе «1_2n_lemi» – 1958 и в классе «1_2p_lemi» – 1029 файлов.

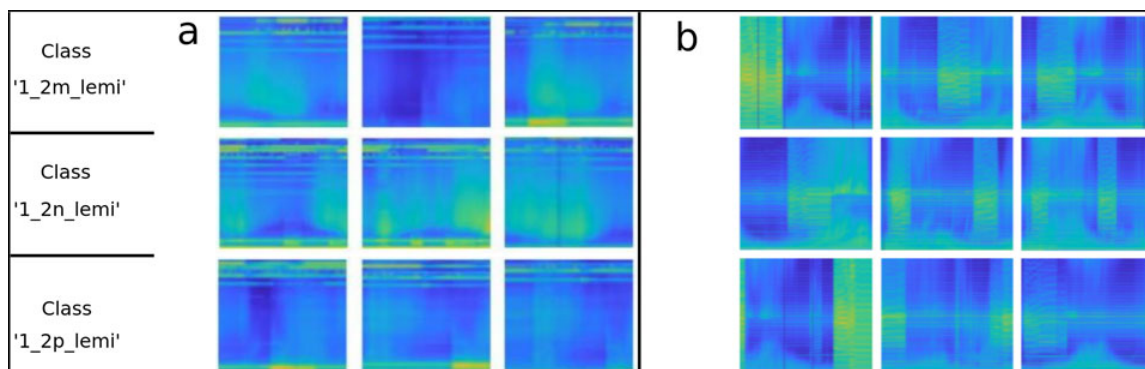


Рис. 1. Примеры изображений подготовленных классов: (а) диапазон 0.3–24 кГц, (б) диапазон 0.3–3 кГц.

Fig. 1. Examples of images of prepared classes: (a) range 0.3–24 kHz, (b) range 0.3–3 kHz.

Выбор инструмента анализа и результаты вычислений

Для обучения и классификации была собрана и оптимизирована архитектура на базе ResNet – сверточной нейросети с остаточными блоками. Блок-схема нейросети представлена на рис. 2.

Оптимизация структуры нейросети определялась последовательным подбором функциональных блоков получения лучших результатов при фиксированных глобальных параметрах обучения для каждой отредактированной структуры сети. В рамках найденной оптимальной структуры были определены следующие глобальные показатели: для

всех сверточных блоков функция активации выбрана relu, кроме выходного полносвязного блока, где выбрана функция softmax; компиляция сети выполнена с категорией sparse_categorical_crossentropy; сделано весовое выравнивание со значениями {0: 1.0, 1: 0.5255362614913177, 2: 1.0} в соответствии с представленными классами. Стартовые переменные обучения: шаг движения по выборке – batch_size = 32; число эпох обучения – epochs = 256; размер валидационной выборки – val = 0.3 (30 % валидации), размер тестовой выборки – test = 0.1 (10 % тестирование). Результаты обучения и классификации представлены нормированной матрицей ошибок сети на рис. 3.

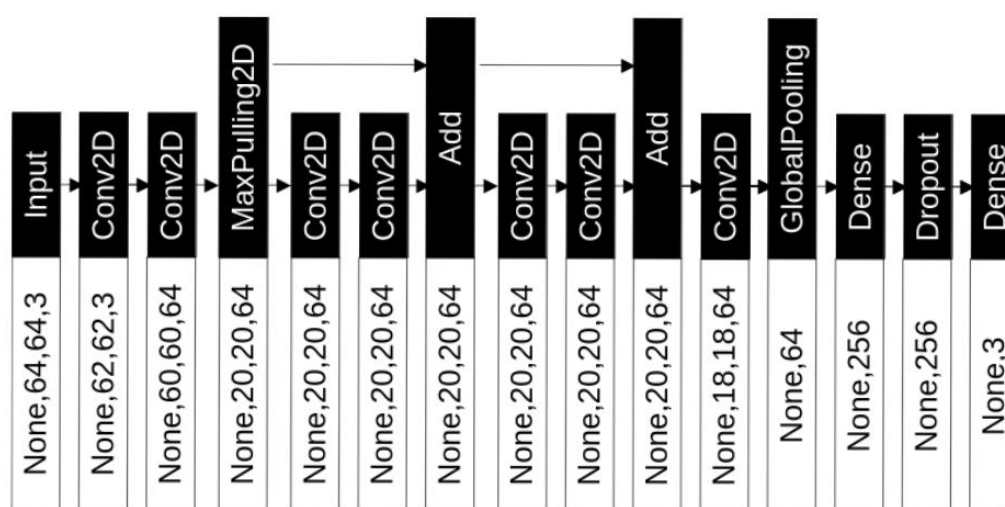


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной нейросети. На черном фоне обозначено функциональное назначение блока, на белом – размерности передаваемых тензоров.

Fig. 2. Flowchart of the experimental neural network. The black background indicates the functional purpose of the block, and the white background indicates the dimensions of the transmitted tensors.

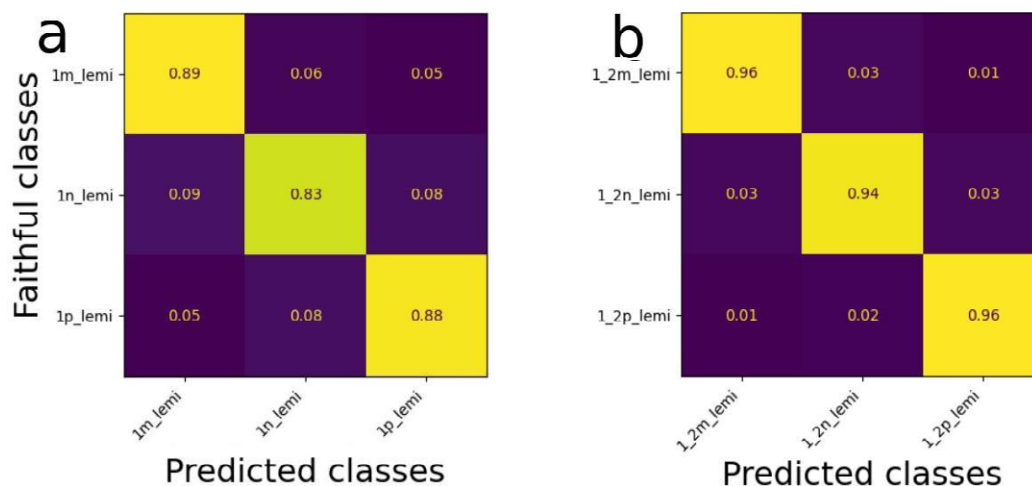


Рис. 3. Нормированные матрицы ошибок нейронной сети для датасетов: (а) диапазон 0.3–24 кГц, (б) диапазон 0.3–3 кГц.

Fig. 3. Normalized neural network error matrices for datasets: (a) 0.3–24 kHz range, (b) 0.3–3 kHz range.

В матрице ошибок по строкам представлены имена классов, которые объединяли изображения с заданными метками (априори). По столбцам обозначены классы, которые были определены нейронной сетью в результате классификации после обучения по данным тестовой выборки, взятой из исходного датасета. На главной диагонали (выделено желтым цветом) представлены значения доли верно распознанных классов. Остальные ячейки матрицы ошибок демонстрируют доли ошибочных решений из общего числа попыток классификации.

Первый вычислительный эксперимент проводился на датасете (рис. 1 а), основанном на диапазоне частот 0.3–24 кГц, данный выбор был продиктован возможностью получения дополнительных признаков, позволяющих определить предвестник землетрясения. При этом наибольшая доля ошибочных решений распознавания по классам составила 9 %. Затем, в соответствии с предположением о проявлении признаков предвестников, предложенным в работе [6], спектральный диапазон был уменьшен до значений 0.3–3 кГц, что снизило максимальную долю ошибочных решений распознавания до 3 %. Это можно интерпретировать следующим образом. Основные информационные признаки предвестников землетрясений в электромагнитном РШФ ОНЧ-диапазона сосредоточены на частотах вблизи частоты отсечки волновода «Земля–ионосфера». При

попытке увеличить диапазон частот возникает избыточность данных, которая сглаживает пространство признаков и не позволяет однозначно выявить информативные.

Заключение

Проведенный краткий обзор и анализ известных исследований в области физики ОНЧ-излучения позволил сформулировать и обосновать подход к решению проблемы поиска информативных признаков предвестников сейсмических событий. Приведены факты, указывающие на существование физической связи между энергетическими характеристиками электромагнитных ОНЧ-сигналов и сейсмическими событиями. Отмечены временные границы между выявляемыми аномалиями электромагнитного РШФ ОНЧ-диапазона и моментами возникновения землетрясений, что послужило мотивацией к поиску маркеров предвестников сейсмических событий.

Основными препятствиями для выделения устойчивых признаков проявления аномалий в электромагнитном РШФ ОНЧ-диапазона были размытость их временных границ и сильная зашумленность ОНЧ-диапазона, что практически не позволяло эффективно применять классические методы спектральной и статистической обработки данных. Кроме того, в ходе мониторинга ОНЧ-излучений эпизодически

наблюдались энергетические всплески сигнала, причиной которых могли быть явления, не связанные с землетрясениями, что существенно искажало картину связи наблюдаемых аномалий с землетрясениями.

Особенности, обнаруженные в ходе визуального анализа почасовых СКО ОНЧ-сигнала, наблюдаемых в пределах краткосрочных периодов (от 1 до 15 сут) перед началом сильных камчатских землетрясений, натолкнули авторов на разработку метода поиска параметрического сходства и различия обнаруживаемых аномалий сигнала. Такая методика была разработана на базе нейронной сети глубокого обучения и апробирована на данных электромагнитных наблюдений ИКИР ДВО РАН и открытых данных сейсмических наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН.

Основной особенностью методики является подготовка исходных ОНЧ-сигналов в виде изображений, отражающих динамику параметров сигнала на временных участках, охватывающих наиболее вероятные временные границы наблюдаемых аномалий сигнала. С использованием разработанной методики были подготовлены массивы изображений, каждое из которых либо охватывало динамику параметров ОНЧ-сигнала на временном участке, непосредственно примыкающем к началу землетрясений, либо относилось к изображениям, охватывающим временные участки на значительном удалении от начала землетрясений. Таким образом, созданные классы изображений включали в себя большой объем информации, которая потенциально могла быть распознана с помощью чувствительного идентификатора. Оба класса были преобразованы в тензоры исходного датасета для работы нейросетевого классификатора.

Архитектура созданной нейронной сети была подобрана таким образом, чтобы классифицировать изображения. Это потребовало определенных приемов оптимизации сверточной сети с остаточными блоками, которая на момент написания статьи является признанным лидером распознавания образов.

Результаты проведенного исследования показали значительное отличие изображений,

отображающих характеристики аномалий, связанных с землетрясениями, от изображений, отражающих характеристики аномалий, которые были получены на большом временном удалении от моментов начала сильных камчатских землетрясений. Этот факт убедительно указывает на наличие опосредованной связи характеристик ОНЧ-излучения с землетрясениями. Дальнейшее увеличение базы изображений в ходе планового мониторинга ОНЧ-излучения позволит повысить статистическую достоверность полученного результата.

Информативными признаками, на базе которых можно будет продолжить исследование по формированию маркеров предвестников землетрясений, являются скрытые паттерны изображений, отображающих динамику параметров ОНЧ-сигнала.

Список литературы

1. Вершинин Е.Ф. *Низкочастотные шумовые излучения внешней ионосферы и магнитосферы*: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Иркутск, 1983, 28 с.
2. Вершинин Е.Ф., Пономарев Е.А. О классификации непрерывного УНЧ излучения верхней атмосферы. В кн.: *Земной магнетизм, полярные сияния и ультранизкочастотное излучение*. Иркутск: СибИЗМИР, 1966, с. 35–43.
3. Дружин Г.И., Торопчинова Т.В., Шапаев В.И. Регулярный шумовой фон в ОНЧ-излучении и мировые очаги гроз. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1986, 26(2):258.
4. Дружин Г.И. Суточные периоды в ОНЧ излучении и связь их с рентгеновским излучением. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2015, 8-2(39):98–101.
5. *Низкочастотные излучения в ионосфере и магнитосфере Земли*. Распопов О.М. (ред.). Апатиты: Кол. фил. АН СССР, 1981, 167 с.
6. Дружин Г.И. Опыт прогноза камчатских землетрясений на основе наблюдений за электромагнитным ОНЧ излучением. *Вулканология и сейсмология*. 2002, 6:51–62.
7. Asada T., Baba H., Kawazoe K., Sugiura M. An attempt to delineate very low frequency electromagnetic signals associated with earthquakes. *Earth, Planets and Space*. 2001, 53:55–62. <https://doi.org/10.1186/BF03352362>
8. Eftaxias K., Kapiris P., Polygiannakis J., Peratzakis A., Kopanas J., Antonopoulos G., Rigas D. Experience of

- short term earthquake precursors with VLF-VHF electromagnetic emissions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2002,20:1–12. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-217-2003>
9. Hayakawa M. Earthquake prediction with electromagnetic phenomena. *AIP Conference Proceedings*. 2016,17090(20002). <https://doi.org/10.1063/1.4941201>
 10. Уваров В.Н. Характерные формы электромагнитных сигналов. *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*. 2018,2(22):112–127. <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-22-2-112-127>
 11. Gershenzon N., Bambakidis G. Modeling of seismic-electromagnetic phenomena. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2001,3(4):247–275. <https://doi.org/10.2205/2001ES000058>
 12. Wang J.-H. Piezoelectricity as a mechanism on generation of electromagnetic precursors before earthquakes. *Geophysical Journal International*. 2020,224(1):682–700. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa429>
 13. Zhao J., Gao Y., Cheng Q., Zhou G., Chen C.-H., Zhang X., Sun Y.-Y. Numerical simulation of electromagnetic responses to an earthquake source due to the piezoelectric effect of ‘ ∞ m’ symmetry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2024,129(5),e2023JB027756. <https://doi.org/10.1029/2023JB027756>
 14. Wang W., Xue X., Shan J. Theoretical models of seismic electromagnetic radiation based on piezoelectric effects. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*. 2015,44(9):1275–1281.
 15. Surkov V.V., Molchanov O.A., Hayakawa M. Pre-earthquake ULF electromagnetic perturbations as a result of inductive seismomagnetic phenomena during microfracturing. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2003(2002),65(1):31–46. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00117-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00117-7)
 16. Salikhov N., Shepetov A., Pak G., Nurakynov S., Ryabov V., Zhukov V. Seismogenic effects in variation of the ULF/VLF emission in a complex study of the lithosphere–ionosphere coupling before an M6.1 earthquake in the region of Northern Tien Shan. *Geosciences*. 2025,15(6):203. <https://doi.org/10.3390/geosciences15060203>
 17. Park S.K. Precursors to earthquakes: Seismoelectromagnetic signals. *Surveys in Geophysics*. 1996,17:493–516. <https://doi.org/10.1007/BF01901642>
 18. Park S.K., Johnston M.J.S., Madden T.R., Morgan F.D., Morrison H.F. Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: a review of observations and mechanisms. *Reviews of Geophysics*. 1993,31:117–132. <https://doi.org/10.1029/93RG00820>
 19. Nagao T., Enomoto Y., Fujinawa Y., Hata M., Hayakawa M., Huang Q., Izutsu J., Kushida Y., Maeda K., Oike K., Uyeda S., Yoshino T. Electromagnetic anomalies associated with 1995 Kobe earthquake. *Journal of Geodynamics*. 2002,33:349–359. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(02\)00004-2](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(02)00004-2)
 20. Enomoto Y., Zheng Z. Possible evidences of earthquake lightning accompanying the 1995 Kobe earthquake inferred from the Nojima Fault Gouge. *Geophysical Research Letters*. 1998,25:2721–2724. <https://doi.org/10.1029/98GL02015>
 21. Hayakawa M., Hobara Y., Ohta K., et al. The ultra-low-frequency magnetic disturbances associated with earthquakes. *Earthquake Science*. 2011,24:523–534. <https://doi.org/10.1007/s11589-011-0814-2>
 22. Devi M., Barbara A.K., Ruzhin Ya.Yu., Hayakawa M. Over-the-horizon anomalous VHF propagation and earthquake precursors. *Surveys in Geophysics*. 2012,33(5):1081–1106. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9185-z>
 23. Hayakawa M., Itoh T., Hattori K., Yumoto K. ULF electromagnetic precursors for an earthquake at Biak, Indonesia on 17 February 1996. *Geophysical Research Letters*. 2000,27:1531–1534. <https://doi.org/10.1029/1999GL005432>
 24. Ida Y., Yang D., Li Q., Sun H., Hayakawa M. Detection of ULF electromagnetic emissions as a precursor to an earthquake in China with an improved polarization analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2008,8:775–777. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-775-2008>
 25. Johnston M.J.S. Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity. *Surveys in Geophysics*. 1997,18:441–475. <https://doi.org/10.1023/a:1006500408086>
 26. Shvets A.V., Hayakawa M., Molchanov O.A., et al. A study of ionospheric response to regional seismic activity by VLF radio sounding. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2004,29:627–637. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.08.063>
 27. Hayakawa M. Review of subionospheric VLF/LF radio signals for the study of seismogenic lower-ionospheric perturbations. *Atmosphere*. 2025,16(11):1312. <https://doi.org/10.3390/atmos16111312>
 28. Uyeda S., Nagao T., Hattori K., Hayakawa M., Miyaki K., Molchanov O., Gladyshev V., Baransky L., Chhtchekotov A., Fedorov E., Pokhotelov O., Andreevsky S., Rozhnoi A., Khabazin Y., Gorbaticov A., Gordeev E., Chebrov V., Sinitzin V., Lutikov A., Yunga S., Kosarev G., Surkov V., Belyaev G. Geophysical observatory in Kamchatka region for monitoring of phenomena connected with seismic activity. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2001,1:3–7. <https://doi.org/10.5194/nhess-1-3-2001>

29. Gokhberg M.B., Gufeld I.L., Rozhnoy A.A., Marenko V.F., Yampolsky V.S., Ponomarev E.A. Study of seismic influence on the ionosphere by super long-wave probing of the Earth-ionosphere wave-guide. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1989,57:64–67. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(89\)90214-8](https://doi.org/10.1016/0031-9201(89)90214-8)
30. Бузевич А.В., Дружин Г.И., Фирстов П.П. и др. Гелиогеофизические эффекты, предвалявшие Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. В кн.: *Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г. Предвестники, особенности, последствия*. Петропавловск-Камчатский, 1999, с. 177–188.
31. Hulbert C., Rouet-Leduc B., Johnson P.A., Ren C.X., Rivière J., Bolton D.C., Marone C. Similarity of fast and slow earthquakes illuminated by machine learning. *Nature Geoscience*. 2018,12:69–74. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0272-8>
32. Rouet-Leduc B., Hulbert C., Lubbers N., Barros K., Humphreys C.J., Johnson P.A. Machine learning predicts laboratory earthquakes. *Geophysical Research Letters*. 2017,44(18):9276–9282. <https://doi.org/10.1002/2017GL074677>
33. Pu Y., Apel D.B., Wei C. Applying machine learning approaches to evaluating rockburst liability: A comparison of generative and discriminative models. *Pure and Applied Geophysics*. 2019,176:4503–4517. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02197-1>
34. Mousavi S.M., Horton S.P., Langston C.A., Samei B. Seismic features and automatic discrimination of deep and shallow induced-microearthquakes using neural network and logistic regression. *Geophysical Journal International*. 2016,207(1):29–46. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw258>
35. Sharma M., Arora M. Prediction of seismicity cycles in the Himalayas using artificial neural network. *Acta Geophysica Polonica*. 2005,53(3):299–309.
36. Nardi A., Pignatelli A., Spagnuolo E. A neural network based approach to classify VLF signals as rock rupture precursors. *Scientific Reports*. 2022,12,13744. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17803-x>
37. Lawhern V.J., Solon A.J., Waytowich N.R., et al. EEGNet: a compact convolutional neural network for EEG-based brain-computer interfaces. *Journal of Neural Engineering*. 2018,15(5),056013. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aace8c>
38. Ince T., Kiranyaz S., Gabbouj M.A. Generic and robust system for automated patient-specific classification of ECG signals. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2009,56(5):1415–1426. [doi:10.1109/TBME.2009.2013934](https://doi.org/10.1109/TBME.2009.2013934)
39. Graves A., Mohamed A.R., Hinton G. Speech recognition with deep recurrent neural networks. In: *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2013, p. 6645–6649. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2013.6638947>
40. Bergen K.J., Johnson P.A., de Hoop M.V., Beroza G.C. Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience. *Science*. 2019,363(6433). <https://doi.org/10.1126/science.aau0323>
41. Kong Q., Trugman D.T., Ross Z.E., Bianco M.J., Meade B.J., Gerstoft P. Machine learning in seismology: turning data into insights. *Seismological Research Letters*. 2018,90(1):3–14. <https://doi.org/10.1785/0220180259>
42. Никитин В.В., Дучков А.А., Андерссон Ф. Применение NVidia CUDA для ускорения обработки сейсмических данных при помощи разложения по волновым пакетам. *Вычислительные методы и программирование*. 2017,18(3):293–311.
43. Wu N., Green B., Ben X., O'Banion S. Deep transformer models for time series forecasting: the influenza prevalence case. *arXiv*. 2020. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.08317>
44. Perol T., Gharbi M., Denolle M. Convolutional neural network for earthquake detection and location. *Science Advances*. 2018,4(2),e1700578. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700578>
45. Eftorov A., Dolenko S. A new type of a wavelet neural network. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2018,27(3):152–160. <https://doi.org/10.3103/s1060992x18030050>
46. Eftorov A., Dolenko S.A., Dolenko T. Use of wavelet neural networks to solve inverse problems in spectroscopy of multi-component solutions. *Studies in Computational Intelligence*. 2020,856:285–294. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30425-6_33
47. Малкин Е.И., Дружин Г.И. Аппаратно-программный комплекс и методика наблюдений ОНЧ–излучений на Камчатке. *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*. 2025,51(2):122–141. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2025-51-2-122-141>
48. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 г. – наст. вр.). *Единая информационная система сейсмологических данных КФ ФИЦ ЕГС РАН*. URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (дата обращения: 12.05.2026).

References

1. Vershinin E.F. [Low-frequency noise emissions of the outer ionosphere and magnetosphere]: extended abstr. of diss. ... Dr. of Sci. (Physics and Mathematics). Irkutsk, 1983, 28 p. (In Russ.).
2. Vershinin E.F., Ponomarev E.A. [On classification of continuous ULF radiation of the upper atmosphere].

- In: *Terrestrial magnetism, auroras and ultra-low-frequency radiation*. Irkutsk: SibIZMIR, 1966, p. 35–43. (In Russ.).
3. Druzhin G.I., Toropchinova T.V., Shapaev V.I. Regular noise background in VLF radiation and world thunderstorm centers. *Geomagnetizm i aeronomiya = Geomagnetism and Aeronomy*. 1986,26(2):258. (In Russ.).
 4. Druzhin G.I. Daily periods in VLF radiation and their connection with X-ray. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Research Journal*. 2015,8-2(39):98–102. (In Russ.).
 5. Raspopov O.M. (ed.) [*Low-frequency emissions in the Earth's ionosphere and magnetosphere*]. Apatity: Kol. fil. AN SSSR, 1981, 167 p. (In Russ.).
 6. Druzhin G.I. Experience of Kamchatka earthquake prediction based on observations of electromagnetic VLF radiation. *Vulkanologiya i seysmologiya = Volcanology and Seismology*. 2002,6:51–62. (In Russ.).
 7. Asada T., Baba H., Kawazoe K., Sugiura M. An attempt to delineate very low frequency electromagnetic signals associated with earthquakes. *Earth, Planets and Space*. 2001,53:55–62. <https://doi.org/10.1186/BF03352362>
 8. Eftaxias K., Kaporis P., Polygiannakis J., Peratzakis A., Kopanas J., Antonopoulos G., Rigas D. Experience of short term earthquake precursors with VLF-VHF electromagnetic emissions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2002,20:1–12. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-217-2003>
 9. Hayakawa M. Earthquake prediction with electromagnetic phenomena. *AIP Conference Proceedings*. 2016,17090(20002). <https://doi.org/10.1063/1.4941201>
 10. Uvarov V.N. Characteristic patterns of electromagnetic manifestation of lithosphere dynamics. *Vestnik KRAUNTs. Fiziko-matematicheskiye nauki = Bulletin of KRAESC. Physical and Mathematical Sciences*. 2018,2(22):112–127. (In Russ.).
 11. Gershenzon N., Bambakidis G. Modeling of seismo-electromagnetic phenomena. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2001,3(4):247–275. <https://doi.org/10.2205/2001ES000058>
 12. Wang J.-H. Piezoelectricity as a mechanism on generation of electromagnetic precursors before earthquakes. *Geophysical Journal International*. 2020,224(1):682–700. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa429>
 13. Zhao J., Gao Y., Cheng Q., Zhou G., Chen C.-H., Zhang X., Sun Y.-Y. Numerical simulation of electromagnetic responses to an earthquake source due to the piezoelectric effect of '∞m' symmetry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2024,129(5),e2023JB027756. <https://doi.org/10.1029/2023JB027756>
 14. Wang W., Xue X., Shan J. Theoretical models of seismic electromagnetic radiation based on piezoelectric effects. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*. 2015,44(9):1275–1281.
 15. Surkov V.V., Molchanov O.A., Hayakawa M. Pre-earthquake ULF electromagnetic perturbations as a result of inductive seismomagnetic phenomena during microfracturing. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2003(2002),65(1):31–46. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00117-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00117-7)
 16. Salikhov N., Shepetov A., Pak G., Nurakynov S., Ryabov V., Zhukov V. Seismogenic effects in variation of the ULF/VLF emission in a complex study of the lithosphere-ionosphere coupling before an M6.1 earthquake in the region of Northern Tien Shan. *Geosciences*. 2025,15(6):203. <https://doi.org/10.3390/geosciences15060203>
 17. Park S.K. Precursors to earthquakes: Seismoelectromagnetic signals. *Surveys in Geophysics*. 1996,17:493–516. <https://doi.org/10.1007/BF01901642>
 18. Park S.K., Johnston M.J.S., Madden T.R., Morgan F.D., Morrison H.F. Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: a review of observations and mechanisms. *Reviews of Geophysics*. 1993,31:117–132. <https://doi.org/10.1029/93RG00820>
 19. Nagao T., Enomoto Y., Fujinawa Y., Hata M., Hayakawa M., Huang Q., Izutsu J., Kushida Y., Maeda K., Oike K., Uyeda S., Yoshino T. Electromagnetic anomalies associated with 1995 Kobe earthquake. *Journal of Geodynamics*. 2002,33:349–359. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(02\)00004-2](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(02)00004-2)
 20. Enomoto Y., Zheng Z. Possible evidences of earthquake lightning accompanying the 1995 Kobe earthquake inferred from the Nojima Fault Gouge. *Geophysical Research Letters*. 1998,25:2721–2724. <https://doi.org/10.1029/98GL02015>
 21. Hayakawa M., Hobara Y., Ohta K., et al. The ultra-low-frequency magnetic disturbances associated with earthquakes. *Earthquake Science*. 2011,24:523–534. <https://doi.org/10.1007/s11589-011-0814-2>
 22. Devi M., Barbara A.K., Ruzhin Ya.Yu., Hayakawa M. Over-the-horizon anomalous VHF propagation and earthquake precursors. *Surveys in Geophysics*. 2012,33(5):1081–1106. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9185-z>
 23. Hayakawa M., Itoh T., Hattori K., Yumoto K. ULF electromagnetic precursors for an earthquake at Biak, Indonesia on 17 February 1996. *Geophysical Research Letters*. 2000,27:1531–1534. <https://doi.org/10.1029/1999GL005432>
 24. Ida Y., Yang D., Li Q., Sun H., Hayakawa M. Detection of ULF electromagnetic emissions as a precursor to

- an earthquake in China with an improved polarization analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2008,8:775–777. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-775-2008>
25. Johnston M.J.S. Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity. *Surveys in Geophysics*. 1997,18:441–475. <https://doi.org/10.1023/a:1006500408086>
26. Shvets A.V., Hayakawa M., Molchanov O.A., et al. A study of ionospheric response to regional seismic activity by VLF radio sounding. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2004,29:627–637. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.08.063>
27. Hayakawa M. Review of subionospheric VLF/LF radio signals for the study of seismogenic lower-ionospheric perturbations. *Atmosphere*. 2025,16(11):1312. <https://doi.org/10.3390/atmos16111312>
28. Uyeda S., Nagao T., Hattori K., Hayakawa M., Miyaki K., Molchanov O., Gladyshev V., Baransky L., Chitchekov A., Fedorov E., Pokhotelov O., Andreevsky S., Rozhnoi A., Khabazin Y., Gorbatiykov A., Gordeev E., Chebrov V., Sinitsyn V., Lutikov A., Yunga S., Kosarev G., Surkov V., Belyaev G. Geophysical observatory in Kamchatka region for monitoring of phenomena connected with seismic activity. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2001,1:3–7. <https://doi.org/10.5194/nhess-1-3-2001>
29. Gokhberg M.B., Gufeld I.L., Rozhnoy A.A., Marenko V.F., Yampolsky V.S., Ponomarev E.A. Study of seismic influence on the ionosphere by super long-wave probing of the Earth-ionosphere wave-guide. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1989,57:64–67. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(89\)90214-8](https://doi.org/10.1016/0031-9201(89)90214-8)
30. Buzevich A.V., Druzhin G.I., Firstov P.P., et al. Heliogeophysical effects preceding the Kronotskoye earthquake of December 5, 1997. In: [*Kronotskoye earthquake in Kamchatka on December 5, 1997. Precursors, features, consequences*]. Petropavlovsk-Kamchatsky, 1999, p. 177–188. (In Russ.).
31. Hulbert C., Rouet-Leduc B., Johnson P.A., Ren C.X., Rivière J., Bolton D.C., Marone C. Similarity of fast and slow earthquakes illuminated by machine learning. *Nature Geoscience*. 2018,12:69–74. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0272-8>
32. Rouet-Leduc B., Hulbert C., Lubbers N., Barros K., Humphreys C.J., Johnson P.A. Machine learning predicts laboratory earthquakes. *Geophysical Research Letters*. 2017,44(18):9276–9282. <https://doi.org/10.1002/2017GL074677>
33. Pu Y., Apel D.B., Wei C. Applying machine learning approaches to evaluating rockburst liability: A comparison of generative and discriminative models. *Pure and Applied Geophysics*. 2019,176:4503–4517. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02197-1>
34. Mousavi S.M., Horton S.P., Langston C.A., Samei B. Seismic features and automatic discrimination of deep and shallow induced-microearthquakes using neural network and logistic regression. *Geophysical Journal International*. 2016,207(1):29–46. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw258>
35. Sharma M., Arora M. Prediction of seismicity cycles in the Himalayas using artificial neural network. *Acta Geophysica Polonica*. 2005,53(3):299–309.
36. Nardi A., Pignatelli A., Spagnuolo E. A neural network based approach to classify VLF signals as rock rupture precursors. *Scientific Reports*. 2022,12,13744. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17803-x>
37. Lawhern V.J., Solon A.J., Waytowich N.R., et al. EEGNet: a compact convolutional neural network for EEG-based brain-computer interfaces. *Journal of Neural Engineering*. 2018,15(5),056013. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aace8c>
38. Ince T., Kiranyaz S., Gabbouj M.A. Generic and robust system for automated patient-specific classification of ECG signals. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2009,56(5):1415–1426. doi:10.1109/TBME.2009.2013934
39. Graves A., Mohamed A.R., Hinton G. Speech recognition with deep recurrent neural networks. In: *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2013, p. 6645–6649. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2013.6638947>
40. Bergen K.J., Johnson P.A., de Hoop M.V., Beroza G.C. Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience. *Science*. 2019,363(6433). <https://doi.org/10.1126/science.aau0323>
41. Kong Q., Trugman D.T., Ross Z.E., Bianco M.J., Meade B.J., Gerstoft P. Machine learning in seismology: turning data into insights. *Seismological Research Letters*. 2018,90(1):3–14. <https://doi.org/10.1785/0220180259>
42. Nikitin V.V., Duchkov A.A., Andersson F. Using NVidia CUDA to accelerate seismic data processing via wavelet packet decomposition. *Vychislitel'nyye metody i programirovaniye = Numerical Methods and Programming*. 2017,18(3):293–311. (In Russ.).
43. Wu N., Green B., Ben X., O'Banion S. Deep transformer models for time series forecasting: the influenza prevalence case. *arXiv*. 2020. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.08317>
44. Perol T., Gharbi M., Denolle M. Convolutional neural network for earthquake detection and location. *Science Advances*. 2018,4(2),e1700578. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700578>

45. Efitorov A., Dolenko S. A new type of a wavelet neural network. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2018,27(3):152–160. <https://doi.org/10.3103/s1060992x18030050>
46. Efitorov A., Dolenko S.A., Dolenko T. Use of wavelet neural networks to solve inverse problems in spectroscopy of multi-component solutions. *Studies in Computational Intelligence*. 2020,856:285–294. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30425-6_33
47. Malkin E.I., Druzhin G.I. Hardware-software system and method of observing VLF radiation in Kamchatka. *Vestnik KRAUNTs. Fiziko-matematicheskiye nauki = Bulletin of KRAESC. Physical and Mathematical Sciences*. 2025,51(2):122–141. (In Russ.). <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2025-51-2-122-141>
48. Catalogue of earthquakes of Kamchatka and the Commander Islands (1962 – present). *Unified Information System of Seismological Data of KS FRC EGS RAS*. (In Russ.). URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (accessed 12.05.2026).

Об авторах

Сотрудники Института космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения РАН, пос. Паратунка, Россия:

Сенкевич Юрий Игоревич, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории акустических исследований, senkevich@ikir.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0875-6112>; SPIN-код: 6880-9105

✉ **Малкин Евгений Ильич**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории электромагнитных излучений, malkin@ikir.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8037-1335>; SPIN-код: 7640-8813

Дружин Геннадий Иванович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электромагнитных излучений, drug.ikir@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1009-1044>; SPIN-код: 6026-1734

Поступила 27.05.2026

Принята к публикации 17.06.2026

About the Authors

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

Senkevich, Yuriy I., Doctor in Engineering, Associate Professor, Leading Researcher at the Laboratory of Acoustic Research, senkevich@ikir.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0875-6112>

✉ **Malkin, Evgeny I.**, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Researcher at the Laboratory of Electromagnetic Radiation, malkin@ikir.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8037-1335>

Druzhin, Gennady I., Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher at the Laboratory of Electromagnetic Radiation, drug.ikir@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1009-1044>

Received 27 May 2026

Accepted 17 June 2026

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



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

УДК 004.89:004.855.5:550.385

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.0.mfi-384>

<https://www.elibrary.ru/xkpbmf>

Опубликована online 17.04.2026

Методика восстановления пропусков в вариациях геомагнитного поля на основе алгоритмов kNN и MICE

С. А. Имашев

Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия

Резюме. В статье представлены методы восстановления пропусков в геомагнитных данных, которые основаны на алгоритмах k-ближайших соседей (k-Nearest Neighbors, kNN) и многократного заполнения пропусков методом цепных уравнений (Multiple Imputation by Chained Equations, MICE). Анализ эффективности алгоритмов проведен на данных сети геомагнитного мониторинга Научной станции РАН по двум типам событий: регулярным Sq-вариациям и геомагнитным бурям. Согласно полученным результатам, алгоритм kNN демонстрирует хорошую точность при восстановлении регулярных вариаций с показателем MAE ≤ 0.4 нТл (Mean Absolute Error – средняя абсолютная ошибка), но его точность значительно снижается в условиях магнитных бурь (MAE = 5.7 нТл). Алгоритм MICE лучше справляется с обработкой пропусков в таких сложных условиях, снижая MAE до 1.1 нТл за счет учета межстанционных корреляций. Комбинированный подход, в котором используется алгоритм kNN для предварительного восстановления пропусков, а MICE – для последующего уточнения, показал эффективность как при заполнении пропусков в данных самой удаленной станции, так и при устранении импульсных выбросов в данных. Кроме того, показано, что предложенный подход может применяться для анализа магнитных возмущений, регистрируемых на близлежащей станции и вызванных работой установки ЭРГУ-600. Полученные результаты подтверждают возможности предложенных методов машинного обучения для автоматизации анализа многомерной информации, что особенно актуально при обработке больших массивов геомагнитных данных.

Ключевые слова: геомагнитные данные, восстановление пропусков, машинное обучение, алгоритм kNN, алгоритм MICE, магнитные бури, устранение выбросов

A methodology for imputing missing values in geomagnetic field variations using kNN and MICE algorithms

Sanjar A. Imashev

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

Abstract. The study presents methods for filling missing values in geomagnetic data based on the k-Nearest Neighbors (kNN) algorithm and Multiple Imputation by Chained Equations (MICE). The effectiveness of these algorithms was analyzed using data from the geomagnetic monitoring network of the Research Station of the RAS, focusing on two types of events: regular Sq-variations and geomagnetic storms. According to the results, the kNN algorithm demonstrates high accuracy in reconstructing regular variations with a Mean Absolute Error (MAE) of ≤ 0.4 nT. However, its accuracy significantly decreases during geomagnetic storms (MAE = 5.7 nT). In contrast, the MICE algorithm performs better in these challenging conditions, reducing the MAE to 1.1 nT by leveraging correlations between monitoring stations. A combined approach, utilizing kNN for preliminary imputation followed by MICE for refinement, proved effective both for filling missing values at the remote Karagai-Bulak station and for addressing impulsive outliers in the data. Additionally, it was shown that the proposed approach can be applied to analyze magnetic disturbances recorded at a nearby sta-

tion caused by the operation of the ERGU-600 system. The results confirm the potential of the methods to automate the analysis of multidimensional data, which is particularly crucial when working with large volumes of geomagnetic data.

Keywords: geomagnetic data, missing value imputation, machine learning, kNN algorithm, MICE algorithm, magnetic storms, outlier removal

Финансирование и благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке (тема № 1025032800066-3-1.5.1).

Автор благодарит уважаемых рецензентов за полезные замечания, которые помогли улучшить текст этой статьи.

Funding and Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the state task of the Research Station of RAS in Bishkek (No. 1025032800066-3-1.5.1).

Author thanks the respected Reviewers for helpful comments that improved the quality of this manuscript.

Для цитирования: Имашев С.А. Методика восстановления пропусков в вариациях геомагнитного поля на основе алгоритмов kNN и MICE. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 2, 384, с. 238–260. URL: <http://journal.imgg.ru/web/full/f2026-0-384.pdf>; <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.0.mfi-384>; <https://www.elibrary.ru/xkpbmf>

For citation: Imashev S.A. A methodology for imputing missing values in geomagnetic field variations using kNN and MICE algorithms. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 2, Article 384, p. 238–260. (In Russ.). URL: <http://journal.imgg.ru/web/full/f2026-0-384.pdf>; <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.0.mfi-384>; <https://www.elibrary.ru/xkpbmf>

Введение

Пропуски в данных являются характерной особенностью реальных геофизических временных рядов [1, 2]. Основными причинами таких пропусков могут быть технические сбои оборудования или программного обеспечения, экстремальные погодные условия, нестабильность связи, внешние помехи и шумы, а также человеческий фактор [2, 3]. Эти проблемы создают дополнительные трудности для анализа, особенно при работе с геомагнитными временными рядами [4].

Необходимость восстановления пропусков данных, в частности геомагнитных, обусловлена несколькими причинами. Во-первых, непрерывность временных рядов важна для корректного анализа трендов, сезонных колебаний и других характеристик геомагнитного поля. Отсутствующие значения в данных могут привести к их искажению, что затрудняет анализ результатов и приводит к некорректной интерпретации. Во-вторых, многие методы обработки временных рядов, такие как спектральный анализ, фильтрация или моделирование временных рядов (например, сезонное разложение и ARIMA), требуют непрерывности данных для корректной работы. Пропуски также могут снижать точность моделей

машинного обучения, включая искусственные нейронные сети, что негативно сказывается на прогнозировании и классификации различных аномалий.

Разрывы временного ряда не только искажают корреляции между характеристиками геомагнитного поля на различных станциях, но и усложняют анализ его пространственной структуры. Так, сложная структура суточных вариаций геомагнитного поля, особенно в условиях внешних возмущающих факторов, таких как геомагнитные бури, сильно ограничивает эффективность традиционных методов восстановления, включая интерполяцию и статистические модели, которые оказываются недостаточно точными при наличии продолжительных пропусков [5]. Эти ограничения показывают необходимость разработки более эффективных методов восстановления данных, учитывающих специфику геофизических наблюдений.

Развитие алгоритмов машинного обучения привело к появлению новых методов восстановления пропусков во временных рядах [6, 7]. Например, в работе [8] показано, что нейронные сети могут успешно восстанавливать данные отдельных магнитных обсерваторий, используя информацию от других станций. В работе [5] для заполнения пропусков

использовали корреляцию соседних фрагментов временного ряда с аналогичными данными за прошлые годы при условии, что магнитная активность (значения K_p -индекса) в восстанавливающих данных была идентичной наблюдаемой в исследуемые сутки. Однако эффективность этого метода имеет свои ограничения: например, при длительности пропусков более 120 мин среднеквадратичная ошибка (MSE) начинает превышать 1.2 нТл. Также важно отметить, что метод работает корректно в условиях спокойной магнитосферы. В условиях геомагнитной активности с $K_p > 3$ погрешность восстановления возрастает до 35 нТл, что снижает эффективность метода. Это подчеркивает необходимость разработки более универсальных подходов, способных выполнять восстановление данных при различных внешних условиях.

В работе [9] предложена модификация классического метода сезонного разложения для анализа и выявления аномалий различных масштабов в вариациях геомагнитного поля. В частности, для выделения магнитной бури с помощью остаточной компоненты вариаций геомагнитного поля участок, содержащий возмущение, сначала заполняется пропусками, а затем восстанавливается на основе усредненного суточного профиля, рассчитанного по фрагментам с обеих сторон пропусков. Однако данный метод корректен только при работе с регулярными Sq-вариациями в условиях

отсутствия внешних возмущений. Это связано с тем, что сезонное разложение основывается на периодической составляющей временного ряда, которая может быть искажена в присутствии магнитных бурь [9].

Таким образом, задача восстановления пропусков в случае регулярных Sq-вариаций и в периоды магнитных бурь диктует необходимость разработки новой методики. Целью настоящей работы является оценка эффективности алгоритмов машинного обучения для восстановления пропущенных значений в данных сети геомагнитного мониторинга, проводимого Научной станцией РАН (НС РАН) [10, 11]. В частности, алгоритма k-ближайших соседей (kNN – k-Nearest Neighbors) и метода замены пропущенных данных с помощью цепных уравнений (MICE – Multiple Imputation by Chained Equations)

Данные

В настоящее время сеть геомагнитного мониторинга НС РАН включает 7 стационарных пунктов наблюдения (рис. 1), где данные регистрируются с временным шагом 20 с. Такое временное разрешение позволяет фиксировать как регулярные вариации геомагнитного поля, так и кратковременные аномалии, вызванные внешними возмущениями.

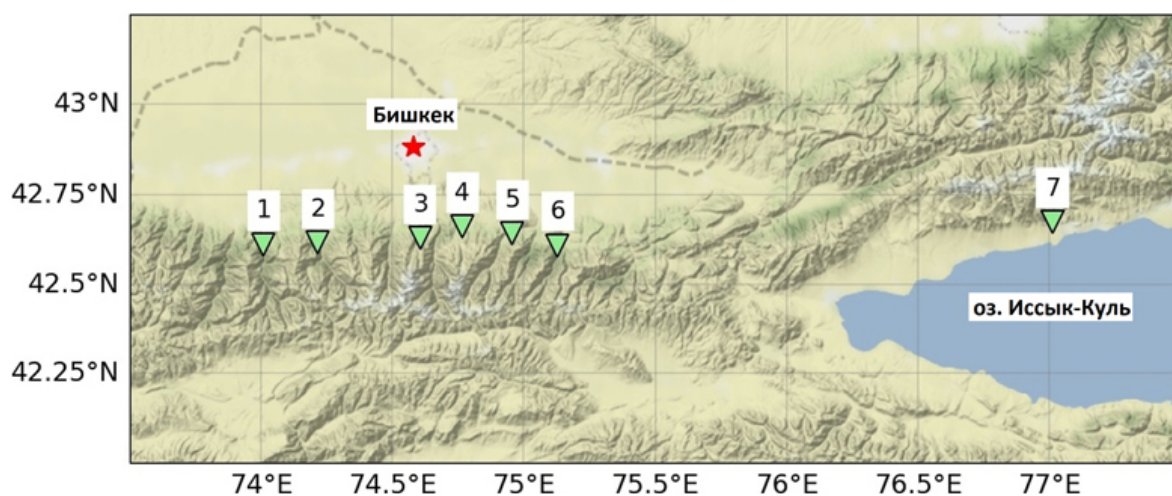


Рис. 1. Карта расположения стационарных пунктов сети геомагнитных наблюдений НС РАН: 1 – Ак-Суу, 2 – Шавай, 3 – Чункурчак, 4 – Таш-Башат, 5 – Иссык-Ата, 6 – Кегеты, 7 – Карагай-Булак.

Fig. 1. Location map of the stationary geomagnetic observation sites of the Research Station of the Russian Academy of Sciences (RS RAS): 1, Ak-Suu; 2, Shavai; 3, Chunkurchak; 4, Tash-Bashat; 5, Issyk-Ata; 6, Kegety; 7, Karagai-Bulak.

Основными причинами пропусков в рассматриваемых данных являются сбои в работе аппаратуры и длительное отсутствие электропитания вследствие аварий и веерных отключений. Кроме того, в процессе предварительной обработки удаляются техногенные помехи, которые возникают из-за воздействия внешних источников, таких как близлежащие электростанции или промышленное оборудование. Это, в свою очередь, создает дополнительные пропуски в данных.

Для анализа использованы данные пяти станций сети геомагнитного мониторинга НС РАН. Две станции, Чункурчак и Таш-Башат, были исключены из анализа, так как их близость к питающему диполью ЭРГУ-600 [12] (на расстояниях 8 и 10 км соответственно) вызывает значительные искажения данных – скачки уровня магнитного поля (ступени), возникающие во время каждого 12-минутного сеанса зондирования (рис. 2). Поскольку эти искусственные ступени не связаны с естественными вариациями поля и присутствуют только на отдельных пунктах, их использование в качестве донорских рядов привело бы к переносу техногенного сигнала в восстанавливаемые данные. Из всех данных предварительно удаляли импульсные выбросы с помощью алгоритма расширенного изолирующего леса [13] и фильтра Хампеля [14], для того чтобы выбросы из данных восстанавливающих станций

не переносились в данные восстанавливаемой станции.

Для оценки эффективности алгоритмов были сформированы два набора данных. Первый включал наблюдения с типичными суточными Sq-вариациями [15, 16], характерными для спокойных геомагнитных условий. Второй набор состоял из данных, зарегистрированных во время магнитной бури. Искусственные пропуски с продолжительностью в одни сутки были добавлены в оба набора для имитации реальных длительных сбоев в работе станций. Отметим, что использование искусственно созданных пропусков необходимо для объективной оценки точности восстановления, поскольку в этом случае известны истинные значения данных. Такой подход широко применяется в задачах импутации временных рядов и позволяет корректно сравнивать эффективность различных алгоритмов. При этом длительность искусственно заданных пропусков (1 сутки) соответствует наиболее сложному, но относительно редкому сценарию, связанному с длительными сбоями в работе станций, например, при выходе из строя измерительного оборудования. В реальных условиях наблюдений типичные пропуски, как правило, не превышают нескольких часов и обусловлены профилактическими работами или удалением помех от внешних антропогенных источников. Таким образом, использование длительных пропусков позволяет

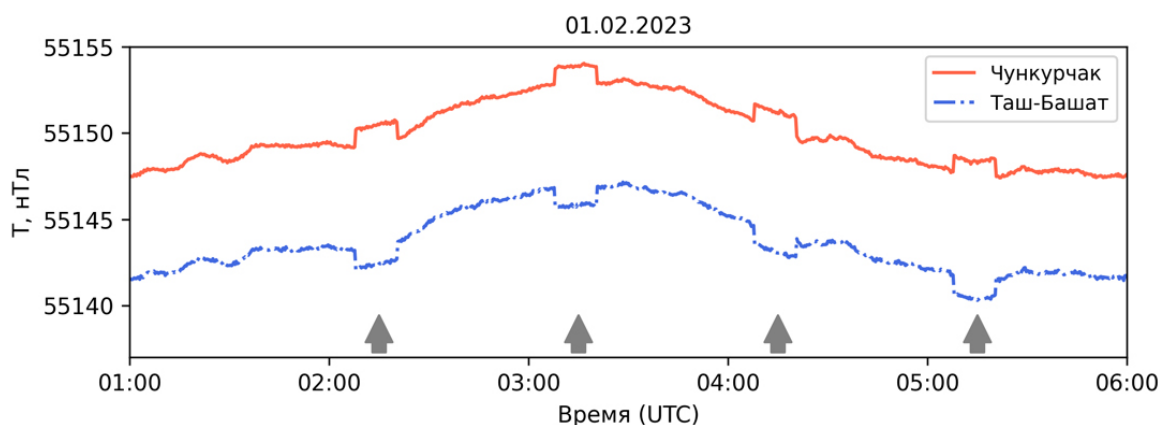


Рис. 2. Вариации величины геомагнитного поля на станциях Чункурчак и Таш-Башат 1 февраля 2023 г. с 01:00 по 06:00 UTC. Стрелками помечены моменты, соответствующие сеансам работы ЭРГУ-600. Для наглядности данные станций Чункурчак и Таш-Башат смещены на -170 нТл и $+30$ нТл соответственно.

Fig. 2. Variation of the geomagnetic field at the Chunkurchak and Tash-Bashat stations on February 1, 2023, during the period from 01:00 to 06:00 UTC. Arrows indicate the time intervals corresponding to the operation sessions of the ERGU-600 system. For clarity, the data from the Chunkurchak and Tash-Bashat stations are shifted by -170 nT and $+30$ nT, respectively.

оценить работоспособность алгоритмов в заведомо усложненных условиях и рассматривать полученные результаты как консервативную (пессимистическую) оценку их точности.

Данные магнитных бурь включались в анализ, поскольку аномальные вариации геомагнитного поля в этот период значительно превышают по длительности и амплитуде эффекты других источников возмущений. Кроме того, магнитные бури оказывают планетарное воздействие, что обеспечивает согласованный (синхронный) отклик на станциях сети геомагнитного мониторинга ИС РАН.

Для дальнейшей обработки данные геомагнитного мониторинга были структурированы в виде таблицы. Каждая строка этой таблицы соответствует определенному моменту времени измерения, а столбцы содержат значения геомагнитного поля, измеренные в этот момент на различных станциях. Такое представление удобно для дальнейшего применения методов машинного обучения, где строки трактуются как наблюдения, а столбцы – как признаки. В этом случае каждое наблюдение будет представлять собой точку в многомерном

пространстве признаков. Этот подход обеспечивает совместимость данных с большинством стандартных алгоритмов обработки временных рядов и позволяет эффективно анализировать межстанционные взаимосвязи.

На рис. 3 представлен первый набор данных, включающий регулярные Sq-вариации геомагнитного поля. Для 4 станций (Ак-Суу, Шавай, Иссык-Ата и Кегеты), расположенных близко друг к другу, были искусственно созданы пропуски длительностью одни сутки, обозначенные как А1, А2, А3 и А4. Аналогичные пропуски (Б1, Б2, Б3 и Б4) были созданы для удаленной станции Карагай-Булак, синхронно по времени с пропусками на других станциях. Такая схема позволяет оценить не только точность восстановления данных на станции Карагай-Булак, но и влияние пропусков в данных станций-доноров на качество работы алгоритмов. Весь набор данных включает 38 880 строк (9 дней $\times$ 24 ч $\times$ 60 мин $\times$ 3 измерения в минуту) и 5 столбцов, соответствующих количеству станций.

На рис. 4 показаны вариации геомагнитного поля для второго набора данных, содер-

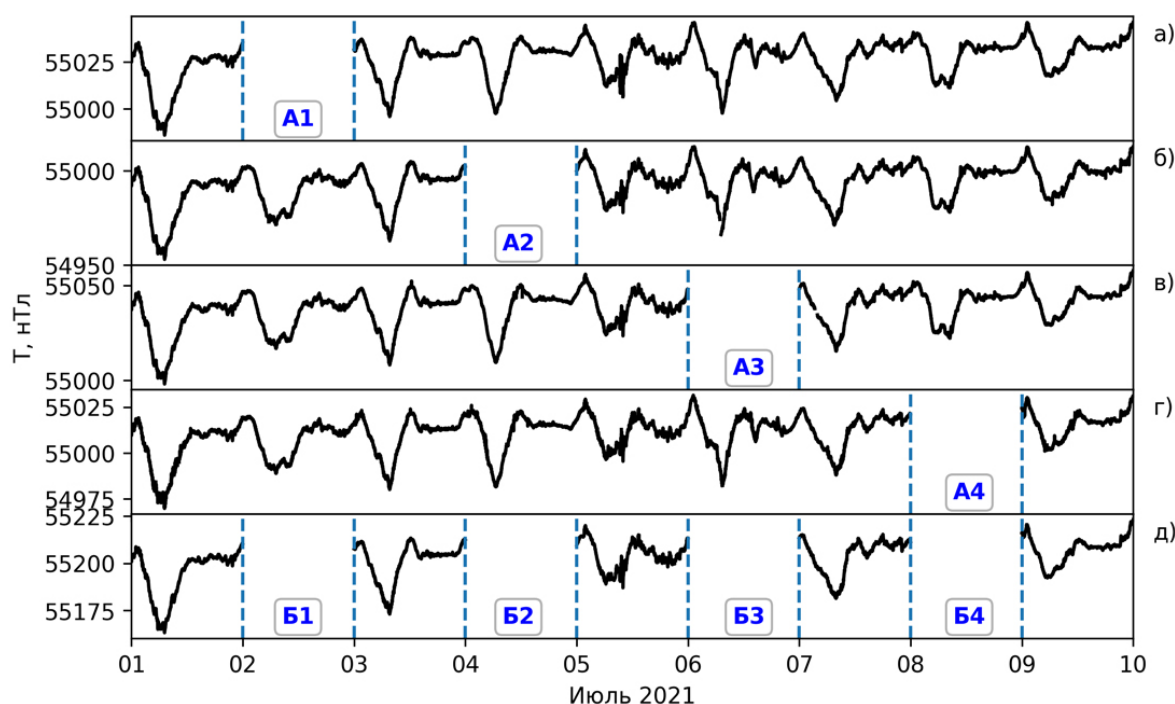


Рис. 3. Набор данных, содержащий типичные Sq-вариации величины геомагнитного поля на станциях Ак-Суу (а), Шавай (б), Иссык-Ата (в), Кегеты (г) и Карагай-Булак (д) и искусственно созданные пропуски в них (А1–А4 и Б1–Б4).

Fig. 3. Dataset containing typical Sq variations of the geomagnetic field at the Ak-Suu (a), Shavai (б), Issyk-Ata (в), Kegety (г), and Karagai-Bulak (д) stations, along with artificially generated gaps (A1–A4 and B1–B4).

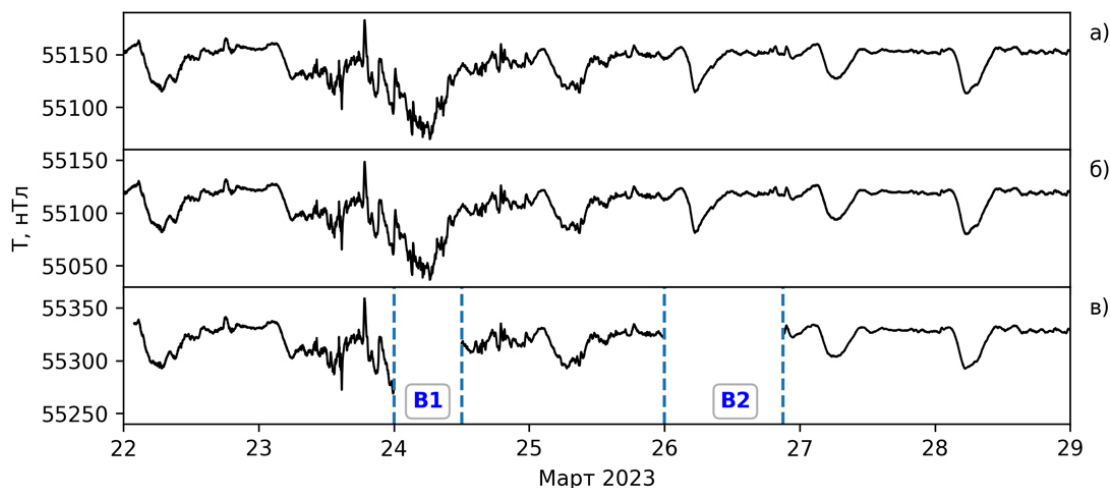


Рис. 4. Набор данных, содержащий магнитную бурю: Ак-Суу (а), Шавай (б), Карагай-Булак (в) – и искусственно созданные пропуски B1 и B2.

Fig. 4. Dataset containing a geomagnetic storm recorded at the Ak-Suu (a), Shavai (b), and Karagai-Bulak (v) stations, with artificially generated gaps (B1 and B2).

жащего магнитную бурю 24 марта 2023 г. с индексом $A_p = 73$, $K_p = 6$ (для краткости представлены данные только с трех станций). Для тестирования в этом наборе были созданы два искусственных пропуска. Пропуск B1 совпал с периодом максимальной депрессии геомагнитного поля под воздействием бури, а B2 приходился на спокойный интервал, не затронутый возмущениями. Этот подход позволяет объективно сравнить точность восстановления данных в условиях геомагнитной активности и в спокойные периоды. Анализ подобных ситуаций важен, поскольку наличие геомагнитных бурь существенно влияет на качество работы алгоритмов и требует отдельного подхода для восстановления пропусков в такие периоды.

Методика

Алгоритм k-ближайших соседей

Алгоритм kNN является одним из наиболее простых и эффективных методов восстановления пропусков в коррелированных многомерных данных. Его широкое применение объясняется доступностью реализации и хорошими результатами, которые он демонстрирует на различных наборах данных [17]. Основная идея метода состоит в замене пропущенного значения средним значением k ближайших соседей, которые определяются по

заданной метрике, такой как, например, евклидово расстояние. Такой подход применим для многомерных временных рядов, в частности к данным геомагнитного мониторинга, где измерения на станциях демонстрируют высокую корреляцию. Исследования [3, 18] показывают, что в задачах восстановления пропусков алгоритм kNN может быть эффективнее других методов машинного обучения. Это обусловлено способностью алгоритма учитывать локальные взаимосвязи между измерениями, что делает метод надежным для обработки данных с регулярными вариациями.

Процесс заполнения пропусков с использованием алгоритма kNN включает в себя несколько этапов.

Этап 1 – Выбор числа соседей k. Этот гиперпараметр играет ключевую роль в работе алгоритма. Если k слишком мало (например, $k = 1$), алгоритм становится чувствительным к случайным флуктуациям в данных и наличию шумовой компоненты, что снижает точность восстановления. Наоборот, слишком большое значение (например, близкое к размеру выборки n) приводит к чрезмерному сглаживанию результатов, что мешает учитывать локальные особенности данных.

Этап 2 – Расчет расстояний между наблюдениями. Для оценки сходства между данными в нашем случае используется

модифицированная евклидова метрика. Эта метрика подходит для данных геомагнитного мониторинга, поскольку значения измерений на всех станциях имеют одинаковый масштаб. Для работы с пропусками классическая формула расчета расстояния была адаптирована таким образом, чтобы игнорировать отсутствующие значения (Not a Number – NaN). Расстояние между двумя векторами наблюдений x_t и x_s (значения геомагнитного поля на станциях в моменты времени t и s) вычисляется только на основе тех признаков (величины геомагнитного поля на конкретной станции), которые доступны в обоих случаях:

$$R(x_t, x_s) = \sqrt{\frac{N}{m} \sum_{i=1}^N \delta_i \cdot (x_{t,i} - x_{s,i})^2}, \quad (1)$$

где N – размерность вектора признаков (число станций), m – количество доступных (непропущенных) признаков (где оба значения $x_{t,i}$ и $x_{s,i}$ не равны NaN), δ_i – индикатор наличия данных, где

$$\delta_i = \begin{cases} 1, & \text{если } x_{t,i} \neq NaN \text{ и } x_{s,i} \neq NaN \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Масштабирование на коэффициент N/m компенсирует различное число доступных координат и предотвращает занижение расстояния при наличии пропусков. Поскольку значения геомагнитного поля на всех станциях имеют одинаковую размерность (нТл), дополнительная нормализация признаков не проводилась. На этом этапе создается симметричная матрица расстояний размерностью $M \times M$, где M – количество временных отметок, а главная диагональ матрицы заполнена нулями (расстояние от точки до самой себя).

Этап 3 – Сортировка соседей и расчет заполняемого значения. После вычисления расстояний наблюдения упорядочиваются по возрастанию значения метрики. Для каждого наблюдения x_t , содержащего пропуски, выбираются k ближайших соседей среди других наблюдений. Заполнение осуществляется одновременно для всех отсутствующих признаков в данном наблюдении, а именно, каждое пропущенное значение заменяется средним арифметическим соответствующего признака

у выбранных соседей. Отсутствующие у соседей в восстанавливаемом признаке значения исключаются из усреднения. Процедура повторяется для всех строк таблицы, после чего формируется полностью заполненная матрица наблюдений. Другими словами, алгоритм выполняет многомерное заполнение пропусков, используя межстанционные корреляции внутри каждого временного среза.

В такой реализации алгоритм kNN обладает рядом преимуществ при восстановлении пропусков в данных. Прежде всего, этот алгоритм прост в реализации и адаптивен к различным типам данных, что особенно важно для многомерных временных рядов, где значения коррелированы между измерениями. Еще одно преимущество заключается в том, что для восстановления пропусков kNN использует данные самой станции, что устраняет необходимость дополнительного масштабирования или нормализации. Кроме того, метод хорошо работает в условиях регулярных вариаций, таких как регулярные Sq-вариации геомагнитного поля, где отсутствуют резкие аномалии.

Тем не менее надо отметить ряд ограничений. Во-первых, при наличии выбросов в исходных данных алгоритм kNN может использовать такие значения при выборе ближайших соседей, что способно приводить к снижению точности восстановления. В связи с этим корректная предварительная фильтрация выбросов является необходимым этапом обработки данных перед применением алгоритма. Во-вторых, алгоритм требует значительных вычислительных ресурсов из-за квадратичной сложности $O(n^2)$, что особенно проявляется при обработке больших объемов данных. При этом увеличение объема выборки приводит к росту требований к оперативной памяти при расчете матрицы расстояний. Следует отметить, что на практике вычисления могут быть существенно оптимизированы за счет ограничения выборки во времени. Учитывая, что значимая корреляция геомагнитных вариаций сохраняется в пределах ограниченного временного интервала (как правило, нескольких суток), расчет расстояний может выполняться не для всего временного ряда, а в скользящем окне, что позволяет значительно снизить вычислительную нагрузку. Наконец,

существенным недостатком заполнения пропусков с помощью алгоритма kNN является его ограниченная эффективность при обработке экстремальных возмущений, таких как магнитные бури. В таких ситуациях в наборе данных отсутствуют аналогичные значения, которые могли бы использоваться для восстановления, что приводит к значительным ошибкам восстановления. Эти ограничения показывают необходимость комбинирования kNN с другими подходами для улучшения итоговых результатов.

Алгоритм MICE

MICE – это метод многократного заполнения пропусков, который строит вероятностную модель для каждого признака, основываясь на значениях остальных признаков [19, 20]. Алгоритм MICE выполняется итеративно, что обеспечивает постепенное улучшение качества заполнения пропусков на каждом этапе. Это проявляется наиболее эффективно при работе с данными, где взаимозависимости между признаками играют ключевую роль. Например, в рассматриваемых данных геомагнитного мониторинга MICE позволяет учитывать корреляции между различными станциями, что может повысить точность восстановления пропусков по сравнению с методами, где такие связи игнорируются.

Процесс заполнения пропусков с использованием алгоритма MICE включает несколько этапов.

Этап 1 – Предварительное заполнение пропусков. Пропуски заполняются с помощью простых методов, таких как среднее значение по столбцу, линейная интерполяция или метод kNN. Это необходимо для формирования полной начальной матрицы, необходимой для запуска итеративной процедуры MICE. Также отметим, что, поскольку значения на всех станциях имеют одинаковую физическую размерность (нТл), дополнительная стандартизация признаков не выполнялась.

Этап 2 – Построение модели для каждого признака. Для каждой станции j строится регрессионная модель:

$$x_{t,j} = f_j(x_{t,-j}) + \varepsilon, \quad (2)$$

где $x_{t,j}$ – вектор значений на остальных станциях в момент времени t .

Например, алгоритм MissForest [21] использует подход итеративного заполнения, но вместо линейной или логистической регрессии применяет алгоритм случайного леса для предсказания пропущенных значений. Использование случайного леса в качестве предсказательной модели оправдано в случае, когда данные содержат как числовые, так и категориальные переменные, а также когда они имеют сложные нелинейные зависимости между переменными. В рассматриваемой задаче геомагнитные данные являются числовыми и характеризуются высокой межстанционной корреляцией, что делает линейную регрессию предпочтительным выбором вследствие простой реализации и вычислительной эффективности. В настоящей работе функция f_j реализована в виде множественной линейной регрессии. Временные зависимости в данной постановке не учитывались, и моделирование выполнялось только на основе межстанционных корреляций внутри каждого временного среза.

Этап 3 – Циклическое заполнение пропусков. На данном этапе для каждого признака (станции) последовательно выполняется предсказание только отсутствующих значений с использованием регрессионной модели, построенной на предыдущем этапе. После восстановления пропусков для одного признака обновленные значения используются при обработке следующего признака. Таким образом выполняется один полный проход по всем признакам.

Этап 4 – Итеративное уточнение. В следующем итерационном цикле используются обновленные значения, полученные на предыдущем этапе. Итерационный процесс продолжался до достижения заданного числа циклов K , которое по результатам предварительных численных экспериментов было выбрано равным 10 (дальнейшее увеличение числа итераций не приводило к существенному снижению ошибки восстановления).

Следует подчеркнуть, что в данной постановке задача не сводится к решению одной системы линейных уравнений, несмотря на

использование линейной регрессии в качестве модели f_i . Это связано с тем, что в алгоритме MICE рассматривается последовательность условных моделей для различных признаков (станций), каждая из которых строится с учетом текущих оценок пропущенных значений в других признаках.

В отличие от kNN, алгоритм MICE может учитывать сложные взаимозависимости между признаками, что делает его эффективным при работе с многомерными временными рядами. Итеративный характер метода позволяет на каждом этапе уточнять восстановленные значения, обеспечивая корректные результаты в сложных условиях, таких как магнитные бури. Также алгоритм обладает гибкостью, которая заключается в возможности выбора предсказательной модели для заполнения пропусков. Это могут быть как простые методы, например линейная регрессия, так и более сложные, включая деревья решений или случайные леса, что позволяет адаптировать MICE к различным типам данных в зависимости от задачи.

Тем не менее данный алгоритм имеет определенные ограничения. Так, его вычислительная сложность и значительное потребление оперативной памяти могут создавать трудности при работе с большими наборами данных. Кроме того, скорость сходимости алгоритма MICE зависит от качества начального заполнения пропусков, поскольку оно определяет начальную точку итерационного процесса и влияет на стабильность и скорость уточнения оценок на последующих шагах. Использование слишком простых методов, например среднего или медианного значения, на этом этапе может замедлить процесс. Еще одной проблемой является перенос артефактов, таких как выбросы или ступени, из данных станций-доноров в восстанавливаемые данные. Чтобы избежать этого, важно применять предварительную фильтрацию [13, 14], которая удаляет нежелательные артефакты перед началом работы алгоритма. При этом ключевым моментом является то, что использование алгоритма MICE в данной задаче основывается на предположении о стабильности межстанционных корреляций во времени, что может и не соблюдаться для других задач подобного рода. В общем случае выбор между

kNN и MICE во многом будет зависеть от специфики самого исследования и характеристик данных. В условиях регулярных Sq-вариаций, характеризующихся высокой повторяемостью и ограниченным диапазоном значений, предпочтительным является использование алгоритма kNN. В то же время при наличии экстремальных возмущений, когда значения выходят за пределы типичного диапазона, более эффективным оказывается алгоритм MICE, учитывающий глобальные межстанционные зависимости. В текущей реализации выбор метода осуществляется на основе анализа данных и выполняется исследователем, что делает процедуру автоматизированной. При этом сам выбор конкретного метода может быть формализован. В частности, в качестве критерия может использоваться уровень вариабельности временного ряда или внешние индексы геомагнитной активности (K_p , A_p). В случае превышения заданного порогового значения будет использован алгоритм MICE, в противном случае – kNN. Пороговое значение при этом может быть определено эмпирически на основе обучающей выборки или задано в соответствии с классификацией геомагнитной активности.

Надо отметить, что, в отличие от классических задач машинного обучения, ориентированных на построение обобщающей предиктивной модели с последующим применением к новым данным, в данном случае восстановление пропусков выполняется непосредственно на основе имеющихся наблюдений с использованием межстанционных зависимостей. Иными словами, алгоритмы kNN и MICE применяются не как инструменты построения универсальной модели, а как методы локальной и глобальной реконструкции пропущенных значений. Так, алгоритм kNN реализует восстановление на основе поиска ближайших по структуре наблюдений, тогда как MICE последовательно восстанавливает пропуски, используя регрессионные зависимости между временными рядами различных станций. Таким образом, предложенный подход ориентирован на реконструкцию данных в пределах рассматриваемой сети наблюдений и не предполагает экстраполяции или прогнозирования за пределами имеющегося набора данных.

Результаты

Заполнение пропусков с помощью алгоритма kNN

В качестве основной метрики оценки качества заполнения пропусков использовалась средняя абсолютная ошибка MAE (Mean Absolute Error), рассчитанная как среднее значение модуля разности между исходными и восстановленными данными. Эта величина является устойчивой к выбросам и обеспечивает интерпретируемую оценку отклонения восстановленных значений от исходных данных в физических единицах (нТл). В отличие от квадратичных метрик, таких как MSE (Mean Squared Error), MAE менее чувствительна к отдельным аномальным значениям, что особенно важно при анализе геомагнитных данных, которые могут содержать выбросы и экстремальные вариации.

Заполнение пропусков с использованием алгоритма kNN было протестировано на двух наборах данных для оценки его возможностей. При этом необходимо отметить, что оптимальный выбор гиперпараметра k является ключевым при использовании алгоритма kNN. На практике часто применяется эмпирическое правило $k \leq \sqrt{n}$, где n – количество наблюдений

[22]. Для первого набора данных ($n = 38\,880$) это правило определяет значение k на уровне ~ 200 . Для более точного анализа зависимости MAE от количества соседей k были проведены эксперименты с варьированием значения этого параметра в диапазоне от 30 до 1500 (рис. 5). Минимальные значения MAE достигаются при $k \approx 150\text{--}500$, после чего величина ошибки постепенно увеличивается вследствие включения менее коррелированных наблюдений. Этот диапазон можно считать оптимальным для восстановления пропусков в первом наборе данных, поскольку он обеспечивает баланс между точностью и вычислительными затратами. Малые значения k увеличивают MAE из-за недостаточной устойчивости к локальным выбросам, а слишком большие значения включают данные станций с низкой корреляцией, что также снижает итоговую точность восстановления. Таким образом, хотя правило $k \leq \sqrt{n}$ является удобным ориентиром, оптимальный выбор k должен зависеть от специфики данных и поставленной задачи. В данной работе значение гиперпараметра k было выбрано равным 150.

На рис. 6 представлены результаты восстановления искусственно созданных пропусков для типичных Sq-вариаций на разных станциях.

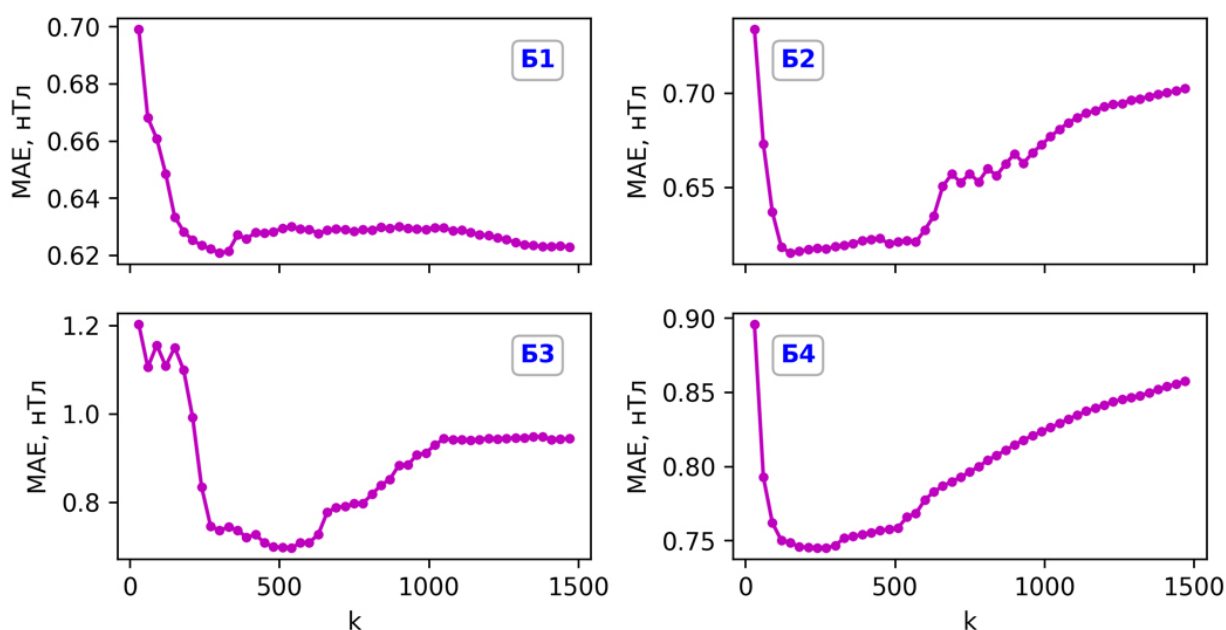


Рис. 5. Зависимость ошибки восстановления пропусков, MAE, от параметра k для участков Б1–Б4 на основе алгоритма kNN.

Fig. 5. Variation of the MAE of gap reconstruction as a function of the parameter k for segments B1–B4 using the kNN algorithm.

На рис. 7 показаны графики исходных и восстановленных временных рядов для искусственно созданных пропусков. Для наглядности восстановленные кривые смещены на 5 нТл относительно исходных данных. Результаты показывают, что на станциях, расположенных близко друг к другу (Ак-Суу, Шавай, Иссык-Ата, Кегеты – рис. 7, слева), пропуски были восстановлены с хорошей точностью ($MAE \leq 0.36$ нТл). Однако на удаленной станции Карагай-Булак точность восстановления оказалась ниже (MAE варьирует от 0.62 до 1.15 нТл). Это связано с тем, что расстояние до ближайшей станции (Кегеты) составляет около 155 км, что снижает корреляцию между данными. Следует отметить, что полное устранение погрешности восстановления невозможно, так как каждая станция обладает уникальными локальными особенностями, включая географические, геомагнитные и техногенные факторы, которые создают различия в данных между станциями. Высокие значения коэффициента корреляции ($r \geq 0.99$) подтверждают сохране-

ние общей формы сигнала, однако основная оценка точности проводилась по метрике MAE , которая более чувствительна к ошибкам восстановления.

Качество восстановления пропусков было дополнительно проанализировано на данных, зарегистрированных во время геомагнитной бури и в период после ее окончания (рис. 8). Для оценки использовалась метрика MAE аналогично процедуре, примененной для Sq-вариаций. Как видно из рисунка, геомагнитная буря создает значительные изменения в магнитном поле, что существенно усложняет задачу восстановления пропусков.

Результаты показали, что регулярные Sq-вариации восстанавливаются с высокой точностью, как и в предыдущем примере. Однако эффективность алгоритма резко снижается на участках, где присутствует магнитная буря (рис. 9). В условиях экстремальных значений во время бури алгоритм kNN не находит адекватных аналогов в выборке и склонен выбирать значения из диапазона спокойных условий, что

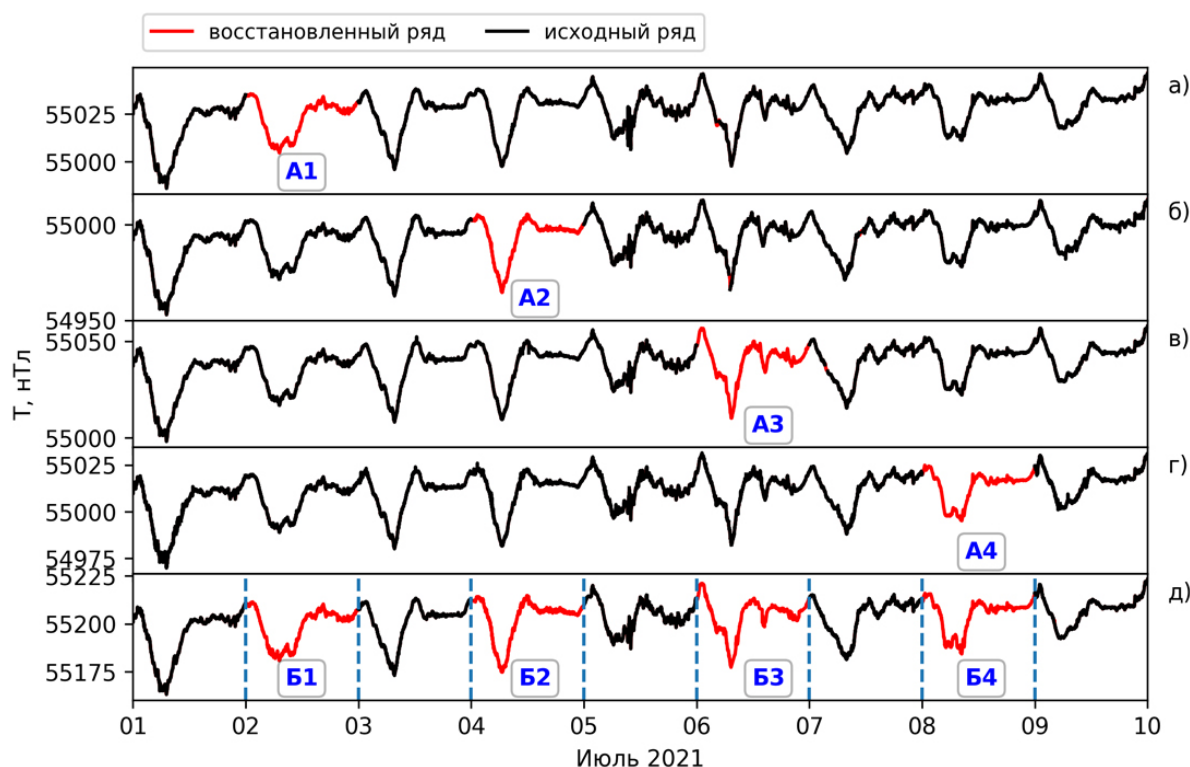


Рис. 6. Результат заполнения искусственно созданных пропусков A1–A4 и B1–B4 на основе алгоритма kNN для набора данных, содержащих типичные Sq-вариации величины геомагнитного поля на станциях Ак-Суу (а), Шавай (б), Иссык-Ата (в), Кегеты (г) и Карагай-Булак (д)

Fig. 6. Reconstruction of the artificially generated gaps A1–A4 and B1–B4 using the kNN algorithm for the dataset containing typical Sq variations of the geomagnetic field at the Ak-Suu (a), Shavai (б), Issyk-Ata (в), Kegety (г), and Karagai-Bulak (д) stations

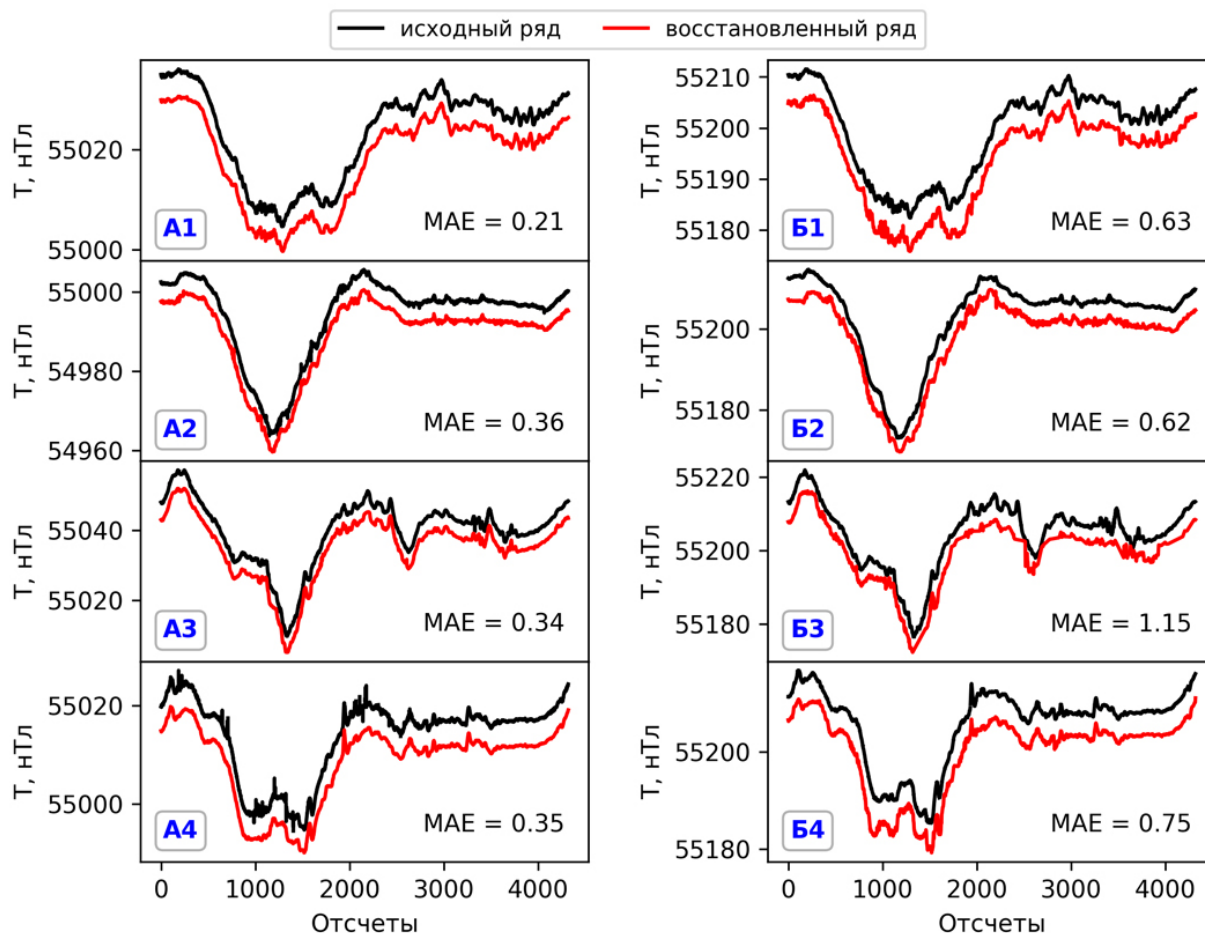


Рис. 7. Исходные и восстановленные временные ряды для участков A1–A4 и B1–B4 на основе алгоритма kNN. Слева – для станций Ак-Суу, Шавай, Иссык-Ата, Кегеты; справа – станция Карагай-Булак.

Fig. 7. Original and reconstructed time series for segments A1–A4 and B1–B4 using the kNN algorithm. Left panels: Ak-Suu, Shavai, Issyk-Ata, and Kegety stations; right panels: Karagai-Bulak station.

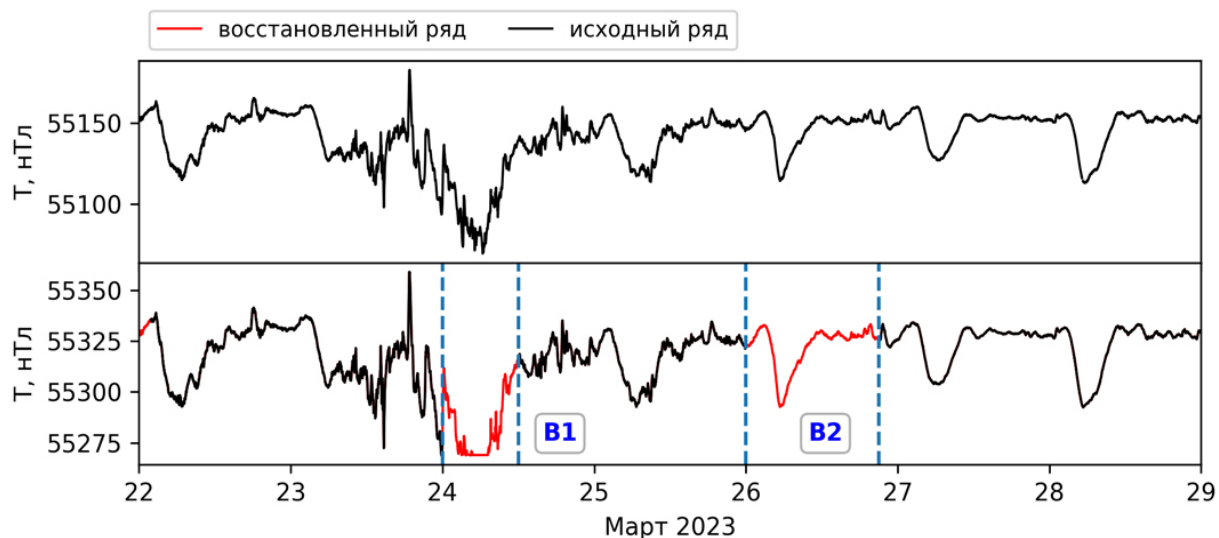


Рис. 8. Результат заполнения искусственно созданных пропусков B1, B2 на основе алгоритма kNN для набора данных, содержащих геомагнитную бурю и Sq-вариации. Вверху – станция Ак-Суу (для сравнения); внизу – станция Карагай-Булак.

Fig. 8. Reconstruction of the artificially generated gaps B1, B2 using the kNN algorithm for the dataset containing a geomagnetic storm and Sq variations. Top panel: Ak-Suu station (reference case); bottom panel: Karagai-Bulak station.

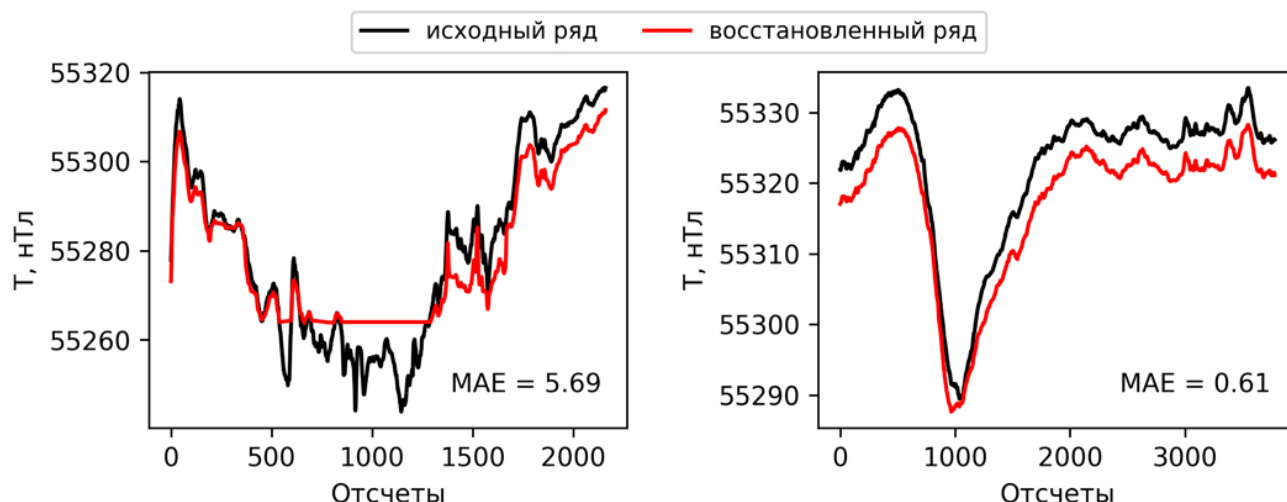


Рис. 9. Исходные и восстановленные временные ряды для участков B1 и B2 на основе алгоритма kNN для станции Карагай-Булак. Слева в случае геомагнитной бури; справа в случае типичных Sq-вариаций.

Fig. 9. Original and reconstructed time series for segments B1 and B2 at the Karagai-Bulak station obtained using the kNN algorithm. Left panel: geomagnetic storm conditions; right panel: typical Sq variations.

приводит к систематическому занижению амплитуды возмущения. Это подтверждается высоким значением $MAE = 5.69$ нТл, в то время как для Sq-вариаций MAE составляет всего 0.61 нТл.

Таким образом, kNN плохо подходит для восстановления данных в условиях экстремальных возмущений, когда значения выходят за пределы диапазонов нормальных вариаций. В таких случаях приходится использовать более сложные методы, способные учитывать глобальные корреляции и межстанционные связи.

Заполнение пропусков с помощью алгоритма MICE

Анализ работы алгоритма MICE был выполнен на тех же наборах данных, что и для kNN, включая искусственно созданные пропуски (A1–A4 и B1–B4). На рис. 10 представлены результаты восстановления данных с регулярными Sq-вариациями, зарегистрированными на различных станциях. Для наглядности восстановленные кривые смещены на 5 нТл относительно исходных данных.

Мы видим, что алгоритм MICE обеспечивает точность восстановления, сопоставимую с kNN. Для близкорасположенных станций значение MAE в среднем составило менее 0.37 нТл, а для удаленной станции Карагай-Булак – 0.73 нТл. Однако алгоритм MICE имеет

склонность к переносу мелких выбросов из данных восстанавливающих станций в данные станции с пропусками. Это объясняется тем, что регрессионная модель воспроизводит локальные аномалии, присутствующие в донорских рядах. Это особенно заметно на участках A1, A2 и B2 (рис. 10). В отличие от MICE, алгоритм kNN обеспечивает более сглаженные восстановленные данные за счет осреднения по k-ближайшим соседям, что снижает влияние выбросов. Эти различия подчеркивают, что выбор подходящего метода зависит от характеристик данных. Если в данных отсутствуют выбросы, то kNN может быть предпочтительнее из-за своей простоты.

В случаях, когда в данных присутствуют экстремальные вариации (магнитные бури), алгоритм MICE демонстрирует более устойчивое поведение по сравнению с kNN. Значение MAE в 5 раз ниже полученного при применении kNN (1.06 против 5.69 нТл) (рис. 11 А, слева), поскольку в MICE учитываются глобальные зависимости между станциями, которые важны в период экстремальных событий. Следовательно, MICE более эффективен в условиях, когда значения данных выходят за пределы нормального диапазона вариаций, характерного для спокойных периодов.

Изначально для предварительного заполнения пропусков использовался простой метод расчета среднего значения по всему времен-

ному ряду. Однако этот подход оказался неэффективным, так как он игнорирует корреляции между данными станций, что особенно критично для продолжительных пропусков. Для повышения точности восстановления было решено провести предварительное заполнение с помощью алгоритма kNN. Это позволяет учесть локальные особенности данных и получить более точное начальное состояние. Далее применялся итеративный алгоритм MICE, который уточняет восстановленные значения, учитывая взаимозависимости между станциями. На рис. 11 Б представлены результаты восстановления временных рядов для пропусков В1 и В2 на основе алгоритма MICE с предварительным заполнением методом kNN. Данный подход позволил снизить значение MAE для пропуска во время магнитной бури до 0.88 нТл.

Следует отметить, что эффективность предложенной методики определяется рядом

условий, связанных с особенностями исходных данных. Ключевым фактором является степень коррелированности временных рядов между станциями. Метод показывает наилучшие результаты ($MAE \leq 0.37$ нТл) при высокой межстанционной корреляции ($r \geq 0.9-0.99$), характерной для близкорасположенных пунктов наблюдений. При увеличении расстояния между станциями, как показано на примере станции Карагай-Булак, точность восстановления снижается ($MAE \geq 0.55$ нТл) вследствие ослабления пространственной согласованности вариаций геомагнитного поля. При этом 6 близкорасположенных станций (среднее расстояние между двумя соседними станциями ~ 19 км) составляют вытянутую в широтном направлении область протяженностью ~ 92 км, тогда как удаленная станция Карагай-Булак находится на расстоянии 155 км от этой области.

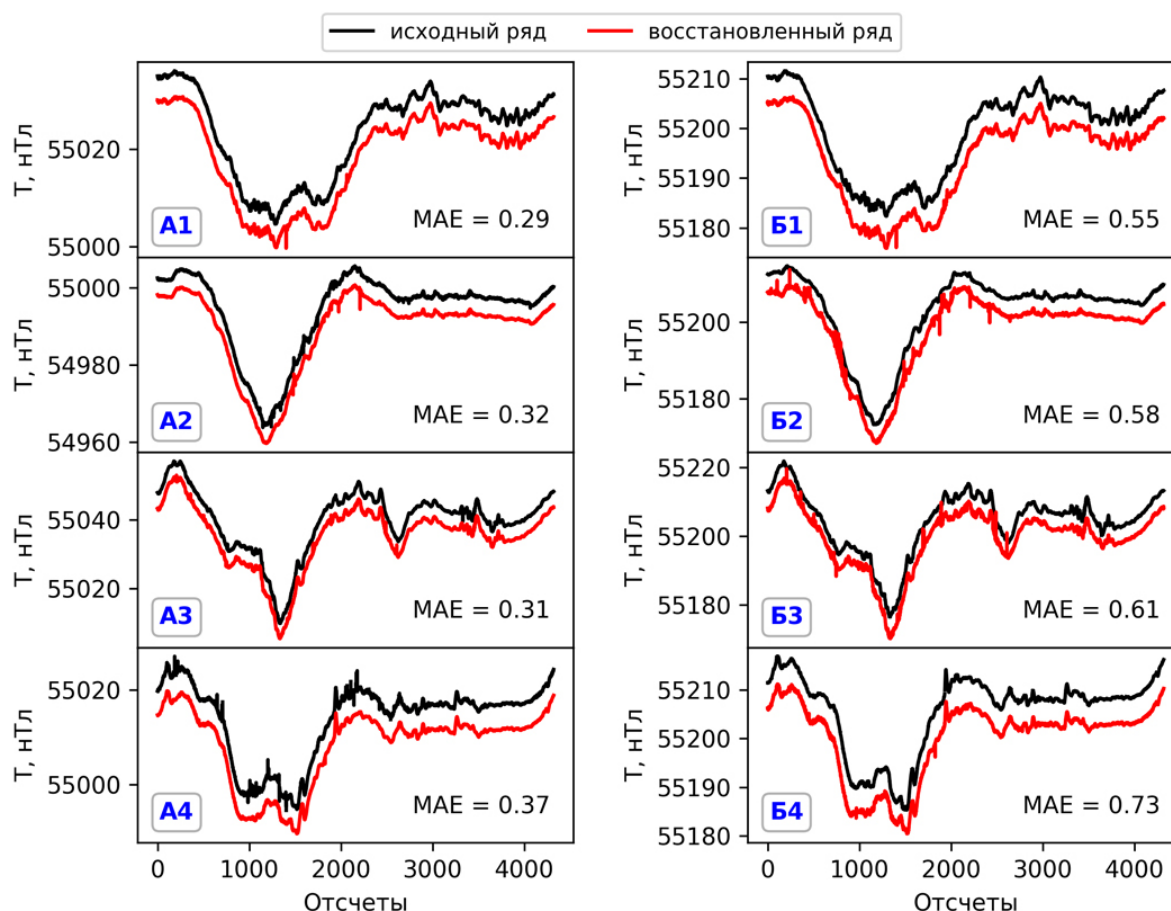


Рис. 10. Исходные и восстановленные временные ряды с регулярными Sq-вариациями для участков А1–А4 и В1–В4 на основе алгоритма MICE. Слева для станций Ак-Суу, Шавай, Иссык-Ата, Кегеты; справа для станции Карагай-Булак.

Fig. 10. Original and reconstructed time series for segments A1–A4 and B1–B4 obtained using the MICE algorithm. Left panels: Ak-Suu, Shavai, Issyk-Ata, and Kegety stations; right panels: Karagai-Bulak station.

Кроме того, как было показано выше, алгоритм kNN достаточно хорошо справляется с восстановлением данных на регулярных участках, где отсутствуют резкие аномалии, однако демонстрирует ограниченную применимость в условиях экстремальных возмущений, таких как магнитные бури, когда значения выходят за пределы диапазона, представленного в обучающей выборке. В этих условиях более предпочтительно использование алгоритма MICE, учитывающего глобальные межстанционные зависимости. Таким образом, предложенный комбинированный подход наиболее эффективен для сетей геомагнитного мониторинга с устойчивыми пространственными корреляциями и требует осторожного применения на данных с низкой степенью согласованности.

Гибридный подход, при котором kNN используется для предварительного заполнения,

а MICE уточняет данные на сложных участках, был выбран в качестве основного метода восстановления пропусков в задачах, рассматриваемых далее.

Удаление выбросов

Восстановление значений на одной станции на основе данных других станций может быть использовано для моделирования хода геомагнитного поля с учетом глобальных источников, таких как тренд, суточные Sq-вариации и магнитные бури. При этом расчет модельного поведения на основе данных других станций автоматически исключает нерегулярные компоненты, например помехи и выбросы, характерные исключительно для рассматриваемой станции. Сравнение временного ряда станции, содержащего аномалии, с моделью, построенной на данных других станций, позволяет эффективно выявлять эти аномалии.

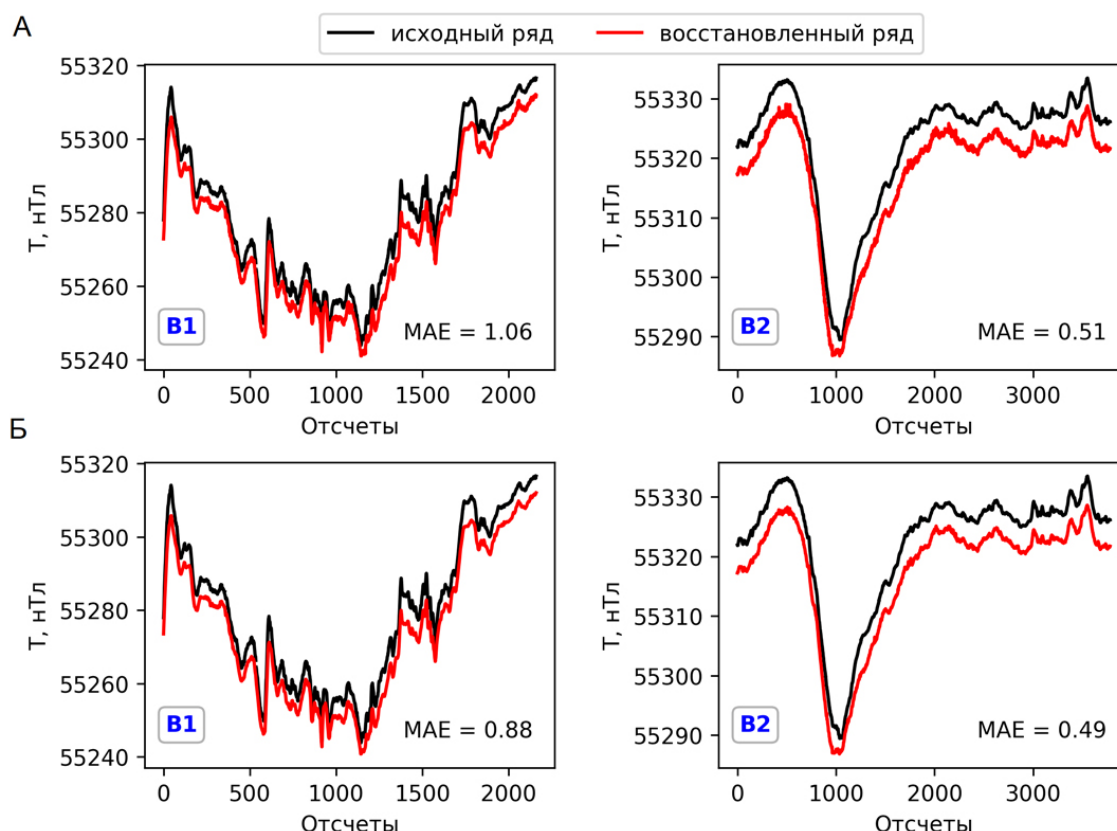


Рис. 11. Исходные и восстановленные временные ряды для участков B1 и B2 для станции Карагай-Булак на основе алгоритма MICE (А) и на основе алгоритма MICE с предварительным заполнением пропусков методом kNN (Б). Слева в случае геомагнитной бури; справа в случае типичных Sq-вариаций.

Fig. 11. Original and reconstructed time series for segments B1 and B2 at the Karagai-Bulak station obtained using the MICE algorithm (A) and using the MICE algorithm with preliminary gap filling by the kNN algorithm (B). Left panel: geomagnetic storm conditions; right panel: typical Sq variations.

Такой подход можно использовать для мониторинга геомагнитного поля и обнаружения отклонений, вызванных локальными событиями или помехами.

В рамках данной работы под выбросами понимаются кратковременные аномальные отклонения значений геомагнитного поля, не связанные с естественными вариациями (такими как Sq-вариации или магнитные бури) и обусловленные, как правило, техногенными помехами, сбоями измерительного оборудования или внешними электромагнитными воздействиями (например, грозовой деятельностью) [14]. Такие выбросы, как правило, имеют импульсный характер и существенно отличаются по амплитуде от фоновых вариаций [13]. На рис. 12 представлен пример выбросов, наблюдаемых в реальных данных геомагнитного мониторинга (станция Карагай-Булак).

Такие выбросы, как правило, характеризуются малой длительностью и отсутствием пространственной согласованности между станциями (в отличие от геомагнитных бурь). Также следует отметить, что возмущения, возникающие при работе установки ЭРГУ-600, имеют иную природу по сравнению с импульсными выбросами. Они проявляются в виде ступенчатых изменений уровня сигнала, сохраняющихся в течение определенного интервала времени (рис. 2), и поэтому не могут рассматриваться как классические выбросы. Такие аномалии анализируются отдельно и требуют применения специализированного подхода, описанного в следующем разделе.

Для тестирования алгоритмов был выбран временной ряд станции Карагай-Булак (рис. 13 а), содержащий геомагнитную бурю и Sq-вариации. Далее к этому ряду были искусственно добавлены 200 выбросов, со случайным местоположением, знаком и амплитудой в диапазоне 30–100 нТл (рис. 13 б). Использование искусственно сгенерированных выбросов в данном случае обеспечивает контролируемую оценку эффективности алгоритма, поскольку их точное положение и параметры заранее известны. При этом диапазон амплитуд и их количество выбирались на основе анализа реальных данных, они соответствуют техногенным помехам, наблюдаемым на станциях геомагнитного мониторинга.

Выбранное количество выбросов для такого промежутка времени значительно превышает норму для рассматриваемых станций (превышение среднего количества выбросов в 4–10 раз). Добавление выбросов в таком нетипичном количестве позволяет протестировать алгоритм в условиях, когда другие методы не дают значимых результатов [13, 14]. Для того чтобы смоделировать временной ряд на одной из станций по данным других пунктов наблюдений, необходимо искусственно создать пропуски и оставить несколько значений, чтобы алгоритм рассчитал связь между данными станций. Для этого из зашумленного выбросами временного ряда $T_{\text{ш}}$ было выбрано случайным образом $N = 150$ значений (рис. 13 в). Значение N определялось эмпирически на основе предварительных численных экспериментов и

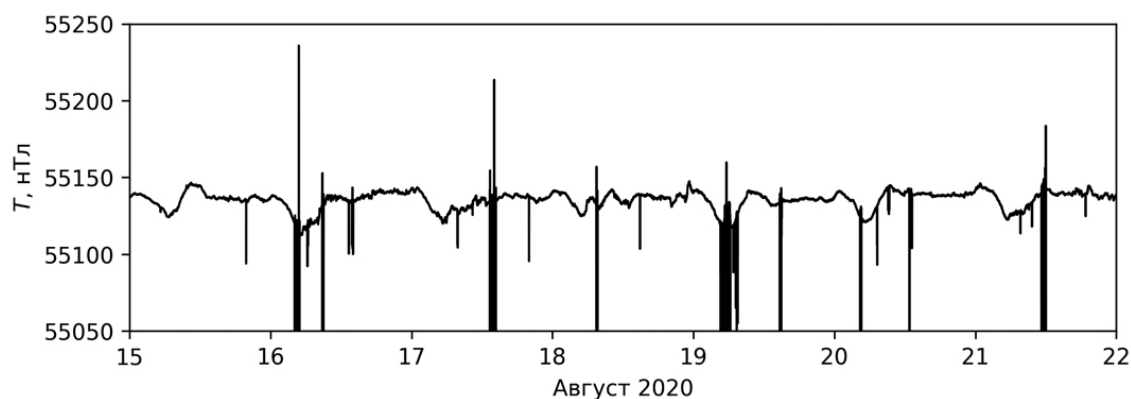


Рис. 12. Пример импульсных выбросов в данных вариации геомагнитного поля на станции Карагай-Булак.

Fig. 12. Example of impulsive outliers in geomagnetic field variation data recorded at the Karagai-Bulak station

оказалось достаточным для устойчивого восстановления целевого сигнала при заданной длине ряда и количестве искусственных выбросов. Анализ чувствительности к параметру N показал, что диапазон 100–200 обеспечивает сопоставимые результаты.

Полученная разреженная последовательность T_N использовалась для восстановления целевого временного ряда с помощью комбинации алгоритмов kNN и MICE. Нужно отметить, что среди выбранных наугад N точек есть вероятность наличия выбросов (рис. 13 в, отмечено стрелкой), которые могут исказить результаты восстановления пропусков. В этом случае необходимо провести несколько серий отборов N точек с последующим восстановлением целевого временного ряда, используя накопление и последующую робастную оценку для устранения влияния подобных выбросов.

Для устранения выбросов было выполнено $L = 100$ итераций, в каждой из которых рассчитывался временной ряд на основе разреженных данных. Получено 100 различных временных рядов, каждый из которых мог содержать отдельные выбросы. Для итогового восстановления временного ряда использовался расчет медианы в качестве устойчивой оценки среднего значения, что дает возмож-

ность нивелировать влияние выбросов, попавших в подвыборки на отдельных итерациях.

Важно отметить, что восстановленный временной ряд представляет собой модель данных, которая не является точной копией исходного ряда. Поэтому он не может использоваться напрямую. Для удаления выбросов из исходных данных рассчитывалась разность ΔT между исходным загрязненным временным рядом и модельным. Затем применялся метод выделения выбросов на основе анализа распределения ΔT (рис. 14, слева). Чтобы избежать искажений, вызванных большим числом выбросов высокой амплитуды ($3\sigma = 17$ нТл), вместо стандартного отклонения использовался межквартильный критерий (рис. 14, справа), согласно которому границы выбросов рассчитывались по следующим формулам:

$$L_1 = Q1 - W \cdot IQR,$$

$$L_2 = Q3 + W \cdot IQR,$$

где $Q1$, $Q3$ – первый и третий квартили, $IQR = Q3 - Q1$ – межквартильный размах (InterQuartile Range). Коэффициент $W = 4$ выбран эмпирически, исходя из характера распределения ΔT и доли устраняемых выбросов. В нашем случае этот подход обеспечивает гибкую фильтрацию аномалий с минимиза-

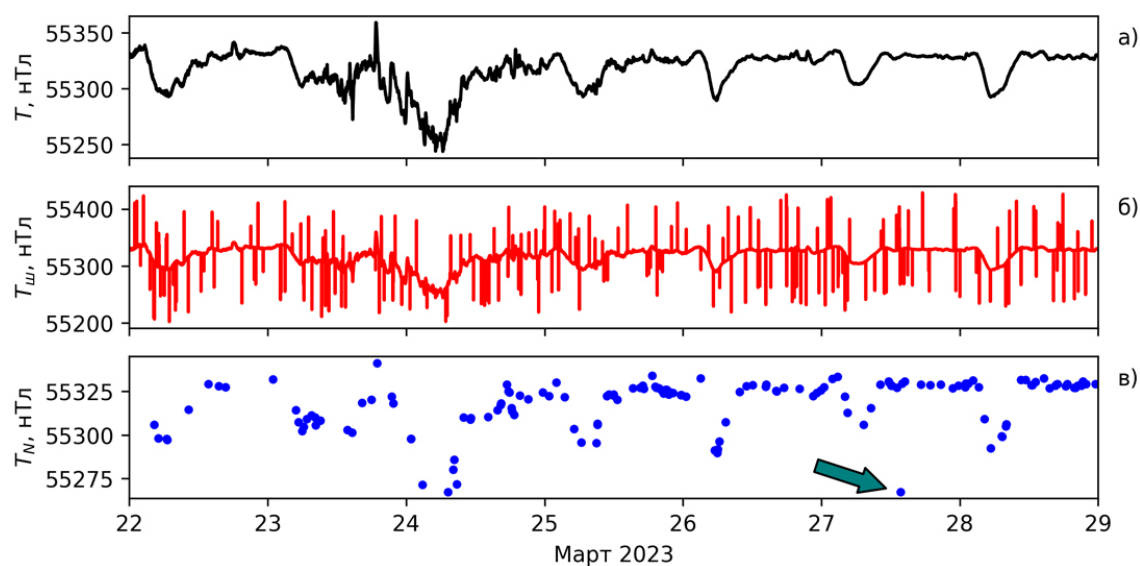


Рис. 13. Временные ряды вариаций величины геомагнитного поля: а) исходный, б) загрязненный выбросами, в) случайная выборка из $N = 150$ точек. Стрелкой указан выброс, который попал в ряд T_N .

Fig. 13. Time series of geomagnetic field variations: (a) original, (b) contaminated with outliers, and (c) a random sample of $N = 150$ points. The arrow marks the outlier that was included in the T_N series.

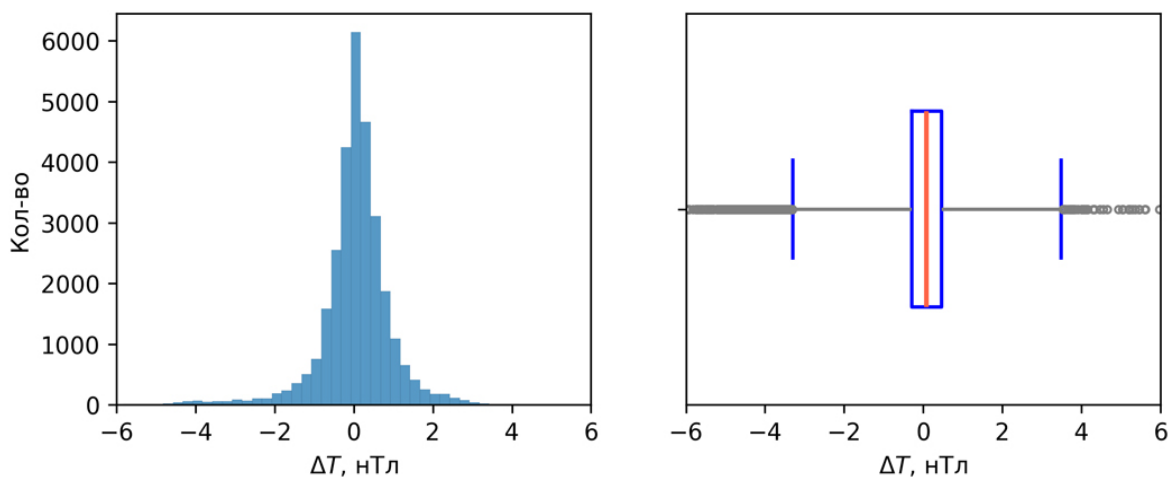


Рис. 14. Распределение разности ΔT (нТл) между исходным загрязненным временным рядом и модельным после применения комбинированного алгоритма kNN+MICE: слева – гистограмма распределения; справа – диаграмма размаха (boxplot), где выделены основные составляющие: медиана (красная вертикальная линия), межквартильный диапазон IQR (синие вертикальные линии) и выбросы (кружки серого цвета по краям).

Fig. 14. Distribution of the difference ΔT (nT) between the original contaminated time series and the modeled series after applying the combined kNN+MICE algorithm. Left panel: histogram of the distribution; right panel: boxplot highlighting the main statistical components – median (red vertical line), interquartile range (IQR; blue vertical lines), and outliers (gray circles at the extremes).

цией влияния выбросов на восстановленные данные.

Согласно межквартильному критерию, все значения ΔT , которые превышают пределы L_1 и L_2 , классифицируются как выбросы. На рис. 15 представлены исходный временной ряд, модельный ряд и их разность ΔT , где аномальные значения выбросов отмечены от-

дельно. Данный подход позволяет выделить выбросы, которые существенно отклоняются от типичного (модельного) распределения ΔT . Количество выявленных выбросов, их амплитуда и распределение визуально подтверждают корректность работы алгоритма. В частности, в результате такой многоэтапной процедуры были правильно выделены все 200 искусствен-

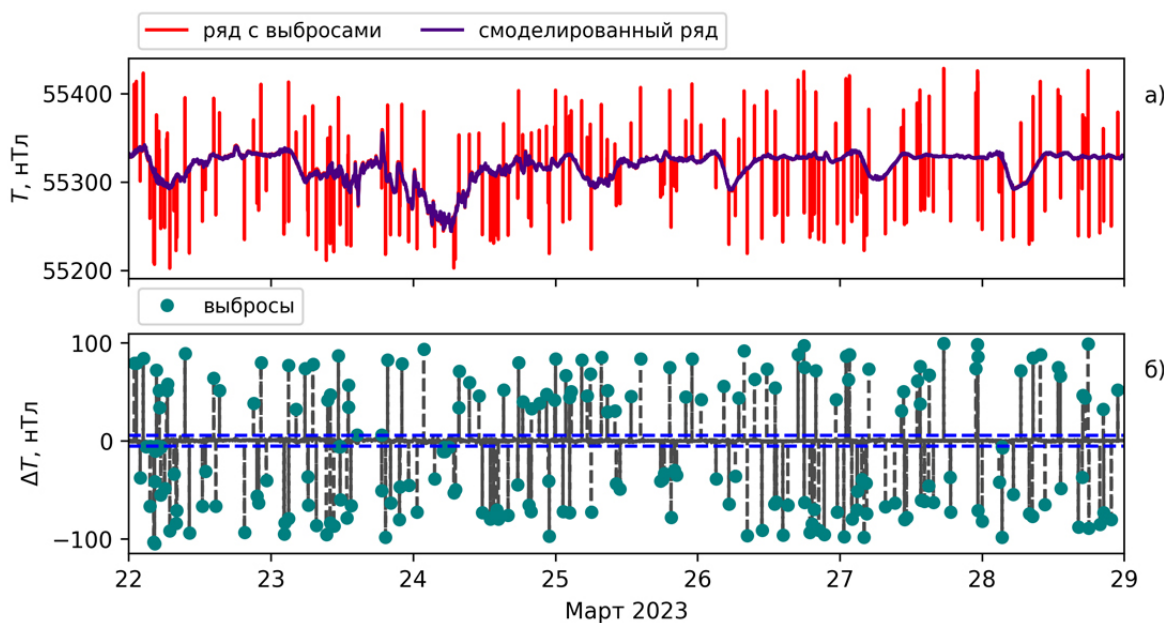


Рис. 15. Загрязненный выбросами и смоделированный временные ряды (а), их разность ΔT с выделенными выбросами (б). Горизонтальные штриховые линии – границы отсечки выбросов L_1 и L_2 .

Fig. 15. Contaminated and reconstructed time series (a) and their difference ΔT with highlighted outliers (b). The horizontal dashed lines indicate the threshold levels L_1 and L_2 used for outlier detection.

но созданных выбросов, однако здесь нужно упомянуть чувствительность к выбору параметра W и возможные трудности при наличии большого числа пересекающихся выбросов.

Следует отметить, что в качестве отфильтрованного временного ряда используется исходный временной ряд, из которого удалены значения, классифицированные как выбросы. Такой подход позволяет сохранить максимум информации об исходных данных, исключая только те точки, которые существенно отклоняются от распределения.

Еще раз подчеркнем, что смоделированный временной ряд служит исключительно для выявления местоположений выбросов и не используется в качестве итогового результата. Такая методика позволяет сохранить структуру временного ряда, минимизируя потери информации при удалении выбросов.

Оценка возмущений, индуцированных ЭРГУ-600

Как отмечалось ранее, на станциях Таш-Башат и Чункурчак, расположенных ближе всего к питающему диполю установки ЭРГУ-600, наблюдаются изменения магнитного поля во время сеансов электромагнитного зондирования. Для оценки величины индуцированного возмущения в магнитном поле («магнитного эффекта») традиционно используется метод вычисления разности между значениями геомагнитного поля на исследуемой станции и базовой (Ак-Суу) [23, 24]. Однако данный подход имеет свои ограничения. Локальные особен-

ности исследуемых станций (географическое положение, техногенные факторы, магнитные аномалии) могут существенно влиять на результаты измерений. Это затрудняет точное определение амплитуды аномалий, вызванных непосредственно сеансами электромагнитного зондирования (рис. 16), из-за присутствия сложного низкочастотного тренда. Для решения этой проблемы требуется разработка более универсальных методов анализа, которые учитывали бы как глобальные закономерности, так и локальные особенности.

Для более точной оценки возмущений, вызванных работой ЭРГУ-600, был применен многоэтапный подход. Сначала участки временного ряда, соответствующие сеансам зондирования, заменялись пропусками на основе данных из журнала пусков ЭРГУ-600. Эти пропуски заполнялись с использованием комбинации алгоритмов kNN + MICE. После этого восстановленные участки записывались обратно в копию исходного временного ряда. Далее вычислялась разность между исходным рядом и его копией, в которой восстановление проводилось на основе данных со станций Ак-Суу, Шавай, Кегеты, Иссык-Ата и Карагай-Булак. Эти станции, находясь далеко от питающего диполя, не фиксировали изменений, вызванных работой ЭРГУ-600. Такой метод позволяет исключить влияние локальных особенностей станций и сосредоточиться на выявлении аномалий, вызванных исключительно электромагнитным зондированием (рис. 17), что потенциально расширяет возможности его применения на других объектах мониторинга.

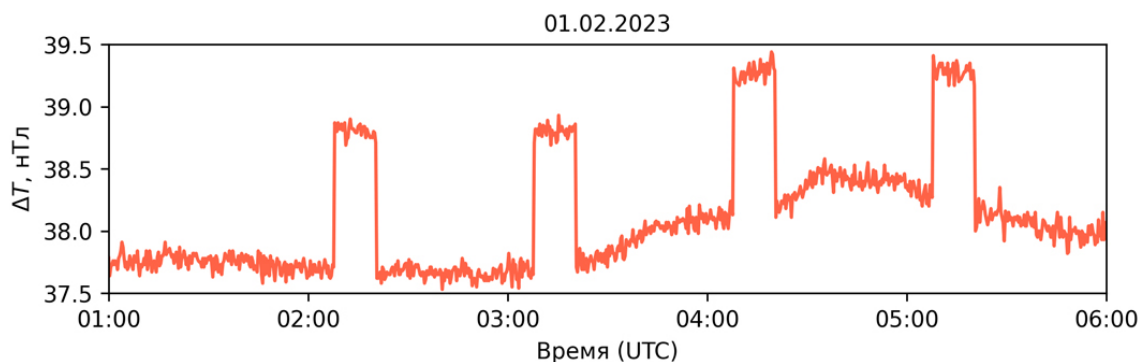


Рис. 16. Разность между временными рядами вариаций величины геомагнитного поля на станциях Таш-Башат и Ак-Суу во время сеансов электромагнитного зондирования с помощью установки ЭРГУ-600.

Fig. 16. Difference between time series of the geomagnetic field variation recorded at the Tash-Bashat and Ak-Suu stations during electromagnetic sounding sessions with the ERGU-600 system.

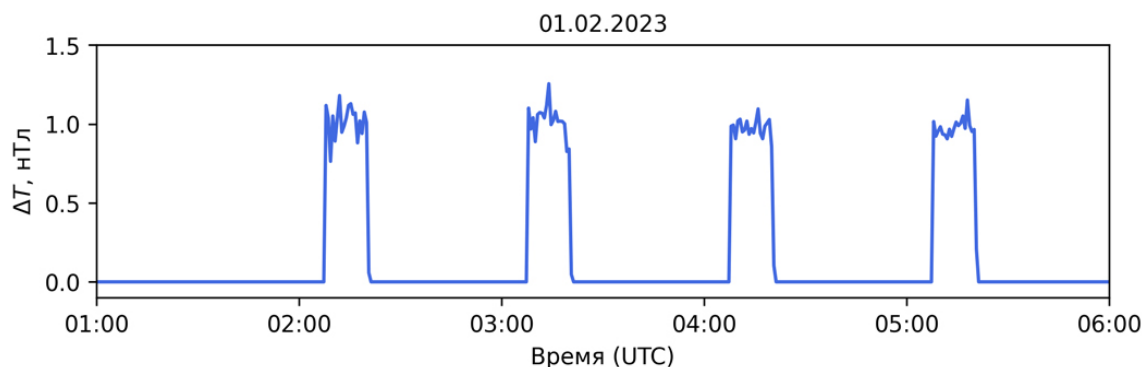


Рис. 17. Разность между исходным и восстановленным временными рядами вариаций величины геомагнитного поля на станции Таш-Башат во время сеансов электромагнитного зондирования с помощью установки ЭРГУ-600.

Fig. 17. Difference between the original and reconstructed time series of the geomagnetic field variation at the Tash-Bashat station during electromagnetic sounding sessions with the ERGU-600 system.

Результаты, представленные на рис. 17, демонстрируют, что предложенная комбинация алгоритмов kNN и MICE позволяет более точно оценить влияние ЭРГУ-600 на изменения геомагнитного поля, зарегистрированные на ближайших станциях. Нужно отметить, что при таком подходе минимизируется влияние человеческого фактора, что способствует воспроизводимости результатов. Также автоматизация значительно снижает трудозатраты на обработку больших объемов данных, что важно для анализа результатов многолетнего мониторинга.

Заключение

В данной работе рассмотрены методы восстановления пропусков в данных геомагнитного поля с использованием алгоритмов kNN и MICE. Проведен детальный анализ их эффективности на наблюдениях с различными типами вариаций, включая типичные Sq-вариации и магнитные бури, а также на данных, дополненных искусственными выбросами. Результаты исследования показали, что алгоритм kNN хорошо восстанавливает регулярные Sq-вариации ($MAE \leq 0.4$ нТл), однако его эффективность значительно снижается во время магнитных бурь ($MAE = 5.7$ нТл) вследствие отсутствия аналогичных значений в диапазоне данных. В то же время алгоритм MICE, благодаря учету корреляций между станциями, дает существенно меньшую ошибку восстановления в условиях магнитной бури ($MAE = 1.1$ нТл).

Установлено, что комбинированное использование kNN для предварительного заполнения и MICE для уточнения восстановленных данных позволяет дополнительно повысить точность восстановления пропусков, особенно на участках с выбросами и магнитными бурями. Следует отметить, что предложенный подход наиболее эффективен для плотных сетей геомагнитного мониторинга с устойчивыми пространственно-временными связями и требует дополнительной валидации при применении к разреженным сетям.

Разработанная методика была адаптирована для оценки магнитных возмущений, создаваемых на ближайших к питающему диполю станциях Таш-Башат и Чункурчак во время работы установки ЭРГУ-600. Предложенный подход включает замену участков данных, полученных во время электромагнитных зондирования, на пропуски с последующим их восстановлением с использованием алгоритма kNN + MICE. Это позволяет снизить влияние локальных особенностей станций и обеспечить более точное выделение индуцированных магнитных возмущений. Предлагаемая методика восстановления пропусков на основе комбинации алгоритмов kNN и MICE также может быть использована для удаления выбросов во временных рядах вариации геомагнитного поля. Этот подход позволяет сохранить структуру временного ряда, минимизируя при этом потери информации при удалении выбросов.

Использование интерпретируемых методов (kNN и MICE) обеспечивает прозрач-

ность процедуры восстановления и позволяет анализировать влияние исходных данных на результат. Дальнейшее развитие исследований предполагает применение предложенных алгоритмов для выявления аномалий в геомагнитном поле, потенциально связанных с подготовкой и развитием сейсмических процессов на территории Бишкекского геодинамического полигона.

Список литературы

- Schneider T. Analysis of incomplete climate data: Estimation of mean values and covariance matrices and imputation of missing values. *Journal of Climate*. 2001,14(5):853-871. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<0853:aocide>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<0853:aocide>2.0.co;2)
- Little R.J.A., Rubin D.B. Statistical analysis with missing data. Third ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2020, 449 p. <https://doi.org/10.1002/9781119482260>
- Jadhav A., Pramod D., Ramanathan K. Comparison of performance of data imputation methods for numeric dataset. *Applied Artificial Intelligence*. 2019,33(10):913-933. <https://doi.org/10.1080/08839514.2019.1637138>
- Love J.J. Missing data and the accuracy of magnetic observatory hour means. *Annals of Geophysics*. 2001,27:3601-3610. <https://doi.org/10.5194/angeo-27-3601-2009>
- Воробьева Г.Р. Подход к восстановлению геомагнитных данных путем сопоставления суточных фрагментов временного ряда с равной геомагнитной активностью. *Компьютерная оптика*. 2019,43(6):1053-1063. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-6-1053-1063>
- Richman M.B., Trafalis T.B., Adrianto I. Missing data imputation through machine learning algorithms. In: Haupt S.E., Pasini A., Marzban C. (eds) *Artificial intelligence methods in the environmental sciences*. Dordrecht: Springer, 2009. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9119-3_7
- Abidin N.Z., Ismail A.R., Emran N.A. Performance analysis of machine learning algorithms for missing value imputation. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2018,9(6):442-447.
- Бархатов Н.А., Левитин А.Е., Сахаров С.Ю. Метод искусственных нейронных сетей как способ восстановления пробелов в записях отдельных магнитных обсерваторий по данным других станций. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2002,42(2):195-198.
- Имашев С.А., Паров С.В. Модифицированное сезонное разложение вариаций модуля индукции магнитного поля Земли. *Информационные технологии*. 2024,30(2):59-67. <https://doi.org/10.17587/it.30.59-67>
- Мухамадеева В.А., Воронцова Е.В., Лазарева Е.А. Опыт проведения геомагнитных наблюдений на Бишкекском геодинамическом полигоне. *Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета*. 2015,15(3):130-133.
- Имашев С.А., Лазарева Е.А. Пространственное распределение составляющих главного геомагнитного поля на основе модели IGRF-13 для территории Кыргызстана. *Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета*. 2022,22(4):192-198. <https://doi.org/10.36979/1694-500X-2022-22-4-192-198>
- Имашев С.А., Рыбин А.К. Сейсмические и геоакустические отклики земной коры на зондирования мощными электрическими импульсами на территории Бишкекского геодинамического полигона. *Наука и технологические разработки*. 2023,102(2-3):63-88. <https://doi.org/10.21455/std2023.2-3-3>
- Imashev S.A. Extended isolation forest – Application to outlier detection in geomagnetic data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021,012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/929/1/012022>
- Имашев С.А., Лазарева Е.А. Удаление выбросов во временных рядах геомагнитного поля на основе фильтра Хампеля. *Информационные технологии*. 2025,31(4):191-198. <https://doi.org/10.17587/it.31.191-198>
- Campbell W.H. *Introduction to geomagnetic fields*. Cambridge University Press, 2003, 337 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139165136>
- Imashev S.A. Method for detecting anomalies in geomagnetic field variations based on artificial neural network. *Geosystems of Transition Zones*. 2024,8(4):343-356. <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.4.343-356>
- Beretta L., Santaniello A. Nearest neighbor imputation algorithms: a critical evaluation. *BMC Medical Informatics and Decision Making*. 2016,16(S3):74. <https://doi.org/10.1186/s12911-016-0318-z>
- Batista G.E.A.P.A., Monard M.C. An analysis of four missing data treatment methods for supervised learning. *Applied Artificial Intelligence*. 2003,17(5-6):519-533. <https://doi.org/10.1080/713827181>
- White I.R., Royston P., Wood A.M. Multiple imputation using chained equations: Issues and guidance for practice. *Statistics in Medicine*. 2011,30(4):377-399. <https://doi.org/10.1002/sim.4067>
- Huque M.H., Carlin J.B., Simpson J.A., Lee K.J. A comparison of multiple imputation methods for missing data in longitudinal studies. *BMC Medical Research Methodology*. 2018,18:168. <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0615-6>
- Stekhoven D.J., Bühlmann P. MissForest – nonparametric missing value imputation for mixed-type data. *Bioinformatics*. 2012,28(1):112-118. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btr597>

22. Hassanat A.B., Abbadi M.A., Altarawneh G.A., Alhasanat A.A. Solving the problem of the k parameter in the kNN classifier using an ensemble learning approach. *International Journal of Computer Science and Information Security*. 2014,12(8):33-39. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.0919>
 23. Лазарева Е.А., Имашев С.А. Вариации полного вектора геомагнитного поля во время пусков электроразведочной генераторной установки (ЭРГУ-600-2). *Современные техника и технологии в научных исследованиях: сб. материалов XIII Междунар. конф. молодых ученых и студентов*. Бишкек, 2021, с. 107-112.
 24. Сорокин В.М., Яценко А.К., Новиков В.А., Имашев С.А., Лазарева Е.А. Распространение электромагнитного сигнала в ионосферу от излучающего заземленного диполя электроразведочной генераторной установки ЭРГУ-600-2 (Северный Тянь-Шань). *Динамические процессы в геосферах*. 2025,17(2):41-53. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_2_41
- ## References
1. Schneider T. Analysis of incomplete climate data: Estimation of mean values and covariance matrices and imputation of missing values. *Journal of Climate*. 2001,14(5):853-871. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<0853:aoicde>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<0853:aoicde>2.0.co;2)
 2. Little R.J.A., Rubin D.B. Statistical analysis with missing data. Third ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2020, 449 p. <https://doi.org/10.1002/9781119482260>
 3. Jadhav A., Pramod D., Ramanathan K. Comparison of performance of data imputation methods for numeric dataset. *Applied Artificial Intelligence*. 2019,33(10):913-933. <https://doi.org/10.1080/08839514.2019.1637138>
 4. Love J.J. Missing data and the accuracy of magnetic observatory hour means. *Annals of Geophysics*. 2001,27:3601-3610. <https://doi.org/10.5194/angeo-27-3601-2009>
 5. Vorobyeva G.R. Approach to the recovery of geomagnetic data by comparing daily fragments of a time series with equal geomagnetic activity. *Computer Optics*. 2019,43(6):1053-1063. (In Russ.). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-6-1053-1063>
 6. Richman M.B., Trafalis T.B., Adrianto I. Missing data imputation through machine learning algorithms. In: Haupt S.E., Pasini A., Marzban C. (eds) *Artificial intelligence methods in the environmental sciences*. Dordrecht: Springer, 2009. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9119-3_7
 7. Abidin N.Z., Ismail A.R., Emran N.A. Performance analysis of machine learning algorithms for missing value imputation. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2018,9(6):442-447
 8. Barkhatov N.A., Levitin A.E., Sakharov S.Yu. The method of artificial neuron networks as a procedure for reconstructing gaps in records of individual magnetic observatories from the data of other stations. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2002,42(2):184-186.
 9. Imashev S.A., Parov S.V. Modified seasonal decomposition variations of earth magnetic field induction module. *Information Technologies*. 2024,30(2):59-67. (In Russ.). <https://doi.org/10.17587/it.30.59-67>
 10. Mukhamadeeva V.A., Vorontsova E.V., Lazareva E.A. Experience of geomagnetic observations at the geodynamic test ground in Bishkek. *Vestnik of KRSU = Herald of KRSU*. 2015,15(3):130-133. (In Russ.).
 11. Imashev S.A., Lazareva E.A. Spatial distribution of the main geomagnetic field components based on IGRF-13 model for Kyrgyzstan territory. *Vestnik of KRSU = Herald of KRSU*. 2022,22(4):192-198. (In Russ.). <https://doi.org/10.36979/1694-500X-2022-22-4-192-198>
 12. Imashev S.A., Rybin A.K. Seismic and geoacoustic responses of the earth's crust to sensing with high energy electric pulses at the territory of the Bishkek geodynamic polygon. *Nauka i tekhnologicheskkiye razrabotki*. 2023,102(2-3):63-88. (In Russ.). <https://doi.org/10.21455/std2023.2-3-3>
 13. Imashev S.A. Extended isolation forest – Application to outlier detection in geomagnetic data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021,012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/929/1/012022>
 14. Imashev S.A., Lazareva E.A. Removal of outliers in geomagnetic field time series using the Hampel filter. *Information Technologies*. 2025,31(4):191-198. (In Russ.). <https://doi.org/10.17587/it.31.191-198>
 15. Campbell W.H. *Introduction to geomagnetic fields*. Cambridge University Press, 2003, 337 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139165136>
 16. Imashev S.A. Method for detecting anomalies in geomagnetic field variations based on artificial neural network. *Geosystems of Transition Zones*. 2024,8(4):343-356. <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.4.343-356>
 17. Beretta L., Santaniello A. Nearest neighbor imputation algorithms: a critical evaluation. *BMC Medical Informatics and Decision Making*. 2016,16(S3):74. <https://doi.org/10.1186/s12911-016-0318-z>
 18. Batista G.E.A.P.A., Monard M.C. An analysis of four missing data treatment methods for supervised learning. *Applied Artificial Intelligence*. 2003,17(5-6):519-533. <https://doi.org/10.1080/713827181>
 19. White I.R., Royston P., Wood A.M. Multiple imputation using chained equations: Issues and guidance for practice. *Statistics in Medicine*. 2011,30(4):377-399. <https://doi.org/10.1002/sim.4067>

20. Huque M.H., Carlin J.B., Simpson J.A., Lee K.J. A comparison of multiple imputation methods for missing data in longitudinal studies. *BMC Medical Research Methodology*. 2018,18:168. <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0615-6>.
21. Stekhoven D.J., Bühlmann P. MissForest – nonparametric missing value imputation for mixed-type data. *Bioinformatics*. 2012,28(1):112-118. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btr597>
22. Hassanat A.B., Abbadı M.A., Altarawneh G.A., Alhasanat A.A. Solving the problem of the k parameter in the kNN classifier using an ensemble learning approach. *International Journal of Computer Science and Information Security*. 2014,12(8):33-39. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.0919>
23. Lazareva E.A., Imashev S.A. [Variations of the full vector of the geomagnetic field during the launch of the electrical exploration generator unit (ERGU-600-2)]. *Sovremennyye tekhnika i tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh: sb. materialov XIII Mezhdunar. konf. molodykh uchenykh i studentov*. Bishkek, 2021, p. 107-112. (In Russ.).
24. Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Novikov A.V., Imashev S.A., Lazareva E.A. Electromagnetic signal propagation into ionosphere from the radiating grounded dipole of the ERGU-600-2 electric prospecting generator facility (Northern Tien-Shan). *Dynamic Processes in Geospheres*. 2025,17(2):41-53. (In Russ.). https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_2_41

Об авторе

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

Поступила 18.02.2026

Принята к публикации 23.03.2026

About the Author

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

Received 18 February 2026

Accepted 23 March 2026