Геосистемы переходных зон Tom 9 № 2 2025

Апрель – Июнь

Vol. 9 No. 2 2025

April – June

Scientific journal

Founder and Publisher:

of the Far Eastern Branch

Periodicity: Quarterly

## Научный журнал

Учредитель и издатель: ФГБУН Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук

Издается с января 2017 г. Периодичность издания 4 раза в год

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.

Журнал:

- индексируется в Russian Science Citation Index (ядро РИНЦ);
- регистрируется в системе CrossRef. Научным
- публикациям присваивается идентификатор DOI;
- включен в каталог Ulrich's Periodicals Directory;

• включен в международную базу научных журналов открытого доступа – Directory of Open Access Journals (DOAJ);

• входит в Перечень ВАК – Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

- 1.6.1. Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика (геолого-минералогические)
- 1.6.3. Петрология, вулканология (геолого-минералогические)
- 1.6.9. Геофизика
- (геолого-минералогические; физико-математические)
- 1.6.14 Геоморфология и палеогеография (географические)
- 1.6.17. Океанология (географические; геолого-минералогические; физико-математические)
- 1.6.20. Геоинформатика, картография (физико-математические)
- 1.6.21. Геоэкология

(географические; геолого-минералогические)

- 1.5.15. Экология (биологические)
- 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела (технические; физико-математические)
- отнесен в Перечне ВАК к журналам II категории (К2).

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.

Institute of Marine Geology and Geophysics

of the Russian Academy of Sciences

Published since January 2017

The Journal is:

 indexed in Russian Science Citation Index (RISC core):

**GEOSYSTEMS OF TRANSITION** 

 registered in the CrossRef system. Scientific publications are assigned an individual identifier DOI;

• included in the Ulrich's Periodicals Directory database; · included in the Directory of Open Access Journals (DOAJ);

 included in the VAK List – the List of peer reviewed scientific journals, in which main scientific results of dissertations for the Candidate of Sciences and Doctor of Sciences degrees in the following scientific specialties and corresponding branches of science should be published:

- 1.6.1. General and regional geology. Geotectonics and geodynamics (Geology and Mineralogy)
- 1.6.3. Petrology and volcanology (Geology and Mineralogy)
- 1.6.9. Geophysics
- (Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics)
- 1.6.14 Geomorphology and Paleogeography
- (Geography) 1.6.17. Oceanology (Geography; Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics)
- 1.6.20. Geoinformatics and cartography (Physics and Mathematics)
- 1.6.21. Geoecology (Geography; Geology and Mineralogy)
- 1.5.15. Ecology (Biology)
- 1.1.8. Mechanics of deformable solids (Physics and Mathematics; Engineering)
- it is assigned to the K2 category in the VAK list.

Адрес учредителя и издателя ИМГиГ ДВО РАН ул. Науки, 1б, Южно-Сахалинск, 693022 Тел./факс: (4242) 791517 E-mail: gtrz-journal@mail.ru Сайт: http://journal.imgg.ru

Postal address

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

© ИМГиГ ДВО РАН, 2025

#### Редакционная коллегия

#### Главный редактор

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

#### Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

- Прытков Александр Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск
- Адушкин Виталий Васильевич, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, Институт динамики геосфер РАН; Московский физикотехнический институт. Москва
- Алексанин Анатолий Иванович, д-р техн. наук, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
- Быков Виктор Геннадьевич, д-р физ.-мат. наук, Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск
- Закупин Александр Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск – зам. главного редактора
- Ковалев Дмитрий Петрович, д-р физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск
- Кочарян Геворг Грантович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт динамики геосфер РАН, Москва
- Куркин Андрей Александрович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород
- Лабай Вячеслав Степанович, д-р биол. наук, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск
- Левин Владимир Алексеевич, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток; Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
- Лучин Владимир Александрович, д-р геогр. наук, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток
- Марапулец Юрий Валентинович, д-р физ.-мат. наук, доцент, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, Паратунка
- Огородов Станислав Анатольевич, профессор РАН, д-р геогр. наук, чл.-корр. РАЕН, 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
- Разжигаева 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), Deputi Director, Head of the Laboratory of land-ocean interactions and the anthropogenic impact, P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

#### Deputy Editor-in-Chief

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

#### Executive Secretary

- Alexander S. Prytkov, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk
- Vitaly V. Adushkin, Academician of RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Geosphere Dynamics of the RAS; Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow
- Anatoly I. Alexanin, Dr. Sci. (Eng.), The Institute of Automation and Control Processes of the FEB RAS, Vladivostok
- Victor G. Bykov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics of the FEB RAS, Khabarovsk
- Alexander S. Zakupin, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk – Deputy Editor-in-Chief
- Dmitry P. Kovalev, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk
- Gevorg G. Kocharyan, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Institute of Geosphere Dynamics of the RAS, Moscow
- Andrei A. Kurkin, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhniy 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 им. Н.И. Вавилова, Саратов
- 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 научноисследовательского 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. 11.7. Тираж 150 экз. Заказ 8071. Свободная цена. Дата выхода в свет 26.06.2025.

Подписной индекс в Объединенном интернет-каталоге «Пресса России» (www.pressa-rf.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 11.7.

Number of copies 150. Order no. 8071. Free price. Date of publishing 26.06.2025.

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

# Геосистемы переходных зон

Том 9 № 2 2025 Апрель – Июнь

### https://doi.org/10.30730/gtrz-2025-9-2

#### СОДЕРЖАНИЕ

http://journal.imgg.ru

#### Геофизика, сейсмология

#### Океанология

#### Океанология. Гидрогеохимия

#### Мониторинг опасных геологических процессов

# Геоморфология и палеогеография. Петрология, вулканология

 ISSN 2713-2161 (Online) GEOSYSTEMS OF TRANSITION ZONES Vol. 9 No. 2 2025 April – June

https://doi.org/10.30730/gtrz-2025-9-2

ISSN 2541-8912 (Print)

## CONTENT

#### Geophysics, Seismology

#### Oceanology

#### Oceanology. Gydrogeochemistry

#### Monitoring of geological hazards

> Geomorphology and Paleogeography Petrology and volcanology

124

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



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

УДК 550.343,550.370

https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.2.125-144 https://www.elibrary.ru/rrjeoc

# Вариации вертикальной компоненты электротеллурического поля на Южно-Сахалинском геофизическом полигоне в 2024 году

Н. С. Стовбун<sup>@1</sup>, А. С. Закупин<sup>1</sup>, Л. М. Богомолов<sup>1</sup>, Д. В. Костылев<sup>1,2</sup>,

И. П. Дудченко<sup>1</sup>, С. А. Гуляков<sup>1</sup>

<sup>@</sup>E-mail: n1kolay19971997@yandex.ru

<sup>1</sup> Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия <sup>2</sup> Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. В Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН в 2024 г. начаты непрерывные измерения вертикальной компоненты электротеллурического поля (ЭПП), дополнившие ранее организованный мониторинг горизонтальных компонент ЭТП. Вертикальная составляющая ЭТП измеряется по разности потенциалов между металлическими пластинами, расположенными в грунте одна над другой на глубине около 2 м. На измерительном пункте на площадке института (г. Южно-Сахалинск) установлено 2 системы пластин, подключенных к входу аналого-цифрового преобразователя. Основной целью работы является выявление и анализ вариаций вертикальной компоненты электротеллурического поля и установление возможной связи их с геодеформационным процессом и вариациями сейсмичности. В первый год измерений вертикальной компоненты ЭТП было выделено 4 периода с аномально высоким уровнем напряженности поля по сравнению со средним значением за период наблюдения: максимальный в 35 раз, минимальный в 5 раз. Суммарно эти периоды занимают около половины всего времени регистрации, именно в эти периоды произошло 80 % всех землетрясений южной части о. Сахалин за 11 месяцев 2024 г. (24 события из 30). Для горизонтальных компонент ЭТП не отмечалось столь значительных аномалий, как для вертикальной. Полученные результаты указывают на то, что изменения вертикальной компоненты ЭТП могут отражать вариации сейсмической активности в ближней зоне. Эти изменения, предположительно, могут считаться признаком подготовки землетрясений вблизи пункта измерений.

**Ключевые слова:** электротеллурическое поле, вертикальная компонента, регистрация данных, аномалии геофизических полей, сейсмические события

# Variations in the vertical component of the electrotelluric field at the Yuzhno-Sakhalinsk geophysical test site in 2024

Nikolai S. Stovbun<sup>@1</sup>, Aleksander S. Zakupin<sup>1</sup>, Leonid M. Bogomolov<sup>1</sup>, Dmitry V. Kostylev<sup>1,2</sup>,

Ilya P. Dudchenko<sup>1</sup>, Sergei A. Gulyakov<sup>1</sup>

<sup>@</sup>E-mail: n1kolay19971997@yandex.ru

<sup>1</sup>Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

<sup>2</sup> Sakhalin Branch, Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

**Abstract.** In 2024, the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences started continuous measurements of the vertical component of the electrotelluric field (ETF), which were integrated into the previously organized monitoring of the horizontal components of the ETF. The vertical component of the ETF is measured by the potential difference between metal plates located in the ground, one above the other, at a depth of about 2 m. Two systems of plates were installed at the Yuzhno-Sakhalinsk geophysical test site (on the territory of IMGG FEB RAS) and were connected to an analog-to-digital converter (ADC). The aim of the study is to identify and analyze variations in the vertical ETF that may be associated with the geological deformation and variations in seismicity. In the first year of measurements of the vertical component of the ETF, 4 periods with an abnormally high level of field strength were identified compared to the average value for the observation period: maximum by 35 times,

minimum by 5 times. In total, these periods occupy about half of the entire registration time; it was during these periods that 80 % of all earthquakes in the southern part of Sakhalin Island occurred over 11 months of 2024 (24 events out of 30). For the horizontal components of the ETF, no such significant anomalies were observed as for the vertical one. Obtained results indicate that changes in the vertical component of the ETF may reflect variations in seismic activity in the near field. These changes can presumably be considered a sign of earthquake activity near the measurement point.

Keywords: electrotelluric field, vertical component, data recording, geophysical field anomalies, seismic events

Для цитирования: Стовбун Н.С., Закупин А.С., Богомолов Л.М., Костылев Д.В., Дудченко И.П., Гуляков С.А. Вариации вертикальной компоненты электротеллурического поля на Южно-Сахалинском геофизическом полигоне в 2024 году. Геосистемы переходных зон, 2025, т. 9, № 2, с. 125–144. https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.2.125-144; https://www.elibrary.ru/rrjeoc

#### Финансирование и благодарности

Работа выполнена 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/; http://www.gsras.ru/unu/). *For citation:* Stovbun N.S., Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Kostylev D.V., Dudchenko I.P., Gulyakov S.A. Variations in the vertical component of the electrotelluric field at the Yuzhno-Sakhalinsk geophysical test site in 2024. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 2, pp. 125–144. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.2.125-144; https://www.elibrary.ru/rrjeoc

#### Funding and Acknowledgements

The research was carried out using data obtained at a unique scientific facility "Seismic infrasound complex for monitoring the Arctic cryolithozone and complex for continuous seismic monitoring of the Russian Federation, adjacent territories and the world" (https://ckp-rf.ru/usu/507436/; http://www.gsras.ru/unu/).

#### Введение

Геофизические измерения играют важную роль в изучении физических свойств Земли, так как динамика изменения физических полей отражает взаимодействие геосфер, их свойства, а также корреляционные связи между полями разной природы [1, 2]. Основным объектом исследования в данной области является процесс энергообмена между литосферой и атмосферой, в зоне контакта которых сконцентрирована человеческая деятельность. Изучение естественного электромагнитного поля Земли отражает как межпланетные взаимодействия, так и изменения в электрокинетических и геомеханических характеристиках породных массивов. Вариации естественного электромагнитного поля обусловлены динамикой блочных структур и изменением их напряженно-деформированного состояния [3]. Поиску предвестников землетрясений в аномалиях параметров естественного электромагнитного поля посвящено огромное число работ. Обзор важнейших результатов проведен, например, в [4-6]. В работах последнего десятилетия можно наблюдать значительный рост объема регистрируемых данных по вариациям электромагнитных (электротеллурического и геомагнитного) полей, а также повышение качества измерений [7-12]. В этих работах в большинстве случаев исследовались вариации горизонтальных компонент электротеллурического поля (ЭТП), а также геомагнитные вариации. Можно отметить частое применение аппаратуры для магнитотеллурического зондирования [13–17]. Измерениям вертикальной компоненты ЭТП уделено значительно меньшее внимание. Тем не менее, было установлено наличие вариаций вертикального электрического поля, вызванных деформационными (сейсмотектоническими) процессами в коре Камчатки [18-22]. Измерения напряженности вертикальной компоненты электрического поля  $E_{Z}$  проводились как в атмосфере, около дневной поверхности, так и в грунте. Для измерений в атмосфере использовали датчик напряженности электрического поля «Поле-2М» (ГГО им. А.И. Воейкова [23]). Измерения E<sub>7</sub> в грунте проводили при помощи разнесенных по вертикали пластин-электродов площадью 0.25 м<sup>2</sup> по методике Д.А. Кузнецова [22]. Как показали работы камчатских геофизиков, применение датчиков для мониторинга электротеллурического поля позволяет в значительной степени подавить помехи, наводимые естественными (молнии, ионосферные возмущения) и техногенными (коммутация сильноточных разрядов) источниками. В этом отношении системы регистрации вертикального электрического поля Земли обладают преимуществом по сравнению с наиболее распространенными системами измерения горизонтальных компонент ЭТП (которые более восприимчивы к сторонним электромагнитным помехам, так как неизбежно включают измерительный диполь, т.е. фактически «антенну»).

В июле 2023 г. на Южно-Сахалинском геофизическом полигоне ИМГиГ ДВО РАН (47.0293° с.ш., 142.7166° в.д.) была развернута современная система регистрации горизонтальных компонент ЭТП и стали проводиться непрерывные измерения. При создании системы применены новейшие аппаратные и программные разработки, обеспечивающие высокое качество регистрируемых сигналов ЭТП. Своеобразным тестом чувствительности этой системы к деформационным процессам в Земле стала реакция на землетрясение умеренной магнитуды (M = 3.4), произошедшее 09.08.23 на расстоянии в 10 км от места измерений ЭТП. В условиях умеренной сейсмичности на территории о. Сахалин это довольно редкий случай, когда очаг землетрясения такой магнитуды оказывается вблизи пункта измерений. В период с июля по сентябрь 2023 г. в записях горизонтальных компонент ЭТП в ночное время были обнаружены сигналы, следующие с характерным периодом повторяемости 140-160 с [24]. В асейсмичный период, с сентября 2023 г. по февраль 2024 г., такие сигналы не наблюдались.

В декабре 2023 г. на том же полигоне была введена в эксплуатацию система измерения вертикальной составляющей ЭТП, и с этого времени в ИМГиГ ДВО РАН проводятся непрерывные измерения всех трех компонент электрического поля Земли в диапазоне частот 0–150 Гц для горизонтальных компонент и 0–10 Гц для вертикальной. Учитывая ограниченное число исследований вертикальной компоненты ЭТП и предполагаемую помехоустойчивость, выявленную в работах камчатских геофизиков, актуальным представляется изучение вариаций вертикального ЭТП в условиях сейсмичности юга о. Сахалин для оценки их связи с геодеформационными процессами.

В работе представлено исследование поведения вертикальной компоненты ЭТП в период с 01.01.2024 по 30.11.2024 с выявлением аномалий, которые могут быть ассоциированы с проявлениями сейсмической активности.

# Методика измерений и аппаратурное обеспечение

Вертикальная система измерений была интегрирована с уже действующими измерительными каналами горизонтальных компонент ЭТП. Функциональная схема системы измерений ЭТП представлена на рис. 1. Первичные преобразователи горизонтального ЭТП представляют собой три диполя, направленных, соответственно, на запад (W), север (N) и северо-запад (NW) от общего полюса (рис. 1 а). В качестве заземлителя используется электрод из нержавеющей стали, заглубленный в грунт на 2 м и соединенный с центральным измерительным модулем, в котором смонтирована материнская плата «TIGD-CI13» форм-фактора «Mini-ITX», а также плата АЦП модели «L-780М» производства компании «L-Card» (https://www.lcard.ru/products/boards/1-780). Подробное описание методики измерения горизонтальной компоненты ЭТП представлено в [24].

При проектировании систем электродов для измерения вертикального ЭТП учитывался подход, разработанный в конце 1980-х годов на Камчатке Д.А. Кузнецовым [22]. На глубине около 2 м были установлены две системы электродов (рис. 1 с), расположенные на расстоянии 10 м друг от друга. Каждая система (по сути, первичный преобразователь) состоит из трех пластин размером 50 × 50 см, расположенных соосно и параллельно друг другу на расстоянии 50 см. Пластины изготовлены из нержавеющей стали. На одной из поверхностей каждой пластины нанесено изолирующее покрытие. Промежутки между пластинами заполнены грунтом. Пластины установлены таким образом, что грунт между нижней и промежуточной пластинами контактирует с металлической поверхностью, а грунт между промежуточной и верхней – с изолирующим покрытием. Таким образом, для обращенных друг к другу поверхностей пластин условия гальванического контакта или изоляции одинаковы (в отличие от конфигурации электродов в методике [22]). Это может уменьшить нежелательный вклад приэлектродных эффектов в измеряемую разность потенциалов между пластинами.

Разность потенциалов для средних и верхних пластин определяется относительно нижних (каналы СН1, СН2, СН7, СН8, рис 1 с). В качестве АЦП используется 8-канальный модуль аналогового ввода модели «ADAM-4017» (рис. 1 b) (https://www.advantech.com/ru-ru/ products/gf-5vtd/adam-4017), который находится в непосредственной близости к электродам, а с главным измерительным модулем соединен линией длиной 30 м по шине RS-485. Модуль «ADAM-4017» расположен в отдельном корпусе, в котором функционирует система термостабилизации. Измерения осуществляются в диапазоне частот 0–10 Гц. Модуль включает в себя фильтр низких частот, а также режекторный фильтр для подавления промышленных помех. Было создано программное обеспечение (язык программирования C++), которое считывает данные с «ADAM-4017», создавая 4-часовые файлы в непрерывном режиме.

Нержавеющая сталь выбрана для электродов благодаря ее высокой коррозионной стойкости, что критично для многолетнего мониторинга в естественных условиях. В отличие от неполяризующихся электродов, таких как Cu/CuSO<sub>4</sub>, которые требуют регулярного обслуживания и стабильного электролитического контакта, стальные пластины сохраняют целостность при длительном нахождении в грунте в условиях низких зимних температур. Известно, что такие электроды могут создавать контактный потенциал из-за



Рис. 1. Функциональная схема измерения ЭТП на Южно-Сахалинском геофизическом полигоне. (а) Диполи W (запад), NW (северо-запад), N (север); (b) 8-канальный модуль аналогового ввода «ADAM-4017»; (с) системы вертикальных электродов. Стрелки показывают стороны пластин, на которые было нанесено изолирующее покрытие.

**Fig. 1.** Functional scheme of the ETP measurement at the Yuzhno-Sakhalinsk geophysical test site. (a) Dipoles W (west), NW (northwest), N (north); (b) 8-channel analog input module "ADAM-4017"; (c) systems of vertical electrodes. Arrows indicate the surfaces of the plates coated with an insulating layer.

электрохимических процессов на границе металл-грунт (поляризация). Но, как будет показано в разделе «Связь аномалий ЭТП с сейсмической активностью», фоновое смещение напряженности поля не превышает 20 мВ/м, что существенно меньше наблюдаемых резких «бухтообразных» изменений (до 912 мВ/м), которые нельзя объяснить влиэкзогенных факторов янием (температура, влажность и т.д.).

Таким образом, возможное смещение напряженности поля из-за поляризации (0-20 мВ/м) хоть и не позволяет измерить истинное значение вертикального электротеллурического поля. однако значительные амплитуды аномалий (до 912 мВ/м) и их стабильное выделение на фоне постоянной составляющей сигнала подтверждают применимость используемых нами электродов для оценки изменений ЭТП, связанных с сейсмическими событиями на юге Сахалина.

В мае 2024 г были проведены малоглубинные электрозондирования однополярными импульсами с регистрацией откликов на каналах горизонтальных диполей N, W, NW (рис. 2 а). Дополнительно регистрировались сигналы по каналам вертикального ЭТП (рис. 2 b, c). Данные на графиках приведены в мкВ/м. Для электрозондирования использовался первичный возбуждающий диполь длиной 100 м, центр которого располагался на расстоянии 160 м от центра диполя N горизонтальной компоненты ЭТП. На концах возбуждающего диполя на глубину 1 м были вбиты стержневые





Fig. 2. Variations in the data of channels of horizontal (a) and vertical (b, c) components of ETF during electrical sounding.

электроды из нержавеющей стали. Аппаратура и методика, применяемые нами для электрозондирований, описаны в [25]. В ходе эксперимента на возбуждающий диполь подавали 300 В постоянного напряжения с током 5.5 А. Подача напряжения осуществлялась импульсами по 20 с с паузами 20 с между ними. Данные со всех каналов были отфильтрованы полосовым фильтром в диапазоне 0.01-1 Гц для подавления низкочастотных трендов и высокочастотных помех. На рис. 2 видно, что на всех каналах горизонтального поля наблюдается реакция на электрозондирование – импульсы с волновой формой, подобные зондирующим. Наибольшая амплитуда отклика отмечена на диполе N (1420 мкВ/м), ближайшем к источнику зондирований, а наименьшая – на диполях NW (230 мкВ/м) и W (115 мкВ/м). Тем самым была подтверждена исправность измерительных каналов и отсутствие аппаратных ошибок или обрывов в линиях N, NW, W.

Для подтверждения чувствительности системы вертикальных пластин к напряженности вертикальной компоненты электрического поля  $E_7$  были проанализированы отклики каналов СН1, СН2, СН7, СН8 на электрозондирование (рис. 1 с, 2 b, с). Амплитуда импульсов для каналов СН1, СН2, СН7, СН8 составила 46, 52, 80 и 37 мкВ/м соответственно. Полярность импульсов на каналах CH1, CH2 отрицательная, в то время как для СН7, СН8 положительная. Амплитуды отклика на каналах СН7, СН8 различаются в 2.16 раза (80 и 37 мкВ/м), тогда как на каналах CH1 и CH2 они близки (46 и 52 мкВ/м). Для сравнения с измеренными откликами каналов CH1, CH2, СН7, СН8 было рассчитано значение вертикального электрического поля  $E_z$  в точке pacположения электродов. Используя данные для возбуждающего диполя и измерительного диполя N и применяя диполь-дипольную расчетную схему [26], мы предварительно рассчитали кажущееся удельное сопротивление грунта. Величина кажущегося удельного сопротивления составила 121 Ом м. Потенциал в точке расположения пластин относительно концов возбуждающего диполя определяем по формуле [26]:

$$V = \frac{I \times \rho}{2\pi} \times \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right),\tag{1}$$

где V – потенциал в точке, вызванный электрическим полем от токов, протекающих через электроды возбуждающего диполя,  $R_1, R_2$  – расстояние от электродов возбуждающего диполя до точки, I – ток,  $\rho$  – удельное сопротивление. Компоненты электрического поля можно вычислить, если взять частные производные по координатам:

$$E_X = \frac{-\partial V}{\partial x}, \quad E_Y = \frac{-\partial V}{\partial y}, \quad E_Z = \frac{-\partial V}{\partial z}.$$
 (2)

Вертикальная компонента  $E_z$  была определена путем дифференцирования потенциала V (уравнение 1) по координате z (уравнение 2 для  $E_z$ ), что дало уравнение:

$$E_z = \frac{I \times \rho}{2\pi} \times \left(\frac{z - z_a}{R_1^3} + \frac{z - z_b}{R_2^3}\right), \quad (3)$$

где  $z, z_a, z_b -$  глубины точки наблюдения (z) и концов диполя  $(z_a, z_b)$ . Расчеты были проведены для пластин на глубинах 1 м и 1.5 м (каналы СН1, СН2, СН7, СН8). В результате расчета получились значения  $E_z$  58 и 46 мкВ/м для каналов СН1, СН2 и 56 и 45 мкВ/м для СН7, СН8. Расчетные значения  $E_{z}$  (45–58 мкВ/м) близки к измеренным амплитудам откликов (46-80 мкВ/м), что подтверждает чувствительность измерительной системы к изменениям напряженности E<sub>z</sub> с амплитудой больше или порядка десятков мкВ/м и ее способность надежно регистрировать изменения вертикальной компоненты ЭТП с более высокой амплитудой (десятки-сотни мВ/м). Хотя круговой электрический диполь [27] остается актуальным подходом, вышеприведенный метод был выбран из-за ограниченного пространства на участке и наличия готового оборудования.

Система измерений показала себя устойчивой к погодным условиям юга Сахалина. Даже длительные периоды низких температур не повлияли на непрерывность сбора данных. При отключениях электроэнергии были потери данных за периоды от нескольких часов до нескольких дней – в сумме 7.72 % потерянных данных от всего объема измерений в 11 мес. На данный момент накоплен почти годовой объем данных по вертикальной компоненте ЭТП, что приемлемо для первичного анализа и сопоставления с данными сейсмических каталогов. В качестве рабочего каталога 2024 г. использовался оперативный каталог землетрясений, сформированный на основе данных регионального информационного обрабатывающего центра (РИОЦ) «Южно-Сахалинск».

# Результаты

# Анализ вариаций вертикальной компоненты ЭТП

Для визуализации данных вертикальной составляющей ЭТП использовался программный пакет «Origin Pro 2022». Для соединения и обработки 4-часовых файлов с модуля «ADAM-4017» применялось ПО собственной разработки (язык программирования C++). Вертикальная компонента напряженности ЭТП ( $E_z$ ) пропорциональна разности потенциалов, регистрируемой по каналам CH1, CH2, CH7, CH8. На графиках ниже представлена динамика изменения  $E_z$  в течение времени (в формате UTC).

Анализ вертикальной составляющей ЭТП заключался в поиске так называемых аномалий, которые характеризуются значительным отклонением величины  $E_z$  от фонового уровня. В исследуемый период на всех каналах одно-

временно наблюдались четыре продолжительных интервала времени, в которые зафиксированы «бухтообразные» аномалии разной длительности и формы. Примеры двух аномалий представлены на рис. 3, где изображен график изменения  $E_z$  на канале CH2 с 20.05.2024 по 20.08.2024.

Аномалии ярко выражены по отношению к фоновому уровню. Они начинаются резким увеличением амплитуды сигнала, которая остается высокой на протяжении определенного периода времени с последующим спадом к фоновым значениям.

Для определения точного времени начала и конца аномалий данные за весь период измерений усреднялись с использованием скользящего среднеквадратичного отклонения (СКО) с окном в двое суток. Это позволило выделить резкие отклонения от среднего уровня. Далее для отфильтрованного сигнала вычислялось медианное значение, так как оно менее чувствительно к выбросам данных. Началом аномалии считается выход отфильтрованного сигнала за пределы медианного значения (на более чем сутки), а возврат в его пределы считается окончанием аномалии. На рис. 4 представлен пример определения начала и конца аномалии по вышеописанному алгоритму. В результате выделяются границы аномалий – первая с 03.06.2024 по 14.06.2024 и следующая с 15.07.2024 по 07.08.2024; кратковременное падение СКО до нуля отражает стабилизацию сигнала, не нарушая целостности аномального периода.

Временные границы выделенных аномальных интервалов ограничены началом самой первой аномалии из четырех каналов и окончанием последней. Такой подход обусловлен тем, что аномалии на каналах происходят с разницей в несколько дней. В аномальные интервалы включаются только те периоды, где аномалии наблюдаются на всех каналах. На рис. 5 представлены изменения  $E_z$  на каналах CH1, CH2, CH7 и CH8 в период с 1 января по







30 ноября 2024 г. (сигнал децимирован до 1 Гц). Аномальные интервалы на рис. 5 ограничены синими линиями и пронумерованы по порядку их появления (А1–А4). Первый период (А1), самый продолжительный, длился 102 сут. Ано-



20.05.2024 02.06.2024 15.06.2024 28.06.2024 11.07.2024 24.07.2024 06.08.2024 19.08.2024

**Рис. 4.** Пример определения границ аномальных интервалов в данных канала CH2 с 20.05.2024 по 20.08.2024 (даты и время здесь и далее приводятся в формате UTC). Черная линия – данные канала CH2, отфильтрованные среднеквадратичным отклонением с окном в двое суток; красная линия – медианное значение  $E_{\rm Z}$  для канала CH2. Аномалии выделены серым цветом.

**Fig. 4.** An example of determining the borders of anomaly periods in the CH2 channel from 20.05.2024 to 20.08.2020. Black line indicate CH2 channel data filtered by standard deviation with a two-day window; red line indicates median value of  $E_z$  for the CH2 channel. Anomalies are highlighted in gray.

малия характеризовалась максимальной амплитудой напряженности – 912 мВ/м (СН1). Второй аномальный период (А2) был самым коротким (17 сут) и имел наименьшую амплитуду напряженности поля среди всех за-

регистрированных аномалий – 24 мВ/м (СН8). Таким образом, максимальная амплитуда аномалии  $E_z$ , зафиксированная за период измерений, превышает фон в 35 раз, а минимальная – в 5 раз. Длительность периодов и другие характеристики аномалий приведены в табл. 1.

За весь период наблюдений форма аномалий ЭТП (пропорциональных разностям потенциалов между пластинами) различалась для каналов СН1 и СН2, а для каналов СН7, СН8 (рис. 1 с) была идентичной. Различия в амплитудах аномалий для каналов СН1 и СН7 (измерения между нижними и средними пластинами) были в пределах 40–170 мВ/м. Для каналов СН2 и СН8 (измерения

Таблица 1. Параметры аномальных вариаций	вертикальной компоненты	а ЭТП за период измерений
Table 1. Parameters of anomalies of the vertical	ETF for the measurement pe	eriod

N⁰	Дата и время, начало	Дата и время, окончание	Длительность, сутки	Максимальная амплитуда аномалии, мВ/м	Средняя амплитуда по двум системам, мВ/м	
A1	05.01.2024	16.04.2024	102	CH1 = 912	891	
	14:52	04:44		CH7 = 870		
				CH2 = 57	254	
				CH8 = 451	234	
A2	31.05.2024	16.06.2024	17	CH1 = 48	72	
	01:30	21.06		CH7 = 98	15	
				CH2 = 32	28	
				CH8 = 24	20	
A3	16.07.2024	07.08.2024	22	CH1 = 476	425	
	17:07	05:56		CH7 = 374		
				CH2 = 59	104	
				CH8 = 150	104	
A4	16.09.2024	28.10.2024	43	CH1 = 640	552	
	10:44	11:48		CH7 = 464		
				CH2 = 95	150	
				CH8 = 221	130	

между нижними и верхними пластинами) амплитуды были разными для отдельных аномальных периодов. Например, для A2 амплитуды были близки (32 и 24 мВ/м), а для A1 разница в амплитудах составила почти 400 мВ/м.

# Связь аномалий ЭТП с сейсмической активностью

В предшествующих работах по электромагнитным измерениям [8-11] установлено, что аномалии, связанные с подготовкой землетрясений, могут фиксироваться за несколько недель до главного сейсмического события. В этой связи представляет интерес выявление совпадений периодов выделенных аномалий с сейсмическими событиями, которые произошли в ближней зоне. Для анализа связи аномалий ЭТП с сейсмической активностью были рассмотрены землетрясения с магнитудой M > 3, зарегистрированные в южной части о. Сахалин в 2024 г. (табл. 2; рис. 6) в пределах прямоугольной зоны с координатами 47.8° с.ш., 145.6° в.д. – 45.6° с.ш., 139.9° в.д. В табл. 2 приведены параметры землетрясений и расстояния от гипоцентров до пункта регистрации ЭТП.

На рис. 6 показано расположение эпицентров землетрясений, перечисленных в табл. 2. Дополнительно на карту нанесены разломные структуры [28]. Большинство из землетрясений (21 событие из 30) – глубокофокусные, с гипоцентрами под Охотским морем. Самое сильное землетрясение с магнитудой M = 6.1произошло 10.08.2024. Из 9 очагов коровых землетрясений 6 лежат около Западно-Сахалинского разлома (ЗСР), один (№ 11) – под Охотским морем, а два (№ 15, 20) попадают в ближнюю от измерительного пункта зону. Гипоцентр самого близкого землетрясения (событие № 15 от 31.03.2024, *M* = 3.0) находился всего в 42 км от пункта регистрации ЭТП, второго близкого землетрясения (№ 20 от 15.06.2024, *М* = 4.1) – в 49 км.

На рис. 7 приведены изменения напряженности поля  $E_z$  со всех измерительных каналов в период измерений, отмечены также землетрясения из табл. 2. Для 24 из 30 землетрясений с магнитудой  $M \ge 3$  время событий совпадает с периодами обнаруженных аномалий.

На первый аномальный период выпадает 16 землетрясений, 7 из которых коровые,



01.01.2024 18.02.2024 06.04.2024 24.05.2024 11.07.2024 28.08.2024 15.10.2024

Рис. 5. Изменения напряженности поля  $E_z$  на каналах CH1, CH2, CH7 и CH8 в период с 01.01.2024 по 30.11.2024 в аномальные периоды A1–A4 (табл. 1).

Fig. 5. Variations in electric field strength  $E_z$  on channels CH1, CH2, CH7 and CH8 from 01.01.2024 to 30.11.2024 and anomaly periods A1–A4 (Table 1).

Таблица 2. Землетрясения с *M* ≥ 3, произошедшие с 01.01.2024 по 30.11.2024 в пределах прямоугольной зоны с координатами 47.8° с.ш., 145.6° в.д. – 45.6° с.ш., 139.9° в.д.

**Table 2.** Earthquakes with  $M \ge 3$  that occurred from 01.01.2024 to 30.11.2024 within the rectangular area bounded by coordinates 47.8° N, 145.6° E – 45.6° N, 139.9° E.

№	Дата	Время (UTC)	Координаты, N°; Е°	Глубина, км	Магнитуда, ML	Расстояние от пункта ЭТП до гипоцентра, км
1	04.01.2024	12:42:42	46.62; 141.78	17	3.6	85
2	15.01.2024	00:15:03	45.66; 142.81	314	4.1	348
3	19.01.2024	16:56:59	46.82; 141.57	7	4.6	89
4	23.01.2024	15:36:14	45.79; 143.22	333	3.3	362
5	29.01.2024	16:53:52	46.26; 141.56	10	3.2	121
6	06.02.2024	03:39:31	45.75; 142.94	349	3	377
7	11.02.2024	05:16:30	45.80; 141.76	12	3.9	153
8	13.02.2024	07:15:09	45.82; 141.94	10	3.7	145
9	16.02.2024	22:55:38	46.48; 143.97	361	3.7	378
10	19.02.2024	09:32:50	46.72; 145.00	421	3.4	457
11	25.02.2024	06:22:57	45.62; 143.20	25	3.3	162
12	12.03.2024	18:22:28	45.64; 142.16	317	4.7	355
13	23.03.2024	19:45:53	46.77; 144.71	385	3.9	415
14	31.03.2024	09:37:57	45.98; 141.81	5	3	134
15	31.03.2024	23:37:28	47.31; 142.47	19	3	42
16	03.04.2024	17:37:26	46.62; 144.77	391	3.8	423
17	05.04.2024	09:22:47	45.63; 143.29	329	3	366
18	30.04.2024	16:32:55	45.79; 143.41	332	3.8	363
19	12.06.2024	12:17:13	46.82; 145.21	398	3.1	441
20	15.06.2024	13:35:30	46.67; 142.34	7	4.1	49
21	18.07.2024	05:53:24	46.64; 144.72	390	3.8	421
22	18.07.2024	22:54:36	45.71; 143.36	330	4.5	364
23	21.07.2024	10:11:34	45.68; 143.56	318	3.6	357
24	05.08.2024	04:35:29	45.76; 143.21	309	3	341
25	10.08.2024	03:28:31	46.97; 144.65	428	6.1	453
26	25.08.2024	05:42:40	45.86; 143.65	318	3.4	350
27	09.10.2024	13:17:28	46.25; 144.68	362	3.2	401
28	12.10.2024	03:32:41	45.67; 143.40	317	3.1	355
29	03.11.2024	04:35:02	46.63; 144.75	412	3.9	442
30	16.11.2024	18:03:36	46.06; 143.51	347	4.3	368

Примечание. Выделены сведения о ближайших к измерительному пункту событиях.

Note. The events closest to the ETF station are highlighted.



**Рис. 6.** Карта эпицентров землетрясений, произошедших на юге Сахалина с 01.01.2024 по 30.11.2024 (*M*≥3). Линиями обозначены разломные структуры по данным [28].

Fig. 6. Map of earthquake epicenters that occurred on the south Sakhalin Island from 01.01.2024 to 30.11.2024 ( $M \ge 3$ ). The lines indicate fault structures according to data from [28].

а 9 глубокофокусные; на второй – два события, одно из которых коровое; третье аномальное изменение сопровождается четырьмя глубокофокусными землетрясениями; четвертое – двумя глубокофокусными. Остальные 6 событий (табл. 2, № 1, 18, 25, 26, 29, 30) не отмечены аномалиями. Из них одно коровое, остальные глубокофокусные. Данные о количестве и типе сейсмических событий в аномальные периоды приведены в табл. 3.

Приведенные данные дают основание предположить, что аномальные изменения вертикальной компоненты ЭТП коррелируют с общей активизацией сейсмичности в юж-

ной части Сахалина, поскольку в аномальные периоды, составляющие 55 % времени измерений (184 дня из 334), попадают 80 % землетрясений. В пользу этого предположения может также говорить соответствие длительности периодов аномалий и количества событий: в период наиболее значительной по продолжительности и отклонению от фона аномалии (А1, 102 сут, т.е. около 30 % от времени наблюдений) произошло в сумме 16 землетрясений. Стоит также отметить, что на аномалию А1 приходится 7 из 9 всех коровых землетрясений, которые произошли за период измерений. На аномальный период А2 длительностью 17 сут

приходится 2 события, а период АЗ (22 дня) включает в себя 4 события. А вот аномальный период А4 не укладывается в данную закономерность, включая в себя 2 события при длительности в 43 дня, т.е. отличается низкой сейсмической активностью при значительной длительности. Возможно, аномалия А4 обусловлена внешними факторами, такими как техногенные или ионосферные шумы, не связанные с сейсмической активностью. Для уточнения природы подобных аномалий необходимы дополнительные исследования.

Рассмотрим возможные связи аномалий ЭТП с ближайшими к пункту измерения



Рис. 7. Изменения напряженности поля  $E_z$  на каналах CH1, CH2, CH7 и CH8 в период с 01.01.2024 по 30.11.2024 и произошедшие в этот период землетрясения (отмечены красными точками).



сейсмическими событиями. На рис. 8 представлены изменения напряженности поля  $E_z$  в аномальные периоды и происходившие в это время землетрясения. Фоновый уровень  $E_z$  в отсутствие аномалий не превышает 20 мВ/м (ср. с замечанием о контактных потенциалах в разделе «Методика измерений и аппаратурное обеспечение»).

На рис. 8 а обратим внимание на землетрясение № 15 (M = 3), гипоцентр которого находится в 42 км от измерительного пункта (самое близкое событие за весь период измерений). Оно произошло в конце аномального периода. К моменту окончания периода А2 (рис. 8 b) происходит землетрясение № 20 с M = 4.1 (48 км от измерительного пункта). Во время периода А3 (рис. 8 с) близких землетрясений не было. Тем не менее через 69 ч после А3 произошло глубокофокусное землетрясение с M = 6.1 (№ 25). Его гипоцентр находился в 453 км от измерительного пункта. В последний аномальный период (рис. 8 d) отсутствует какое-либо значительное землетрясение, которое можно «привязать» к окончанию аномального изменения вертикальной компоненты ЭТП.

Таблица 3. Количество землетрясений, произошедших во время аномалий ЭТП и в обычные периоды (БА) Table 3. Number of earthquakes that occurred during ETF anomalies and in normal periods

N⁰	Длительность	Землетрясения		
	периодов, сут.	коровые	глубоко- фокусные	
A1	102	7	9	
A2	17	1	1	
A3	22	_	4	
A4	43	_	2	
БА	150	1	5	



**Рис. 8.** Изменения напряженности электрического поля по каналам CH1, CH2, CH7 и CH8 в периоды, покрывающие аномальные интервалы A1 (a), A2 (b), A3 (c), A4 (d) (см. табл. 3). Произошедшие в этот период землетрясения показаны красными точками. Номера землетрясений соответствуют номерам в табл. 2. Интервалы с аномалиями ограничены вертикальными линиями.

**Fig. 8.** Variations in electric strength on channels CH1, CH2, CH7, and CH8 during periods covering anomalous intervals A1 (a), A2 (b), A3 (c), and A4 (d) (Table 3). Earthquakes that occurred during these periods are marked by red dots, with numbers corresponding Table 2. The periods with anomalies are delimited by vertical lines.

# Обсуждение результатов

### Факторы, влияющие на вариации ЭТП

Аномальные периоды оказались весьма продолжительными, что практически сразу же позволяет отвергнуть в качестве причины элементы хозяйственной деятельности человека. Детальный анализ возможных сигналов техногенной природы вблизи измерительного пункта уже рассматривался в [24]. Вблизи станции отсутствуют потенциальные источники, способные вызывать длительные многосуточные аномалии ЭТП в частотном диапазоне 0–10 Гц.

Одним из естественных факторов, которые могут повлиять на вариации ЭТП, являются геомагнитные бури. Изменения геомагнитного поля могут вызывать повышение плотности электротеллурических токов [29] и искажение сигналов [30].

Если сравнить графики изменения Кр-индекса, характеризующего глобальную геомагнитную активность в рассматриваемое время (см. сайт интернет-проекта «Лаборатория солнечной астрономии» Института космических исследований РАН и Института солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН https://xras.ru/magnetic storms.html), и графики изменения вертикальной компоненты ЭТП (рис. 7), то можно заметить, что, например, в период с января по февраль 2024 г. магнитные бури отсутствуют, в то время как в январе начинается аномалия А1. Достаточно большая геомагнитная активность наблюдается с середины апреля по конец мая (например, 11 мая – магнитная буря с индексом G5), но в этот период каналы ЭТП находятся вблизи нулевой отметки и не показывают каких-либо изменений, похожих на аномалии в А1-А4.

Влияние метеорологических параметров – скорости ветра, атмосферного давления, абсолютной влажности и температуры воздуха – на изменения ЭТП следует рассмотреть подробнее. На рис. 9 показаны изменения этих параметров с 01.01.2024 по 30.11.2024 г. в Южно-Сахалинске. Использованы данные ближайшей метеостанции (https://rp5.ru), которая расположена в 16 км от станции ЭТП. Измерения на ней проводятся с периодом в 1 ч.

Для каждого метеопараметра и канала ЭТП был рассчитан коэффициент корреляции Спирмена. Для этого данные ЭТП были децимированы до 1 ч. Кроме того, ряды метеорологических данных и напряженности ЭТП были отфильтрованы скользящим средним с двухсуточным окном. Результаты расчетов приведены в табл. 4.



**Рис. 9.** Изменения во времени метеорологических параметров с 01.01.2024 по 30.11.2024 по данным гидрометеостанции Южно-Сахалинска. Вверху – скорость ветра на высоте 10–12 м и относительная влажность воздуха. Внизу – температура воздуха на высоте 2 м над поверхностью земли и атмосферное давление. Все данные отфильтрованы скользящим средним с окном в 7 сут.

**Fig. 9.** Variations in time in meteorological parameters from 01.01.2024 to 30.11.2024, based on data from the Yuzhno-Sakhalinsk hydrometeorological station. Top: wind speed at 10-12 m height and relative air humidity. Bottom: air temperature at 2 m above ground level and atmospheric pressure. All data are filtered by a moving average with a seven-day window

Для всех каналов ЭТП значение коэффициента корреляции между напряженностью поля  $E_7$  и давлением, влажностью, скоростью ветра весьма невелико (не более 0.24), что указывает на отсутствие взаимосвязи в изменениях этих параметров. Для корреляций между изменениями ЭТП и температурой воздуха картина сложнее. Наибольший коэффициент корреляции с температурой получился для канала СН1 (k = -0.66), что говорит о заметной (по шкале Чеддока) отрицательной корреляции. Для канала CH2 абсолютное значение коэффициента корреляции наименьшее. Для каналов СН7 и СН8 получена заметная положительная корреляция, но абсолютное значение коэффициента корреляции меньше, чем для канала CH1.

Наличие противофазных изменений (отрицательной корреляции) между напряженностью ЭТП и температурой проявляется при более детальном анализе временных рядов на суточных и недельных интервалах. На рис. 10 представлены изменения  $E_{z}$  по каналу CH1 и температуры за три периода: с 20 мая по 20 августа (рис. 10 a), с 18 по 28 августа (рис. 10 b), с 12 по 20 июля (рис. 10 c) 2024 г. На графиках за два последних периода (рис. 10 b, c) можно заметить уменьшение уровня  $E_{z}$  на канале СН1 при повышении температуры и, наоборот, увеличение при ее снижении, хотя амплитуды изменений в десятки раз меньше, чем размах аномалий. Эти изменения и дают отрицательную корреляцию.

Третий интервал детального анализа (рис. 10 а) включает в себя два аномальных периода: А2 и А3. Можно видеть, что суточные и недельные перепады температур происходят как в периоды аномалий ЭТП, так и в их отсутствие. Тем самым подтверждается, что резкие изменения на каналах ЭТП не связаны с изменениями метеорологических параметров.

Обсудим механизм взаимосвязи изменений температуры и вертикального поля Е<sub>2</sub>. Слабые вариации вертикальной составляющей ЭТП при изменениях температуры воздуха, наиболее вероятно, определяются изменениями уровня подпочвенного радона под воздействием температур. Это было обосновано в работе [31], где анализировалась связь метеорологических факторов, уровня концентрации подпочвенного Rn и изменений вертикальной составляющей напряженности электрического поля в атмосфере (измерения проводились в обсерватории Паратунка ИКИР ДВО РАН, п-ов Камчатка). При повышении температуры концентрация подпочвенного радона увеличивается (и наоборот), что, в свою очередь, приводит к изменению  $E_7$  в атмосфере. По всей видимости, эту закономерность можно распространить и на изменения  $E_{z}$  в грунте около дневной поверхности. В другой работе [32] изучались возмущения вертикальной составляющей напряженности Е<sub>7</sub> на площадке обсерватории Михнево ИДГ РАН (Московская обл.) при прохождении мощных атмосферных фронтов. Показано, что в величине Е<sub>7</sub> наблюдаются изменения как за несколько часов, так и непосредственно во время прохождения атмосферного фронта (в том числе с грозовой активностью). Периоды этих изменений лежат в часовых и суточных диапазонах.

# Сравнение изменений вертикальной и горизонтальных компонент ЭТП

Как отмечалось выше, система регистрации вертикальной компоненты ЭТП, предпо-

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между метеорологическими параметрами и вариациями вертикальной компоненты ЭПП

Канал ЭТП	Температура, °С	Давление, мм рт. ст.	Влажность, %	Скорость ветра, м/с
CH1	-0.66	0.23	-0.19	0.05
CH2	-0.22	0.22	0.019	-0.078
CH7	0.49	-0.074	0.21	-0.1
CH8	0.58	-0.071	0.24	-0.12

Table 4. Correlation coefficients between meteorological parameters and variations in vertical ETF

ложительно, является более помехоустойчивой по сравнению с измерениями горизонтальных компонент. Для проверки этой гипотезы рассмотрим изменения горизонтальных компонент ЭТП с 01.01.2024 по 30.11.2024. На рис. 11 представлены вариации ЭТП на каналах N, NW, W (левая ось ординат). Для сравнения на графике также приведены данные канала CH2 вертикальной компоненты ЭТП (рис 11, правая ось ординат). Для выделения низкочастотной составляющей записи всех трех горизонтальных каналов были обработаны фильтром низких частот (библиотека «Kiss FFT») с частотой среза 1 Гц. Далее данные были децимированы до 1 с и отфильтрованы скользящим средним с двухсуточным окном. На рис. 11 видно, что на каналах N и W зарегистрированы синхронные, но противофазные вариации, а изменения ЭТП на канале NW не коррелируют с записями по другим каналам. Обработка записей горизонтальных компонент ЭТП проводилась с использованием идентичного анализа, включающего сопоставление вариаций с землетрясениями ( $M \ge 3$ ) в период 01.01.2024 - 30.11.2024 (табл. 2). Однако в данных горизонтальных каналов аномалии, подобные А1–А4, не выявлены.

Сравнивая временные записи изменений вертикальной и горизонтальных компонент ЭТП, можно заключить, что аномалии  $E_z$  имеют место вне зависимости от размаха вариаций горизонтальных компонент ЭТП. Результат о приуроченности периодов с аномалиями  $E_z$  к изменениям режима



Рис. 10. Изменения напряженности поля  $E_z$  на канале CH1 и температуры воздуха. Fig. 10. Variations in electric strength  $E_z$  on the CH1 channel and in air temperature.



Phc. 11. Вариации горизонтальных компонент ЭТП (левая ось) и вертикальной компоненты на канале CH2 (правая ось) с 01.01.2024 по 30.11.2024.
Fig. 11. Variations of the horizontal components of the ETF (left axis) and variations of the vertical component on the CH2 channel (right axis) from 01.01.2024 to 30.11.2024.

сейсмичности согласуется с работой [22], где были обобщены результаты регистрации вертикальной компоненты ЭТП по методике Д.А. Кузнецова. Также стоит отметить определенное соответствие полученных результатов выводам работ [19–21] о вариациях  $E_z$  в приземном слое атмосферы перед сильными землетрясениями.

# Статистическая оценка взаимосвязи аномалий вертикальной компоненты ЭТП с вариациями локальной сейсмичности

Для оценки того, не является ли случайным совпадение по времени периодов аномалий вертикальной компоненты ЭТП и повышенного числа сейсмических событий, воспользуемся точным критерием Фишера [33]. В качестве нулевой гипотезы примем, что выпадение 24 из 30 землетрясений на аномальные периоды является случайным. В качестве критического уровня значимости установим величину P-value (расчетный параметр теста Фишера) равной 0.05 (5 %). Параметры сопряженности для вычисления точного критерия Фишера следующие: на 184 дня аномальных периодов приходится 24 землетрясения, на 150 дней периодов отсутствия аномалий – 6 землетрясений.

Для расчетов использовались интернеткалькуляторы, при этом вычислялся двусторонний точный критерий Фишера (https://www.socscistatistics.com/ tests/). Вычисленное P-value для вероятности реализации нулевой гипотезы составляет 0.0112, что ниже критического уровня значимости 0.05, соответствующего 95%-му уровню доверия. Поэтому нулевую гипотезу следует отвергнуть и принять альтернативную гипотезу - наличие статистически значимой связи между аномалиями вертикальной компоненты ЭТП и сейсмичностью на юге Сахалина за период с 01.01.2024 по 30.11.2024.

## Заключение

Проведены непрерывные измерения вертикальной составляющей электротеллурического поля на полигоне Института морской геологии и геофизики ДВО РАН в период с 01.01.2024 по 30.11.2024. В качестве первичных преобразователей использовались две системы плоских электродов, погруженных на глубину 2 м. Регистрация данных проводилась с помощью аналого-цифрового преобразователя, а сами измерения интегрированы с ранее развернутой системой измерения горизонтальных компонент ЭТП.

Данные эксперимента по малоглубинному электрозондированию среды показали хорошее соответствие измеренной напряженности вертикального электрического поля с расчетными значениями. Тем самым проверена методика измерений напряженности  $E_z$  и доказана чувствительность измерительной системы к вариациям вертикальной компоненты ЭТП.

В 2024 г. на всех 4 каналах были зарегистрированы аномалии вертикальной компоненты  $E_z$  в виде резких всплесков амплитуды, максимальной в 35 раз, минимальной в 5 раз превышающей фоновый уровень. Самая продолжительная аномалия длилась 102 сут, самая короткая – 17. При сопоставлении с сейсмической активностью (землетрясения с  $M \ge 3$  из каталога юга Сахалина) установлено, что 24 из 30 событий совпали с периодами аномалий  $E_7$ .

Анализ с использованием точного критерия Фишера подтвердил статистически значимую связь аномалий  $E_z$  с сейсмической активностью юга Сахалина (P-value = 0.0112). Сравнение аномалий  $E_z$  с временем прохождения магнитных бурь и динамикой метеорологических параметров (давление, влажность, скорость ветра) не выявило значимых корреляций, тогда как корреляция с температурой (коэффициент Спирмена до –0.66) связана с суточными и недельными вариациями, не влияющими на многосуточные аномалии. Влияние техногенных факторов отвергнуто по параметрам рассматриваемых сигналов. Это подтверждает эндогенную природу аномалий.

Дальнейшие исследования вариаций ЭТП должны быть направлены на установление зкономерностей появления аномалий вертикальной компоненты ЭТП при вариациях сейсмичности и изучение возможности использовать их в качестве предвестника сильного землетрясения.

# Список литературы

- Адушкин В.В., Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Соловьев С.П. 2006. Динамические процессы в системе взаимодействующих геосфер на границе земная кора – атмосфера. Физика Земли, 7: 34–51. EDN: LJNPZV
- 2. Спивак А.А. **2009.** Актуальные проблемы взаимодействия геосфер на приповерхностных участках континентальной земной коры. В кн.: *Проблемы взаимодействующих геосфер.* М.: ГЕОС, с. 211–221.
- 3. Адушкин В.В., Спивак А.А. **2014.** *Физические поля в приповерхностной геофизике*. М.: ГЕОС, 360 с.
- Зубков С.И. 2002. Предвестники землетрясений. М.: ОИФЗ РАН, 140 с.
- 5. Довбня Б.В. **2014.** Электромагнитные предвестники землетрясений и их повторяемость. *Геофизический* журнал, 36(3): 160–165.
- Johnston M.J.S. 2002. 38 Electromagnetic fields generated by earthquakes. *International Geophysics*, 81(Pt A): 621–635. https://doi.org/10.1016/s0074-6142(02)80241-8
- Довбня Б.В., Пашинин А.Ю., Рахматулин Р.А. 2019. Краткосрочные электромагнитные предвестники землетрясений. *Геодинамика и тектонофизика*, 10(3): 731–740. https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0438

- Луковенкова О.О., Малкин Е.И., Мищенко М.А., Солодчук А.А. 2021. Аномалии перед камчатскими землетрясениями (ML ≥ 4.75) в сигналах электромагнитного излучения и геоакустической эмиссии в 2013 году. Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки, 34(1): 137–149. doi:10.26117/2079-6641-2021-34-1-137-149
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. 2009. Исследование динамики геоэлектрической среды по данным электротеллурического поля. Вулканология и сейсмология, 1: 39–48. EDN: LLVIOJ
- Гаврилов В.А., Полтавцева Е.В., Титков Н.Н., Пантелеев И.А., Бусс Ю.Ю. 2023. Мониторинг изменений напряженно-деформированного состояния геосреды в районе Петропавловского геодинамического полигона по данным комплексных скважинных и GPS-измерений на активной фазе подготовки Жупановского землетрясения (30.01.2016; Mw=7.2). Геодинамика и тектонофизика, 14(6), 0732. doi:10.5800/GT-2023-14-6-0732
- Li M., Lu J., Parrot M., Tan H., Chang Y., Zhang X., Wang Y. 2013. Review of unprecedented ULF electromagnetic anomalous emissions possibly related to the Wenchuan M<sub>s</sub> = 8.0 earthquake, on 12 May 2008. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 279–286. https://doi.org/10.5194/nhess-13-279-2013
- 12. Cataldi D., Cataldi G., Straser V. 2024. Electromagnetic signals that preceded the destructive earthquakes that occurred in Taiwan between April 2 and 3, **2024.** *New Concepts in Global Tectonics Journal*, 12(2): 132.
- Семинский К.Ж., Добрынина А.А., Борняков С.А., Саньков В.А., Поспеев А.В., Рассказов С.В., Перевалова Н.П., Семинский И.К., Лухнев А.В., Бобров А.А., Чебыкин Е.П., Едемский И.К., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Король С.А.
   2022. Комплексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты. *Геодинамика и тектонофизика*, 13(5), 0677. https://doi.org/10.5800/ GT-2022-13-5-0677
- 14. Непеина К.С., Матюков В.Е. 2021. Анализ вариаций геофизических параметров и сейсмических событий в пункте глубинного магнитотеллурического зондирования. Интерэкспо Гео-Сибирь, 2(2): 174–180. doi:10.33764/2618-981X-2021-2-2-174-180; EDN: IGUJHT
- 15. Vargas C.A., Gomez J.S., Gomez J.J., Solano J.M., Caneva A. 2023. Space-time variations of the apparent resistivity associated with seismic activity by using 1D-Magnetotelluric (MT) data in the central part of Colombia (South America). *Applied Sciences*, 13, 1737. https://doi.org/10.3390/app13031737
- 16. Piriyev R.H. **2021.** Effectiveness of electromagnetic monitoring in studying earthquakes. *Geophysical Jour-*

nal, 43(2): 166–177. doi:10.24028/gzh.v43i2.230195; EDN: QARSAE

- Fan Y., Hu W., Han B., Tang J., Wang X., Ye Q. 2023. Characteristic identification of seismogenic electromagnetic anomalies based on station electromagnetic impedance. *Frontiers of Earth Science*, 11, 1110056. doi:10.3389/feart.2023.1110056
- 18. Купцов А.В., Марапулец Ю.В., Мищенко М.А., Руленко О.П., Шевцов Б.М., Щербина А.О. 2007. О связи высокочастотной акустической эмиссии приповерхностных пород с электрическим полем в приземном слое атмосферы. Вулканология и сейсмология, 5: 71–76. EDN: LKSUEL
- Марапулец Ю.В., Руленко О.П., Мищенко М.А., Шевцов Б.М. 2010. Связь высокочастотной геоакустической эмиссии с электрическим полем в атмосфере при сейсмотектоническом процессе. Доклады *AH*, 431(2): 242–245. EDN: MXKCTN
- Марапулец Ю.В., Руленко О.П., Ларионов И.А., Мищенко М.А. 2011. Одновременный отклик высокочастотной геоакустической эмиссии и атмосферного электрического поля на деформирование приповерхностных осадочных пород. Доклады АН, 440(3): 403–406. EDN: PECMAV
- Дружин Г.И., Марапулец Ю.В., Чернева Н.В., Исаев А.Ю., Солодчук А.А. 2017. Акустические и электромагнитные излучения перед землетрясением на Камчатке. Доклады АН, 472(5): 584–589. EDN: BIRGXD
- 22. Бобровский В.С. **2016.** Распределенная сеть электрических измерений в приповерхностных грунтах и некоторые полученные результаты. Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 7-1: 129–138. EDN: WXFUGX
- 23. Руленко О.П., Марапулец Ю.В., Мищенко М.А. 2014. Анализ проявления связи между высокочастотной геоакустической эмиссией и электрическим полем в атмосфере у поверхности земли. Вулканология и сейсмология, 3: 53–64. doi:10.7868/ S0203030614030055; EDN: SFAJLB
- Закупин А.С., Дудченко И.П., Богомолов Л.М., Гуляков С.А., Казаков А.И., Стовбун Н.С. 2024. Кратковременные вариации электротеллурического поля вблизи очага землетрясения на о. Сахалин. Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки, 46(1): 134–164. https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-46-1-134-164; EDN: FIGWJO
- 25. Гуляков С.А., Стовбун Н.С., Костылева Н.В. и др. 2025. Оценка возможного воздействия экспериментального источника электроимпульсов на сейсмический и сейсмоакустический шум в зоне Центрально-Сахалинского разлома. Геодинамика и

*тектонофизика*, 16(2), 818. https://doi.org/10.5800/ GT-2025-16-2-0818; EDN: NBEXOF

- Parasnis D.S. 1986. Principles of applied geophysics. 4th ed. London: Chapman and Hall, 402 p. https://doi. org/10.1007/978-94-009-4113-7
- 27. Могилатов В.С., Злобинский А.В. **2014.** Свойства кругового электрического диполя как источника поля для электроразведки. *Геология и геофизика*, 55(11): 1692–1700. EDN: TAEZOR
- 28. Рождественский В.С., Сапрыгин С.М. **1999.** Активные разломы и сейсмичность на Южном Сахалине. *Тихоокеанская геология*, 6: 59–70.
- Новиков В.А., Сорокин В.М., Ященко А.К., Мушкарев Г.Ю. 2023. Физическая модель и численные оценки теллурических токов, генерируемых рентгеновским излучением солнечной вспышки. Динамические процессы в геосферах, 1(15): 23–44. https://doi.org/10. 26006/29490995\_2023\_15\_1\_23; EDN: MEMWRN
- Chen H., Mizunaga H., Tanaka T. 2022. Influence of geomagnetic storms on the quality of magnetotelluric impedance. *Earth Planets Space*, 74, 111. https://doi. org/10.1186/s40623-022-01659-6
- Чернева Н.В., Фирстов П.П. 2013. Влияние метеорологических факторов на электрические параметры нижней атмосферы. Метеорология и гидрология, 3: 56–65.
- Спивак А.А., Овчинников В.М., Рыбнов Ю.С. и др. 2022. Сейсмические, атмосферно-волновые, электрические и магнитные эффекты мощных атмосферных фронтов. *Физика Земли*, 4: 56–70. doi:10.31857/S0002333722040111; EDN: DKGUFT
- Nelson M. 2020. Contingency tables, Chi-Squared test, and Fisher's exact test. In: *Statistics in nutrition and dietetics*. Chapter 8. https://doi. org/10.1002/9781119541509.ch8

### References

- Adushkin V.V., Spivak A.A., Kishkina S.B., Loktev D.N., Solov'ev S.P. 2006. Dynamic processes in the system of interacting geospheres at the Earth's crustatmosphere boundary. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 42(7): 567–584. doi:10.1134/S1069351306070044
- 2. Spivak A.A. **2009.** [Topical problems of interaction between the geospheres at the subsurface segments of the continental crust]. In: *Problems of interacting geospheres*. Moscow: GEOS, p. 211–221. (In Russ.).
- Adushkin V.V., Spivak A.A. 2014. [Physical fields in near-surface geophysics]. Moscow: GEOS, 360 c. (In Russ.). EDN WHELXR
- 4. Zubkov S.I. **2002.** [*Earthquake precursors*]. Moscow: OIFZ RAN, 140 p. (In Russ.).

- 5. Dovbnya B.V. **2014.** [Electromagnetic precursors of earthquakes and their recurrence]. *Geophysical Journal*, 36(3): 160–165. (In Russ.).
- Johnston M.J.S. 2002. 38 Electromagnetic fields generated by earthquakes. *International Geophysics*, 81(Pt A): 621–635. https://doi.org/10.1016/s0074-6142(02)80241-8
- Dovbnya B.V., Pashinin A.Yu., Rakhmatulin R.A., 2019. Short-term electromagnetic precursors of earthquakes. *Geodynamics & Tectonophysics*, 10(3): 731–740. (In Russ.). https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0438
- Lukovenkova O.O., Malkin E.I., Mishchenko M.A., Solodchuk A.A. 2021. Anomalies in electromagnetic and geoacoustic emission signals before Kamchatka earthquakes (ML ≥ 4.75) in 2013. Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. Nauki, 34(1): 137–149. (In Russ.). https://doi. org/10.26117/2079-6641-2021-34-1-137-149
- Moroz Yu.F., Moroz T.A. 2009. A study in the dynamics of the geoelectrical medium from electrotelluric field data. *Journal of Volcanology and Seismology*, 3(1): 34–43. doi:10.1134/S0742046309010047
- Gavrilov V.A., Poltavtseva E.V., Titkov N.N., Panteleev I.A., Buss Yu.Yu. **2023.** Monitoring of changes in the stress-strain state of geoenvironment at the Petropavlovsk Geodynamic Testing Site based on the multi-instrumental borehole and GPS data during the active phase of preparing the Zhupanovsky earthquake (January 30, 2016, Mw 7.2). *Geodynamics & Tectonophysics*, 14(6), 0732. (In Russ.). doi:10.5800/GT-2023-14-6-0732
- Li M., Lu J., Parrot M., Tan H., Chang Y., Zhang X., Wang Y. 2013. Review of unprecedented ULF electromagnetic anomalous emissions possibly related to the Wenchuan M<sub>s</sub> = 8.0 earthquake, on 12 May 2008. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 279–286. https://doi.org/10.5194/nhess-13-279-2013
- 12. Cataldi D., Cataldi G., Straser V. **2024.** Electromagnetic signals that preceded the destructive earthquakes that occurred in Taiwan between April 2 and 3, 2024. *New Concepts in Global Tectonics Journal*, 12(2): 132.
- Seminsky K.Zh., Dobrynina A.A., Bornyakov S.A., Sankov V.A., Pospeev A.V., Rasskazov S.V., Perevalova N.P., Seminskiy I.K., Lukhnev A.V., Bobrov A.A., Chebykin E.P., Edemskiy I.K., Ilyasova A.M., Salko D.V., Sankov A.V., Korol S.A. 2022. Integrated monitoring of hazardous geological processes in Pribaikalye: pilot network and first results. *Geodynamics & Tectonophysics*, 13(5), 0677. (In Russ.). https://doi. org/10.5800/GT-2022-13-5-0677
- Nepeina K.S., Matiukov V.E. 2021. Analysis of geophysical parameters variations and seismic events at the point of deep magnetotelluric sounding. *Interexpo GEO-Siberia*, 2(2): 174–180. (In Russ.). doi:10.33764/2618-981X-2021-2-2-174-180

- 15. Vargas C.A., Gomez J.S., Gomez J.J., Solano J.M., Caneva A. 2023. Space-time variations of the apparent resistivity associated with seismic activity by using 1D-Magnetotelluric (MT) data in the central part of Colombia (South America). *Applied Sciences*, 13, 1737. https://doi.org/10.3390/app13031737
- Piriyev R.H. 2021. Effectiveness of electromagnetic monitoring in studying earthquakes. *Geophysical Journal*, 43(2): 166–177. doi:10.24028/gzh.v43i2.230195
- Fan Y., Hu W., Han B., Tang J., Wang X., Ye Q. 2023. Characteristic identification of seismogenic electromagnetic anomalies based on station electromagnetic impedance. *Frontiers of Earth Science*, 11, 1110056. doi:10.3389/feart.2023.1110056
- Kuptsov A.V., Marapulets Yu.V., Mishchenko M.A., Shevtsov B.M., Shcherbina A.O., Rulenko O.P. 2007. On the relation between high frequency acoustic emissions in near-surface rocks and the electric field in the near-ground atmosphere. *Journal of Volcanology and Seismology*, 1, 349–353. https://doi.org/10.1134/ S0742046307050077
- Marapulets Yu.V., Rulenko O.P., Mishchenko M.A., Shevtsov B.M. 2010. Relationship of high-frequency geoacoustic emission and electric field in the atmosphere in seismotectonic process. *Doklady Earth Sciences*, 431: 361–364. https://doi.org/10.1134/S1028334X10030207
- Marapulets Y.V., Rulenko O.P. Larionov I.A., Mishchenko M.A. 2011. Simultaneous response of highfrequency geoacoustic emission and atmospheric electric field to strain of near-surface sedimentary rocks. *Doklady Earth Sciences*, 440: 1349–1352. https://doi. org/10.1134/S1028334X11090285
- Druzhin G.I., Marapulets Yu.V., Cherneva N.V., Isaev A.A., Solodchuk A.A. 2017. Acoustic and electromagnetic emissions preceding the earthquake in Kamchatka. *Doklady Earth Sciences*, 472: 215–219. https://doi.org/10.1134/S1028334X17020118. –.
- 22. Bobrovsky V.S. **2016.** Distributed network of electrical measurements in the near-surface soils and some obtained results. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 7-1: 129–138.
- Rulenko O.P., Marapulets Yu.V., Mishchenko M.A.
   2014. An analysis of the relationships between high-frequency geoacoustic emissions and the electrical field in the atmosphere near the ground surface. *Journal of Volcanology and Seismology*, 8: 183–193. https://doi.org/10.1134/S0742046314030051
- Zakupin A.S., Dudchenko I.P., Bogomolov L.M. et al. 2024. Short temporal variations of electrotelluric field in the vicinity of the earthquake source-site in the Sakhalin Island. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*, 46(1): 134–164. (In Russ.). https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-46-1-134-164

- Gulyakov S.A., Stovbun N.S., Kostyleva N.V., Bogomolov L.M., Kostylev D.V., Dudchenko I.P., Kamenev P.A. 2025. An estimate of the possible impact of an experimental electric pulse source on seismic and seismoacoustic noise in the Central Sakhalin Fault Zone. *Geodynamics & Tectonophysics*, 16(2), 0818. (In Russ.). https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-2-0818
- Parasnis D.S. **1986.** *Principles of applied geophysics.* 4th ed. London: Chapman and Hall, 402 p. https://doi. org/10.1007/978-94-009-4113-7
- Mogilatov V.S., Zlobinsky A.V. 2014. A circular electric dipole: A transmitter for TEM surveys. *Russian Geology and Geophysics*, 55(11): 1340–1346. (In Russ.). https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.10.009
- 28. Rozhdestvensky V.S., Saprygin S.M. **1999.** Active faults and seismicity in the South Sakhalin. *Russian Journal of Pacific Geology*, 6: 59–70. (In Russ.).
- Novikov V.A., Sorokin V.M., Yashchenko A.K., Mushkarev G.Yu. 2023. Physical model and numerical estimates of telluric currents generated by X-ray radiation

#### Об авторах

Сотрудники Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия:

Стовбун Николай Сергеевич (https://orcid.org/0009-0004-1927-798Х), научный сотрудник лаборатории островных и прибрежных электроэнергетических систем, n1kolay19971997@yandex.ru

Закупин Александр Сергеевич (https://orcid.org/0000-0003-0593-6417), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмологии, a.zakupin@imgg.ru

Богомолов Леонид Михайлович (https://orcid.org/0000-0002-9124-9797), доктор физико-математических наук, директор, bleom@mail.ru

Дудченко Илья Павлович (https://orcid.org/0000-0002-4967-7405), кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории островных и прибрежных электроэнергетических систем, ilpadu@mail.ru

Гуляков Сергей Александрович (https://orcid.org/0009-0001-7924-6972), научный сотрудник лаборатории островных и прибрежных электроэнергетических систем,

gulyakov\_97@mail.ru

Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия:

Костылев Дмитрий Викторович (https://orcid.org/0000-0002-8150-9575), кандидат технических наук, директор, d.kostylev@imgg.ru

Поступила 12.02.2025 Принята к публикации 19.05.2025 of a solar flare. *Dynamic Processes in Geospheres*, 1(15): 23–44. (In Russ.). https://doi.org/10.26006/294 90995\_2023\_15\_1\_23

- Chen H., Mizunaga H., Tanaka T. 2022. Influence of geomagnetic storms on the quality of magnetotelluric impedance. *Earth Planets Space*, 74, 111. https://doi. org/10.1186/s40623-022-01659-6
- Cherneva N.V., Firstov P.P. 2013. Weather factor effects on electric parameters in the lower atmosphere. *Meteorology and Hydrology*, 38: 177–184. https://doi. org/10.3103/s1068373913030060
- Spivak A.A., Ovtchinnikov V.M., Rybnov Yu.S., Riabova S.A., Kharlamov V.A. 2022. Seismic, atmospheric-wave, electrical, and magnetic effects of powerful atmospheric. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 58(4): 493–506. doi:10.31857/S0002333722040111
- Nelson M. 2020. Contingency tables, Chi-Squared test, and Fisher's exact test. In: *Statistics in nutrition and dietetics*. Chapter 8. https://doi. org/10.1002/9781119541509.ch8

#### About the Authors

*Employees of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia:* 

**Stovbun, Nikolai S.** (https://orcid.org/0009-0004-1927-798X), Researcher, Laboratory of island and coastal electric power systems, n1kolay19971997@yandex.ru

Zakupin, Alexander S. (https://orcid.org/0000-0003-0593-6417), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Seismology laboratory, a.zakupin@imgg.ru

**Bogomolov, Leonid M.** (https://orcid.org/0000-0002-9124-9797), Doctor of Physics and Mathematics, Director, bleom@mail.ru

**Dudchenko, Ilya P.** (https://orcid.org/0000-0002-4967-7405), Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Laboratory of island and coastal electric power systems, ilpadu@mail.ru

Gulyakov, Sergey A. (https://orcid.org/0009-0001-7924-6972), Researcher, Laboratory of island and coastal electric power systems, gulyakov\_97@mail.ru

Sakhalin Branch of the Federal Research Center "Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences", Yuzhno-Sakhalinsk, Russia:

Kostylev, Dmitry V. (https://orcid.org/0000-0002-8150-9575), Cand. of Sci. (Engineering), Director, d.kostylev@imgg.ru

Received 12 February 2025 Accepted 19 May 2025 УДК 551.46.0

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



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

https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.2.145-163 https://www.elibrary.ru/vnnhjw

# Влияние широтного положения и ледового покрова на волновые и температурные процессы в морях Лаптевых и Охотском

Д. П. Ковалев<sup>®</sup>, П. Д. Ковалев, А. С. Борисов, В. С. Зарочинцев, К. В. Кириллов <sup>®</sup>E-mail: d.kovalev@imgg.ru Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. В работе представлен сравнительный анализ волнового и температурного режимов морей Лаптевых и Охотского (зал. Мордвинова) на основе длительных наблюдений за колебаниями уровня моря и температуры, с использованием автономных регистраторов APB-14 и RBR. В море Лаптевых прибор был установлен на широте 75.20° с.ш., близкой к критической широте 74.5°, что обусловило усиление полусуточной приливной гармоники M<sub>2</sub>. В Охотском море, напротив, преобладают суточные приливы, определяющие доминирующий характер колебаний уровня. Спектральный анализ низкочастотных температурных колебаний (30 мин – 24 ч) показал, что в ноябре спектры обоих морей имеют схожую форму, но различаются по амплитуде на два порядка, а в феврале становятся сопоставимыми по амплитуде из-за влияния ледового покрова. В море Лаптевых выявлен спектральный пик с периодом 12.4 ч, обусловленный действием критической широты, тогда как в Охотском море он отсутствует. Короткопериодные колебания уровня и температуры (12 с - 120 мин) в море Лаптевых практически не фиксируются при наличии сплошного льда, что позволяет установить периоды ледового покрытия. В Охотском море на периодах более 1 мин обнаружены пики с периодами 22.7 и 29.2 мин, интерпретируемые как проявления краевых волн, а значительные спектральные вариации в феврале связаны с образованием трещин и полыней. Затухание коротких волн (12 с - 3 мин в море Лаптевых и 12-20 с в Охотском море) зависит от толщины льда: в Охотском море оно возрастает в течение зимы, в то время как в море Лаптевых наблюдается как усиление, так и ослабление затухания. В период сплошного ледового покрова (январь-март) спектральные плотности температурных колебаний в диапазоне 12-50 с имеют характер широкополосных шумовых процессов, что затрудняет их количественное сравнение. Полученные различия и сходства в волновых и температурных характеристиках отражают влияние широтного положения, структуры приливов и ледового режима на формирование динамики морской среды, что важно для понимания процессов в арктических и субарктических морях.

**Ключевые слова:** море Лаптевых, море Охотское, критическая широта, ледовый покров, поверхностные и внутренние волны, приливные и краевые волны, колебания уровня и температуры воды, спектральный анализ

# Impact of latitudinal position and ice cover on wave and temperature dynamics in the Laptev Sea and the Sea of Okhotsk

Dmitry P. Kovalev<sup>@</sup>, Peter D. Kovalev, Aleksander S. Borisov, Vitaly S. Zarochintsev, Konstantin V. Kirillov

<sup>@</sup>E-mail: d.kovalev@imgg.ru Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

**Abstract.** This study presents a comparative analysis of wave and temperature conditions in the Laptev Sea and the Sea of Okhotsk (Mordvinov Bay), based on long-term observations of the sea level and temperature fluctuations, which were obtained using autonomous recorders ARV-14 and RBR. In the Laptev Sea, the gauge was placed at 75.20° N, near

the critical latitude of 74.5°, resulting in the amplification of the semidiurnal M, tidal harmonic. The Sea of Okhotsk, on the contrary, is dominated by diurnal tides, which determine primary sea level oscillations. Spectral analysis of lowfrequency temperature fluctuations (30 min to 24 h) revealed that in November, the spectra in both seas are similar in shape but differ by two orders of magnitude in amplitude, while in February, they become comparable in amplitude due to the influence of ice cover. A spectral peak at a 12.4-hour period, attributed to the critical latitude effect, was identified in the Laptev Sea but not in the Sea of Okhotsk. Short-period oscillations of sea level and temperature (12 s to 120 min) were largely absent in the Laptev Sea under solid ice conditions, enabling identification of the periods of solid ice coverage. In the Sea of Okhotsk, spectral peaks at periods of 22.7 and 29.2 min were observed, associated with the edge wave activity, while pronounced spectral variability in February was linked to the formation of cracks and polynyas. The attenuation of short waves (12 s to 3 min in the Laptev Sea and 12-20 s in the Sea of Okhotsk) was found to depend on ice thickness: in the Sea of Okhotsk, the attenuation increases throughout the winter, whereas in the Laptev Sea, it may either intensify or weaken. During the period of solid ice cover (January to March), spectral densities of temperature fluctuations in the 12–50 s range exhibited broadband noise characteristics, hindering their quantitative comparison. The identified differences and similarities in wave and temperature characteristics reflect the combined effects of latitude, tidal forcing, and ice conditions on the dynamics of the marine environment, which is crucial for understanding dynamics in Arctic and Subarctic seas.

**Keywords:** Laptev Sea, Sea of Okhotsk, critical latitude, ice cover, surface and internal waves, tidal and edge waves, sea level and temperature fluctuations, spectral analysis

Для цитирования: Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Борисов А.С., Зарочинцев В.С., Кириллов К.В. Влияние широтного положения и ледового покрова на волновые и температурные процессы в морях Лаптевых и Охотском. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 2, с. 145–163. https://doi.org/10.30730/ gtrz.2025.9.2.145-163; https://www.elibrary.ru/vnnhjw

#### Финансирование и благодарности

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

Авторы благодарят коллектив лаборатории цунами Института океанологии РАН им. П.П. Ширшова за возможность использовать данные прибора RBR по морю Лаптевых.

#### *For citation:* Kovalev D.P., Kovalev P.D., Borisov A.S., Zarochintsev V.S., Kirillov K.V. Impact of latitudinal position and ice cover on wave and temperature dynamics in the Laptev Sea and the Sea of Okhotsk. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 2, pp. 145–163. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.2.145-163; https://www.elibrary.ru/vnnhjw

#### **Funding and Acknowledgements**

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-2024-0002).

The authors are grateful to the Tsunami laboratory team of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences for the opportunity to use RBR data from the Laptev Sea.

# Введение

Арктические и субарктические морские регионы играют ключевую роль в глобальной океанической циркуляции и климатической системе. В последние десятилетия наблюдается значительное сокращение ледового покрова, что приводит к изменению динамических процессов, включая волновой и температурный режимы морей. Исследование этих процессов особенно важно для прогнозирования будущих климатических тенденций, моделирования волновых условий и оценки их влияния на различные сферы хозяйственной деятельности.

В последние годы возрастающее внимание уделяется инерционным колебаниям в услови-

ях ледового покрова, поскольку они играют важную роль в вертикальном перемешивании, энергетическом балансе и механике морского льда. Анализ спутниковых и буйковых данных показывает, что инерционные колебания морского льда усиливаются в условиях потепления, особенно в маргинальных зонах Арктики [1]. Пространственно-сезонные вариации кинетической энергии инерционных волн в высоких широтах, включая Антарктику, демонстрируют значительную зависимость от ледовых условий [2]. Даже при полном ледовом покрове инерционные волны могут распространяться и сохранять значительную энергию, оказывая влияние на подледную динамику и внутренние процессы в толще воды [3]. Эти результаты

подчеркивают актуальность исследования взаимодействия ледового покрова и инерционных колебаний на региональном уровне, в том числе в морях Лаптевых и Охотском.

Море Лаптевых представляет собой один из главных районов формирования и экспорта морского льда в Арктический бассейн. Гидродинамический режим этого моря определяется взаимодействием ветровых, приливных и внутренних волн, а также сложной морфологией дна. Важной особенностью является то, что в северо-восточной части моря проходит критическая широта (~74.5° с.ш.), вблизи которой инерционная частота совпадает с частотой приливных колебаний. Это приводит к усилению полусуточных приливных волн, связанных с главной лунной гармоникой М<sub>2</sub>, что оказывает влияние на возбуждение внутренних волн и процессы перемешивания водных масс [4]. Внутренние гравитационные волны, возникающие в этом регионе, играют важную роль в динамике океана, влияя на вертикальное распределение температуры, распространение акустических волн и процессы теплообмена между глубинными и поверхностными слоями.

Колебания уровня в море Лаптевых имеют сложную структуру, обусловленную сочетанием гидродинамических факторов и морфометрией бассейна. Исследования показывают, что баротропные приливы, амплитуда которых может превышать 50 см [5], способны возбуждать внутренние волны вблизи крутых континентальных склонов. Это, в свою очередь, приводит к усиленному турбулентному перемешиванию и может способствовать переносу тепла из глубинных слоев к поверхности, что особенно важно в условиях сезонного ледового покрова [6].

Охотское море, хотя и не относится к Арктическому бассейну, обладает рядом особенностей, сходных с морями высоких широт. В зимний период большая часть акватории покрывается льдом, который формируется под воздействием отрицательных температур и интенсивного охлаждения воздушных масс (https://bigenc.ru/c/okhotskoe-more-63c1a0). Оно отличается высокой приливной активностью, причем, в отличие от моря Лаптевых, здесь преобладают суточные приливы. Наличие сложного подводного рельефа и многочисленных островов способствует генерации краевых волн, играющих важную роль в перераспределении энергии и динамике уровня воды.

Сравнительный анализ волнения и температурных процессов в морях Лаптевых и Охотском позволяет выявить влияние различных факторов: критической широты, ледового покрова, приливных и внутренних волн – на формирование гидродинамических режимов. Полученные результаты способствуют уточнению моделей динамики морской среды, особенно в условиях сезонной изменчивости ледового покрова. Работа также имеет прикладное значение: ее выводы могут использоваться для обеспечения безопасности судоходства по Северному морскому пути, при проектировании морских инженерных сооружений и оценке рисков, связанных с разрушением льда в прибрежных районах.

Таким образом, цель настоящего исследования заключается в комплексном анализе волнового и температурного режимов в морях Лаптевых и Охотском, с учетом влияния широтного положения, ледового покрова, приливных и внутренних волн. Особое внимание уделяется спектральному анализу колебаний уровня и температуры воды, оценке распределения энергии волн в различных сезонных условиях, а также выявлению факторов, определяющих характер взаимодействия динамических процессов в ледовых и свободных ото льда акваториях.

Настоящее исследование базируется на уникальных длительных записях колебаний уровня и температуры воды с высокой временной дискретностью, полученных в двух регионах с различными волновым и ледовым режимами. Впервые выполнен сопоставительный спектральный анализ длинно- и короткопериодных колебаний уровня и температуры с учетом влияния критической широты, ледового покрова и структуры приливов. Полученные результаты позволили количественно охарактеризовать условия затухания волн подо льдом и выявить сезонную динамику высокочастотных температурных и волновых колебаний в арктических и субарктических морях.

# Наблюдения

6 октября 2018 г. в ходе экспедиции Института океанологии РАН (ИО РАН) на НИС «Академик Мстислав Келдыш» (рейс № 73, АМК-73) в море Лаптевых, в точке с координатами 75.20° с.ш. и 127.40° в.д., был установлен придонный измеритель волнения АРВ-К14 (заводской номер 94), который осуществлял запись волнения и температуры с секундной дискретностью. Он работал до 8 октября 2019 г.

12 октября 2019 г. в ходе экспедиции ИО РАН на том же научном судне (рейс № 78, АМК-78) в море Лаптевых, в точке с коорди-

натами 76.83° с.ш. и 127.69° в.д., был установлен измеритель волнения RBR virtuoso D (№ 200356), который осуществлял запись волнения с секундной дискретностью. Прибор работал до 9 октября 2020 г. Карта северных морей и карты морей с точками постановки приборов показаны на рис. 1 а.

Примерно в то же время, что и прибор RBR, в октябре 2019 г., для изучения особенностей распространения волн в Охотском море силами лаборатории волновой динамики и прибрежных течений Института морской геологии и геофизики ДВО РАН были установлены три автономных регистратора волнения APB-K14



Рис. 1. Районы исследований. (Верхняя панель) Карта-схема северных морей и карта моря Лаптевых (http://proznania.ru/) с точками постановки приборов APB-K14 и RBR. (Нижняя панель) Карта южной части о. Сахалин и места постановки APB-K14 в зал. Мордвинова в районе с. Охотское.

**Fig. 1.** Study areas. (Upper panel) Overview map of the northern seas and detailed map of the Laptev Sea region (http://proznania.ru/), showing placement sites of ARV-K14 and RBR gauges. (Lower panel) Map of the southern part of Sakhalin Island indicating ARV-K14 placement locations in Mordvinov Bay near the village of Okhotskoye.

(рис. 1 b). Один прибор (заводской номер 139) был установлен на удалении около 3.5 км в юговосточном направлении от пос. Охотское на глубине около 12 м; второй регистратор (№ 141) был установлен мористее первого на глубине около 21 м; третий (№ 142) – на глубине немногим более 12 м, т.е. примерно на той же изобате, что и № 139. Приборы стояли до июля 2020 г.

Придонное гидростатическое давление в эксперименте 2018–2020 гг. измерялось приборами APB-K14 и затем пересчитывалось в колебания уровня моря (волнение) с учетом затухания коротких волн с глубиной. Погрешность измерения давления составляет  $\pm 0.06$  %, или  $\pm 0.1$  % от верхнего предела измерения (ВПИ), а разрешающая способность  $\pm 0.0008$  % ВПИ. Диапазон измерения температуры был от  $-5^{\circ}$  до 45 °C. Основная абсолютная погрешность измерения температуры составляет  $\pm 0.15$  °C или  $\pm 0.5$  °C в зависимости от условий эксплуатации. Дискретность измерений уровня и температуры может предустанавливаться, но во всех использованных здесь данных равна 1 с. Мареограф RBR virtuoso D предназначен для мониторинга приливов, измерения и непрерывной автоматической регистрации колебаний уровня моря, а также для мониторинга волнения, включая определение высоты, периода и энергии волн. Погрешность измерения давления составляет  $\pm 0.05$  % от полной шкалы, а разрешение 0.001 % от полной шкалы. Интервал семплирования может устанавливаться в диапазоне от 24 ч до 0.5 с в непрерывном режиме или от 1 с до 62.5 мс в режиме приливов, в зависимости от поставленных задач.

В результате наблюдений в морях Лаптевых и Охотском были получены продолжительные записи волнения, приведенные на рис. 2. Временные серии колебаний уровня записаны приборами АРВ-К14 в 2019–2020 гг. в прибрежной зоне Охотского моря. Временные серии колебаний уровня в море Лаптевых получены прибором АРВ-К14 (№ 94) в 2018– 2019 гг. и RBR в 2019–2020 гг. На временных



Рис. 2. Временные серии колебаний уровня моря, записанные приборами APB-К14 № 94 и RBR в море Лаптевых и приборами APB-14 № 139, 141 и 142 в прибрежной зоне Охотского моря.

**Fig. 2.** Time series of sea level fluctuations recorded by ARV-K14 No. 94 and RBR gauges in the Laptev Sea and by ARV-14 No. 139, 141, and 142 gauges in the coastal zone of the Sea of Okhotsk.

сериях колебаний уровня моря по отсутствию ветрового волнения можно судить, что с начала ноября 2019 г. до третьей декады мая 2020 г. море Лаптевых было покрыто сплошным льдом, после чего во льду появилась трещина (полынья), которая то увеличивалась, то уменьшалась, затем появились большие полыньи, их размеры стали увеличиваться, и к концу июня большая часть моря очистилась от льда.

В записях временных серий колебаний уровня Охотского моря с середины января 2020 г. и до первой декады апреля 2020 г. отсутствует ветровое волнение и зыбь. Значит, в этот период времени море было покрыто льдом. Также видно, что колебания уровня для удаленных друг от друга точек наблюдения, расположенных в двух морях, имеют схожий характер.

За время регистрации в Охотском море были записаны несколько слабых и сильных штормов в ноябре и декабре 2019 г. с волнами высотой более 3 м. Отметим, что с данными, полученными в море Лаптевых, будем сравнивать в основном наблюдения на приборе № 141, установленном в Охотском море на глубине около 21 м.

Синхронно с измерениями колебаний уровня моря приборы АРВ-К14 выполняют измерения температуры. Прибором RBR такие измерения проведены не были. Поэтому температурные режимы в море Лаптевых в период 2018-2019 гг. и в Охотском море в 2019-2020 гг. сравнивали по показаниям приборов АРВ-К14 № 94 и АРВ-К14 № 141 соответственно (см. рис. 3). Несмотря на то что годы измерений разные, можно отметить интересную особенность: период наиболее низких температур (январь – март) в Охотском море хронологически совпадает с началом постепенного повышения температуры воды в море Лаптевых. Такое сезонное несоответствие связано с различиями в климатических и ледовых условиях двух морей. Отметим, что значения температуры на рис. 3 могут несколько



Рис. 3. Временные серии колебаний температуры в море Лаптевых (APB-K14 № 94) и в Охотском море (APB-K14 № 141). В море Лаптевых измерения начались в ноябре 2018 г., в Охотском – в ноябре 2019 г. Fig. 3. Time series of temperature fluctuations in the Laptev Sea (ARV-K14 No. 94) and the Sea of Okhotsk (ARV-K14 No. 141). Measurements in the Laptev Sea began in November 2018, while in the Sea of Okhotsk, in November 2019.

отличаться от реальных, поскольку тарировки и привязки к нулю в обоих случаях выполнено не было.

Как видно на рис. 3, в летние месяцы в Охотском море поверхностный слой воды прогревается и температура в районе установки приборов местами достигает 20 °C. Осенью начинается постепенное снижение температуры, которое ускоряется к середине января, достигая годового минимума. В апреле наблюдается ее рост, сопровождающийся резкими перепадами, что, согласно анализу временных рядов уровня и температуры, связано с приходом штормов, приводящих к перемешиванию верхнего и более холодного нижнего слоев.

Измерения температуры морской воды в море Лаптевых проводились только с октября 2018 до октября 2019 г. За это время, как видно на рис. 3, значительных изменений температуры не наблюдалось. Возможно, это связано с тем, что прибор располагался не в верхнем квазиоднородном слое, толщина которого для разных расстояний от берега, по оценкам работы [7], составляет 10–15 м.

# Результаты и обсуждение

# Длиннопериодные колебания уровня моря

Для анализа длиннопериодных колебаний уровня моря были рассчитаны спектральные плотности на основе временных рядов, записанных прибором 141 (рис. 4). В записях всех приборов выделяются мощные пики с периодами суточных и полусуточных приливных гармоник. Раздвоение пиков хорошо заметно на периодах 25.82, 23.95, 12.42 и 12.00 ч, причем их значения совпадают в обоих морях. Кроме того, наблюдаются пики с более короткими периодами и на три порядка меньшей энергией, что соответствует второстепенным приливным гармоникам. Согласно классификации главных гармоник приливного потенциала [8, 9], период



Рис. 4. Спектральная плотность колебаний уровня в море Лаптевых (приборы 94 и RBR) и в Охотском море (прибор 141). Штриховыми линиями показаны спектральные плотности, вычисленные по рядам с вычтенным предвычисленным приливом. Здесь и далее на рисунках нанесен 95%-й доверительный интервал. Fig. 4. Spectral density of sea level fluctuations in the Laptev Sea (ARV-K14 No. 94 and RBR gauges) and the Sea of Okhotsk (gauge No. 141). Dashed lines indicate spectral densities calculated from time series with the predicted tidal component removed. The 95% confidence interval is shown in this and subsequent figures.

25.82 ч соответствует главной лунной гармонике O<sub>1</sub>, а период 23.95 ч – лунно-солнечной деклинационной гармонике K<sub>1</sub>. Эти гармоники в Охотском море имеют почти в два раза большую энергию, чем в море Лаптевых.

Колебания уровня моря с периодом 12.4 ч соответствуют главной лунной полусуточной гармонике М<sub>2</sub>. Второй полусуточный максимум с периодом 12.0 ч обусловлен главной солнечной гармоникой S<sub>2</sub>, энергия которой почти на половину порядка меньше, чем у М<sub>2</sub>. Отметим, что энергия колебаний с этими периодами для моря Лаптевых на порядок больше, чем для суточных приливных гармоник, в то время как для Охотского моря энергия полусуточных волн несколько меньше суточных (рис. 4). Отсутствие пика с периодом около 8.33 ч (приливная гармоника  $O_1$ ) в спектре по данным RBR в море Лаптевых, в отличие от данных АРВ-К14 № 141 в Охотском море, может быть связано с низкой амплитудой этой компоненты в районе установки прибора, где преобладают полусуточные приливы, а также с сезонным влиянием ледового покрова, снижающим выраженность слабых гармоник. Дополнительно это может быть связано с характеристиками временного ряда и параметрами спектральной обработки.

Поскольку прибор 94 был установлен в море Лаптевых в точке с координатами 75.20° с.ш. и 127.40° в.д., то необходимо учитывать, что широта 74.5° является критической для приливной составляющей M<sub>2</sub> [10]. На этой широте инерционная частота равна частоте M<sub>2</sub>, что приводит к образованию приливного течения с выраженной глубинной зависимостью и формированию мощного придонного пограничного слоя. В море Лаптевых инерционная частота  $f = 2\Omega \sin\varphi$  (широта в град.). Для места постановки APB-K14 № 94, с широтой  $\varphi = 75.2^{\circ}$  и sin  $\varphi = 0.97$ , получаем f = 0.0811 цикл/ч, а период инерционных колебаний 12.33 ч. Этот период близок к периоду обнаруженной волны M<sub>2</sub> с периодом 12.4 ч, а широта, на которой проводили измерения, близка к критической. Возможно, поэтому гармоника M<sub>2</sub> слабо подавляется при удалении приливной составляющей из временного ряда данных прибора 94, и соотношение амплитуд суточных и полусуточных гармоник здесь существенно выше (см. рис. 4).

В спектрах уровня приборов 141 и RBR (рис. 4) хорошо выделяются пики на более коротких периодах – около 8.33, 6.13 и 4.1 ч. Колебания с периодом 8.33 ч, вероятно, обусловлены приливной гармоникой  $M_3$ , с периодом 6.13 ч – гармоникой  $M_4$ , а с периодом 4.1 ч – гармоникой  $M_6$ . Авторы работы [11] также отмечают присутствие гармоники  $M_4$  в данных с учетом влияния критической широты и делают вывод, что пик на частоте  $M_4$  указывает на нелинейные взаимодействия приливных волн. В спектре прибора 94 присутствуют пики на периодах 6.13 и 4.1 ч.

Рассмотрим низкочастотные колебания температуры морской воды в обоих исследуемых морях. Спектральные плотности колебаний температуры морской воды (рис. 5) рассчитаны для временных рядов температуры, приведенных на рис. 3.



Рис. 5. Спектральная плотность колебаний температуры морской воды в море Лаптевых (прибор 94) и в Охотском море (прибор 141).

**Fig. 5.** Spectral density of seawater temperature fluctuations in the Laptev Sea (gauge No. 94) and the Sea of Okhotsk (gauge No. 141).

В области периодов длиннее 24 ч видны совпадающие для обоих спектров пики на периодах около 49.55 ч (2.06 сут) и 119.3 ч (4.97 сут). На спектре для Охотского моря выделяется широкий пик с периодом 288.9 ч (12.04 сут). Такие длинноволновые колебания температуры могут быть следствием влияния среднемасштабных атмосферных возмущений. Например, 12-суточные колебания возникают в поле пассатной циркуляции – меридиональный термический контраст [12].

На периодах короче 24 ч в спектре для моря Лаптевых отмечен значимый пик на периоде 12.4 ч, близком к периоду приливной гармоники М<sub>2</sub>. Колебания температуры с этим периодом в Охотском море не наблюдались. Для моря Лаптевых выделяется небольшой пик на периоде приливной гармоники S<sub>2</sub>, но его величина несколько меньше доверительного интервала. В спектре Охотского моря (рис. 5) зафиксированы пики с периодами 2.3-5.1 ч. В спектре моря Лаптевых значимые пики на периодах короче 5 ч также присутствуют, но их энергия существенно ниже. В статье [13] отмечено, что в районах пересечения критической широты с участками континентального склона, характеризующимися сложной топографией, создаются благоприятные условия для генерации внутренних волн с периодом M<sub>2</sub>. Согласно исследованиям [14, 15, 16, 17], топографические характеристики дна способствуют генерации высокочастотных внутренних волн приливными течениями, возникающими на мелководных участках в теплое время года. Подобные процессы известны и в других морях с аналогичной батиметрией. Учитывая большое количество островов в обоих исследуемых нами морях, можно сказать, что наблюдаемые колебания могут представлять собой короткие внутренние волны.

# Колебания температуры морской воды в диапазоне 30 мин – 24 ч

Проанализированы колебания температуры морской воды с периодами 30 мин – 24 ч на основе 30-суточных временных серий. Анализ колебаний с периодами менее 30 с затруднен из-за инерционности температурного датчика. На рис. 5 представлены усредненные за месяц спектры температурных колебаний с периодами от 2 до 24 ч, рассчитанные по всей суточной выборке. Это позволяет проследить сезонную динамику спектров в целом. Рис. 6 демонстрирует спектры температурных колебаний за три отдельных месяца (ноябрь, февраль, июнь), с фокусом на более короткие периоды, от 30 с до 24 ч, что дает возможность выделить различия в спектральной плотности в условиях разного ледового режима.

По рассчитанным кривым спектральных плотностей (рис. 6) видно, что для ноября



**Рис. 6.** Спектральные плотности колебаний температуры морской воды для 30-суточных временных серий: ноябрь (толстая линия), февраль (тонкая линия) и июнь (штриховая). Синие кривые для прибора 141 (2019–2020 гг.), бордовые – для прибора 94 (2018–2019 гг.). Указаны наклоны спектральных кривых.

Fig. 6. Spectral densities of seawater temperature fluctuations based on 30 daily time series: November (bold lines), February (thin lines), and June (fine dashed lines). Blue curves correspond to gauge No. 141 (2019–2020), and maroon curves to gauge No. 94 (2018–2019). Spectral slopes are indicated.

спектры для Охотского моря и моря Лаптевых имеют близкий закон спадания, но различаются на два порядка по уровню. Спектральные кривые для февраля близки для обоих морей и почти совпадают с наклоном спадания для спектральной кривой моря Лаптевых в ноябре. Отметим, что в феврале Охотское море в районе наблюдений покрыто льдом, поэтому можно заключить, что для данного случая спектры для обоих морей схожи. В июне Охотское море уже свободно от льда, в то время как море Лаптевых еще покрыто льдом, и спектральные кривые для этого месяца существенно различаются.

На всех спектральных кривых (рис. 6) в диапазоне периодов менее 6 ч отчетливо выделяются пики, отражающие высокочастотные температурные колебания, связанные с волновыми процессами различной природы. Кроме того, по временной серии ноября для моря Лаптевых хорошо выделяется пик с периодом 12.4 ч, соответствующий приливной гармонике М<sub>2</sub>. Он достаточно широкий и, возможно, объединен с приливной гармоникой S<sub>2</sub>, однако разделить их здесь не представляется возможным из-за малой длины временной серии. Данное обстоятельство – наличие пика гармоники М. только в ноябре – побудило авторов рассчитать спектрограмму колебаний температуры в море Лаптевых за весь срок наблюдения. Результат приведен на рис. 7.

На рис. 7 b видно, что генерация низкочастотных внутренних волн, в том числе и с периодом 12.4 ч, происходит в то время, когда наблюдаются резкие изменения температуры морской воды (рис. 7 а). Один из таких эпизодов зафиксирован в конце октября – он предваряет ноябрьскую серию и включен в спектральный анализ. Такие изменения температуры могут быть связаны с прохождением атмосферных возмущений над районом наблюдений. Анализ синоптической карты (рис. 8) показал, что к началу суток 27 октября к морю Лаптевых подошел глубокий циклон с давлением менее 980 мбар, в то время как над морем уже находился другой, менее выраженный циклон. Вероятно, такая синоптическая конфигурация, как показано в работе [18], способствовала формированию сгона, достигшего максимума 28 октября, при котором уровень моря снизился примерно на 1.25 м, а температура воды увеличилась на 0.5 °С.

Отметим, что на кривых спектральных плотностей, рассчитанных по температурному ряду для Охотского моря, пик с периодом около 12.4 ч, соответствующий гармонике M<sub>2</sub>, не проявляется (рис. 6). Из этого можно заключить, что в море Лаптевых на волны с этим периодом оказывает влияние близость критической широты, что и вызывает увеличение амплитуды этой гармоники.



**Рис.** 7. Временной ход температуры морской воды, зарегистрированный прибором 94 в море Лаптевых (а) и его спектрограмма (b). Стрелкой отмечен период 12.4 ч

**Fig. 7.** Time series of seawater temperature recorded by gauge No. 94 in the Laptev Sea (a) and its spectrogram (b). The 12.4-hour period is marked by an arrow.

На рис. 6 заметны многочисленные пики на периодах менее 6 ч, превышающие доверительный интервал. Согласно [19, 20], коротковолновые процессы, включая внутренние волны, могут быть связаны с взаимодействием длинных гравитационных волн с островами, прибрежным рельефом и континентальным склоном. Это взаимодействие приводит к формированию вихрей [20], а также связано с процессами бароклинной неустойчивости [20]. Однако механизмы генерации внутренних волн с периодами в несколько часов пока недостаточно изучены, что затрудняет их однозначное объяснение на основе имеющихся данных.

Отметим еще одну особенность спектра колебаний температуры. В работе [21] приведены автоспектры смещений изотерм  $-0.8^{\circ}$  и  $1.6^{\circ}$ , положение которых изменялось во времени на средних глубинах 67 и 137 м соответственно. В диапазоне частот между инерционной частотой f (0.0825 цикл/ч) и локальной частотой плавучести N (что соответствует периодам температурных колебаний порядка 1-10 ч) наблюдается спад спектров с наклонами от -1.5 до -2.0. Такие наклоны спектра указывают на преобладание вертикальных смещений, связанных с внутренними волнами. Спектральная форма смещения изотерм при этом соответствует модели Гарретта–Манка, а также согласуется с рядом других наблюдений внутренних волн.

Универсальная изотропная модель внутреннего волнового спектра Гарретта и Манка [22, 23] была разработана для поля внутренних волн в океане средних широт, где оно устойчиво и однородно [21]. Спектр Гарретта–Манка не имеет подъема энергии на инерциальной частоте, как и в полученных нами спектрах, такой подъем наблюдается только в глубоком океане. Таким образом, можно предположить, что в полученных нами спектрах колебания температуры (рис. 6) в диапазоне периодов от 1 до 10 ч не содержится существенных пиков по причине общей низкой энергии колебаний.

Наклон спектров колебаний температуры, вычисленных по нашим наблюдениям (рис. 6), существенно зависит от наличия льда и отличается от полученного в работе [21]. Для Охотского моря в ноябре, когда оно еще не покрыто льдом, наклон спектра близок к степени –2.



Рис. 8. Синоптическая карта региона исследований за 27.10.2018, 12:00 UTC. Сайт Japan Meteorological Agency (https://www.jma.go.jp/jma/index.html). Изолинии – давление, мбар.

**Fig. 8.** Synoptic chart of the study region for 27 October 2018, 12:00 UTC. Source: Japan Meteorological Agency (https://www.jma.go.jp/jma/index.html). Isolines indicate atmospheric pressure, mbar.

Для этого же моря, покрытого льдом, наклон спектра близок к –4. Для моря Лаптевых, почти весь период ноябрь–май покрытого льдом, наклон спектра близок к –3, и только в июне он ближе к –2.

# Короткопериодные колебания уровня моря и температуры

Изучение короткопериодных колебаний уровня моря и температуры морской воды с периодами от нескольких секунд до нескольких десятков минут в морях, покрытых льдом, представляет определенные трудности, поскольку короткие гравитационные волны с периодами до 15 с быстро затухают после проникновения под лед и с глубиной. Ледяной покров препятствует также короткопериодным изменениям температуры, вызванным поступлением под лед солнечной энергии.

Авторы работ [19, 24] полагают, что поскольку в морях, покрытых льдом, и в море Лаптевых в частности, присутствуют приливные движения, то они являются основным возможным механизмом генерации мелкомасштабных внутренних волн. Приливная волна, достигающая континентального склона, при определенных условиях способствует генерации внутренних волн. Вертикальный сдвиг горизонтальной скорости течения во внутренних волнах и их неустойчивость приводят к возникновению мелкомасштабной турбулентности и усилению перемешивания водных масс в зоне континентального склона.

Первые результаты анализа временных серий колебаний уровня моря, проведенного в 2021 г., показали странное поведение спектров и спектрограмм для периодов короче 12 с, а именно, появление плоских спектральных полок. Анализ такого поведения, выполненный V.A. Squire с соавторами [18], показал, что на глубинах более 15 м поверхностные волны затухают до уровня шума используемых приборов. На основании анализа рассчитанных спектров для разных глубин был сделан вывод, что с использованием приборов APB-14 и PБР возможно наблюдение волн подо льдом на глубинах более 20 м с периодами длиннее 12 с.

С учетом этого обстоятельства нами по данным измерений были рассчитаны спектро-

граммы колебаний уровня моря для диапазона периодов 12 с - 120 мин в море Лаптевых и 5 с – 120 мин в Охотском море (рис. 9). Видно, что спектрограммы для моря Лаптевых, покрытого льдом, не отражают выраженных волновых процессов. Следовательно, по отсутствию короткопериодных колебаний уровня (12 с - 1 мин) можно судить, что море Лаптевых в это время было покрыто льдом. Хорошо видно, что с 1 ноября 2018 до 23 мая 2019 г. море Лаптевых было покрыто сплошным льдом, после чего во льду появилась трещина (полынья), а с 8 июня появление трещин стало регулярным [18]. Похожая ситуация наблюдалась и в зиму 2019/2020 гг. В отличие от спектрограмм колебаний уровня моря, спектрограмма колебаний температуры в рассматриваемом диапазоне периодов не содержит каких-либо особенностей и здесь не приводится.

Очевидно, что в южной части Охотского моря в районе проведения измерений море бывает покрыто льдом на более короткий срок, обычно с середины января до конца марта. Следует отметить, что в акватории зал. Мордвинова образуется припайный лед с шириной вдольбереговой полосы от единиц до нескольких десятков километров. Поскольку ширина ледяного поля здесь меньше, чем в море Лаптевых, то и видимое на рис. 9 затухание менее заметно и проявляется для волн с периодами короче 23 с. При сильных отжимных ветрах и сопутствующих отливных течениях припайный лед может разрушиться или целым ледяным полем быть унесен в сторону южных Курильских островов в феврале, и тогда сплошной лед здесь больше не образуется.

Как видно на рис. 9 и отмечено в работе [18], в море Лаптевых в период 2018–2019 гг. нижняя граница области с заметным уровнем энергии волновых колебаний (в диапазоне  $10^{-6} - 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/мин) постепенно смещалась в сторону более длинных периодов в течение зимнего сезона. Это свидетельствует о том, что волны с все более длительным периодом подвергались значительному затуханию подо льдом. Если в ноябре 2018 г. существенное ослабление наблюдалось для волн с периодами 12–16 с, то к моменту появления первой трещины во льду 23 мая 2019 г. этот диапазон
сместился до 29 с. Удлинение периодов, при которых происходило значительное ослабление, продолжилось до начала июля, достигнув 39 с [18]. Зимой 2019/2020 гг. характеристики затухания отличались от предыдущего года. С конца декабря по 20 апреля уровень ослабления короткопериодных волн оказался меньше, чем в ноябре 2018 г., то есть волны тех же периодов сохраняли бо́льшую энергию. С апреля затухание вновь усиливается, и его характеристики достигают значений, наблюдавшихся в конце зимнего периода 2019 г.

В зал. Мордвинова Охотского моря с 2009 по 2017 г. проводились наблюдения за распространением волн подо льдом. Одной из задач этих экспериментов было изучение затухания поверхностных гравитационных волн. В работе [25] приведены графики зависимости



Рис. 9. Спектрограммы колебаний уровня моря по данным наблюдений приборами APB-K14 (№ 94, 2018–2019 гг.), RBR (2019–2020 гг.) в море Лаптевых и APB-K14 (№ 141, 2019–2020 гг.) в Охотском море. Fig. 9. Spectrograms of sea level fluctuations based on observations from ARV-K14 (No. 94, 2018–2019) and RBR (2019–2020) gauges in the Laptev Sea and from ARV-K14 (No. 141, 2019–2020) in the Sea of Okhotsk.

спектральной плотности энергии волнения для различных периодов волн в январе–апреле 2013 г., представленные на рис. 10. На них также хорошо виден наклон кривых для периодов волн 20 и 50 с в течение зимнего периода, свидетельствующий об увеличении затухания этих волн со временем. Для периодов волн 6 и 10 с этот наклон хорошо выражен до начала марта, затем наблюдается некоторый подъем. Кривые для периодов от 100 с и более такого наклона не имеют.

В статье [25] установлено, что фазовая и групповая скорости для коротких волн, рассчитанные для момента появления и разрушения припая, существенно различаются. Анализ уравнения (1), приведенного в [26] и использованного для расчета групповой скорости волн, ответственной за перенос энергии, показал, что это различие обусловлено изменением толщины льда на разных этапах существования припая.

$$U = c - \lambda \frac{dc}{d\lambda} = \frac{c}{2} \left[ \frac{1 + 256\pi^3 B / \lambda^3 c^2}{1 + 4\pi M / \lambda} \right], \quad (1)$$

где

$$B = \frac{Eh^3}{12(1-s^2)\rho_w}, Q = \frac{Ph}{\rho_w}, M = \frac{\rho_i h}{\rho_w}.$$

Здесь U – групповая скорость; c – фазовая скорость волны;  $\lambda$  – длина волны; h – толщина льда; E – модуль упругости Юнга, для льда  $E = 6 \cdot 10^9 \text{ H} \cdot \text{м}^{-2}$ ; s – коэффициент Пуассона, для льда s = 0.3; P – сжимающее напряжение в пакете льда, которое для морского льда при чистом сжатии находится в диапазоне  $10^6 \text{ H} \cdot \text{м}^{-2}$  [27]. Плотность морского льда приблизительно равна  $\rho_i = 0.9 \rho_w$ , где  $\rho_w$  (плотность морской воды) составляет  $\approx 1025 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ .

Поскольку зависимость скорости волн от толщины льда нелинейная, то это, по-видимому, и определяет наклон кривых только для коротких периодов. Кроме того, учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод, что в районе постановки прибора АРВ-К14 в море Лаптевых толщина льда с ноября 2018 по июнь 2019 г. постоянно нарастала. В зиму 2019/2020 гг. наблюдалась другая картина. С января по апрель 2020 г. толщина льда была минимальной, а с апреля увеличивалась. Можно было предположить, что это связано с теплой погодой зимы 2020 г. Проверка с использованием температурных данных (рис. 11) показала, что зима 2019/2020 гг. действительно была теплее по сравнению с зимой 2018/2019. Это подтверждается более высокими значениями температуры



Рис. 10. Диаграммы спектральной плотности энергии волнения с периодами от 6 до 1024 с. (число степеней свободы 40). Зал. Мордвинова Охотского моря, январь–апрель 2013 г. [25]

Fig. 10. Diagrams of spectral wave energy density for wave periods from 6 to 1024 seconds (degrees of freedom: 40). Mordvinov Bay, Sea of Okhotsk, January–April 2013 [25].



**Рис. 11.** Температура воздуха в прол. Санникова (западная часть моря Лаптевых) в 2018–2019 гг. По данным сайта РП5 (https://rp5.ru/).

Fig. 11. Air temperature in the Sannikov Strait (western Laptev Sea) in 2018–2019. Based on data from the RP5 website (https://rp5.ru/).

воды в течение всего холодного периода. Соответственно, ледовый покров в этот сезон, вероятно, был менее прочным и более подвижным, что отразилось на спектрограммах колебаний уровня (рис. 9): в 2019/2020 гг. они характеризуются меньшей областью полного затухания волн и сохранением энергии в более широком диапазоне периодов. В Охотском море в 2020 г. толщина льда, пока море было покрыто льдом, нарастала, как и для ситуации в море Лаптевых в зимний период 2018/2019 гг., и это хорошо видно на рис. 9. Отметим, что это типичная для Охотского моря ситуация.

Сравним спектральные плотности колебаний уровня моря и температуры с периодами 12 с – 100 мин для 2018–2019 гг. в море Лаптевых и 2019–2020 гг. в Охотском море (рис. 12), поскольку режимы затухания волн в эти периоды времени совпадают.

На периодах больше 1 мин для колебаний уровня моря в Охотском море выделяются пики с периодами 22.7 и 29.2 мин (рис. 12).



Рис. 12. Спектральные плотности колебаний уровня моря (а) для разных периодов времени, вычисленные по 30-суточным временным сериям. Сплошные кривые относятся к Охотскому морю в 2019–2020 гг., пунктирные – к морю Лаптевых в 2018–2019 гг. Ноябрь – синий цвет, февраль – фиолетовый, март – зеленый, июнь –коричневый.

**Fig. 12.** Spectral densities of sea level fluctuations (a) for different time periods, calculated from 30 daily time series. Solid curves represent the Sea of Okhotsk (2019–2020); dashed curves represent the Laptev Sea (2018–2019). Colors indicate observation months: November, blue; February, purple; March, green; June, brown.

Эти пики видны и на спектрограмме уровня для Охотского моря (рис. 9). Судя по диапазону периодов, они обусловлены краевыми волнами. Значительные колебания спектральной кривой для Охотского моря в феврале связаны, по-видимому, с образованием трещин, что видно и на рис. 10.

На периодах короче 20 с на всех спектрах Охотского моря виден подъем, но его величина уменьшается, когда море покрывается льдом, при этом наблюдается резкое спадание кривых для периодов короче 17 с. Энергия колебаний уровня в диапазоне от 12 с до 2 мин для открытого моря примерно на порядок выше, чем для покрытого льдом.

В море Лаптевых спектральные кривые колебаний уровня моря достаточно близки, за исключением кривой для июня, когда море освобождается от льда. Эта спектральная кривая в области коротких периодов показывает подъем почти на порядок, от 1 мин и до 12 с, по сравнению с морем, покрытым льдом. Отметим, что энергия колебаний уровня на периодах от 2 до 20 мин для обоих морей одинакова. Исключение составляют колебания уровня в Охотском море в ноябре, когда в осенний период наблюдается большое число штормов.

Сделать какие-либо сравнения для колебаний температуры морской воды с января по март, когда оба моря покрыты сплошным льдом, не представляется возможным. Кривые спектральных плотностей в диапазоне периодов 12–50 с не содержат пиков, превышающих 95%-й доверительный интервал, не имеют выраженных пиков и соответствуют широкополосным шумовым процессам. Аналогичное поведение колебаний температуры отмечается и в работе [18].

#### Заключение

В 2018–2020 гг. проведены длительные наблюдения за колебаниями уровня моря и температуры морской воды в морях Лаптевых и Охотском с использованием автономных регистраторов APB-K14 и RBR. В море Лаптевых измерения охватывали двухлетний период в районе вблизи критической широты (75.20° с.ш.), а в Охотском море (зал. Мордви-

нова) прибор АРВ-К14 работал с октября 2019 по июль 2020 г. Дискретность всех временных серий составила 1 с.

Анализ приливных колебаний показал, что в море Лаптевых амплитуда полусуточной приливной гармоники M<sub>2</sub> более чем в три раза превышает амплитуды суточных приливов, что обусловлено близостью к критической широте. В Охотском море, напротив, преобладают суточные приливы.

Спектральные кривые низкочастотных колебаний температуры морской воды (30 мин – 24 ч) в ноябре для обоих морей демонстрируют схожий закон спадания, но различаются по амплитуде на два порядка. В феврале, когда зал. Мордвинова был покрыт льдом, спектры обоих морей были практически идентичными, что свидетельствует о влиянии ледового покрова на температурные процессы.

При исследовании спектральных плотностей температурных колебаний в море Лаптевых выявлен пик на периоде 12.4 ч, превышающий доверительный интервал, тогда как в Охотском море аналогичный пик отсутствует. Это связано с влиянием критической широты на температурные колебания в море Лаптевых.

Анализ короткопериодных (12 с – 120 мин) колебаний уровня моря и температуры воды показал, что в ледовых условиях в море Лаптевых волновые процессы практически отсутствуют. По отсутствию колебаний уровня с периодами 12 с – 1 мин можно определить периоды сплошного ледового покрова. В Охотском море на периодах более 1 мин выделены пики 22.7 и 29.2 мин, связанные с краевыми волнами. Значительные спектральные вариации в феврале, вероятно, обусловлены образованием трещин и полыней.

Обнаружено, что затухание коротких поверхностных волн (12 с – 1 мин в море Лаптевых и 12–20 с в Охотском море) при их распространении подо льдом зависит от его толщины. В Охотском море затухание волн нарастает в течение зимы, тогда как в море Лаптевых оно может как увеличиваться, так и снижаться.

В январе-марте, когда оба моря были покрыты сплошным льдом, спектральные плотности температурных колебаний в диапазоне 12-50 с не демонстрировали выраженных пиков, превышающих 95%-й доверительный интервал. Амплитуды этих колебаний были малы, а спектральные кривые соответствовали широкополосным шумовым процессам, что не позволяет выявить закономерности температурных колебаний в условиях полного ледового покрова.

Полученные результаты показывают, что особенности температурных и волновых режимов в рассматриваемых морях определяются сочетанием ледовых условий, приливных процессов и влиянием критической широты. Эти данные могут быть использованы для дальнейшего изучения механики внутренних волн в ледовых морях, совершенствования моделей прогноза гидродинамических процессов и обеспечения безопасности судоходства и освоения шельфов в условиях сезонной изменчивости ледяного покрова.

#### Список литературы

- Yuan Y., Lei R., Liu L., Cheng B., Heil P., Cheng X., Wang Y., Tian-Kunze X., Zhan Z., Zhang Y. 2023. Enhancing sea ice inertial oscillations in the Arctic Ocean between 1979 and 2019. *Water*, 15(1), 152. https://doi.org/10.3390/w15010152
- Zhang L., Li Y., Xie J., Lin Y., Guo Y., Fu L., Chen L., Wang J., Song X. 2023. Spatial and seasonal variations of near-inertial kinetic energy in the Ross Sea. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1173900. https://doi. org/10.3389/fmars.2023.1173900
- Shen X., Yu X., Zhang Y., Wang J., Wang D. 2023. Near-inertial wave propagation in the deep Canadian Basin. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128(5), e2023JC020228. https://doi.org/10.1029/2023JC020228
- 4. Коняев К.В., Сабинин К.Д. **1992.** Волны внутри океана. СПб.: Гидрометеоиздат, 272 с.
- 5. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. **1982.** *Моря СССР*. М.: Изд-во Московского ун-та, 272 с.
- Rippeth T.P., Lincoln B.J., Lenn Y.-D., Mattias Green J.A., Sundfjord A., Bacon S. 2015. Tide-mediated warming of Arctic halocline by Atlantic heat fluxes over rough topography. *Nature Geoscience*, 8: 191–194. doi:10.1038/ngeo2350
- Krumpen T., Hölemann J.A., Willmes S., Morales Maqueda M.A., Busche T., Dmitrenko I.A., Gerdes R., Haas C., Heinemann G., Hendricks S., Kassens H., Rabenstein L., Schröder D. 2011. Sea ice production and water mass modification in the eastern Laptev Sea. *Journal of Geophysical Research*, 116, C05014. doi:10.1029/2010JC006545

- 8. Некрасов А.В. **1990.** Энергия океанских приливов. Л.: Гидрометеоиздат, 288 с.
- Parker B.B. 2007. *Tidal analysis and prediction*. Maryland: Silver Spring, 378 p. doi:http://dx.doi. org/10.25607/OBP-191
- Furevik T., Foldvik A. **1996.** Stability at M2 critical latitude in the Barents Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C4): 8823–8838. https://doi. org/10.1029/96jc00081
- Kjersti L., Daae K.L., Fer I., Abrahamsen E.P. 2009. Mixing on the continental slope of the southern Weddell Sea. *Journal of Geophysical Research*, 114, C09018. doi:10.1029/2008JC005259
- 12. Лаппо С.С. **1979.** Среднемасштабные динамические процессы океана, возбуждаемые атмосферой. М.: Наука, 179 с.
- Daae K.L., Fer I., Abrahamsen E.P. 2009. Mixing on the continental slope of the southern Weddell Sea. *Journal* of *Geophysical Research: Oceans*, 114, C09018. doi:10.1029/2008JC005259
- Bai X., Liu Z., Li X., Chen Z., Hu J., Sun Z, Zhu J. 2013. Observations of high-frequency internal waves in the Southern Taiwan Strait. *Journal of Coastal Research*, 29(6): 1413–1419. https://doi.org/10.2112/ jcoastres-d-12-00141.1
- Colosi J.A., Beardsley R.C., Lynch J.F., Gawarkiewicz G., Chiu C.S., Scotti A. 2001. Observations of nonlinear internal waves on the outer New England continental shelf during the summer Shelf Break Primer study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C5): 9587–9601. https://doi.org/10.1029/2000jc900124
- Duda T.F., Lynch J.F., Irish J.D., Beardsley R.C., Ramp S.R., Chiu C.S., Tang T.Y., Yang Y.J. 2004. Internal tide and nonlinear internal wave behavior at the continental slope in the northern South China Sea. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29(4): 1105–1130. https://doi.org/10.1109/joe.2004.836998
- Lee C.-Y., Beardsley R.C. 1974. Generation of long nonlinear internal waves in a weakly stratified shearflow. *Journal of Geophysical Research*, 79(3): 453– 462. https://doi.org/10.1029/jc079i003p00453
- Squire V.A., Kovalev D.P., Kovalev P.D., Medvedev I.P., Kulikov M.E. 2021. A cornucopia of oscillations on the Laptev Sea shelf. *Continental Shelf Research*, 227(2021), 104514. https://doi.org/10.1016/j. csr.2021.104514
- Zakharchuk E.A. **1999.** Internal waves in the Laptev Sea. In: *Land-Ocean systems in the Siberian Arctic. Dynamics and history*. Berlin: Springer-Verlag, p. 43–51. https://doi.org/10.1007/978-3-642-60134-7\_5
- 20. Darelius E., Smedsrud L.H., Osterhus S., Foldvik A., Gammelsrod T. **2009.** Structure and variability of the Filchner overflow plume. *Tellus A:*

*Dynamic Meteorology and Oceanography*, 61(3): 446–464. https://doi.org/10.3402/tellusa.v61i3.15559

- Levine M.D., Paulson C.A., Morison J.H. 1985. Internal waves in the Arctic Ocean – Comparison with lower-latitude observations. *Journal of Physical Oceanography*, 15: 800–809. doi:10.1175/1520-0485(1985)015
- 22. Garrett C., Munk W. **1972.** Oceanic mixing by breaking internal waves. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 19(12): 823–832. https://doi. org/10.1016/0011-7471(72)90001-0
- Garrett C., Munk W. 1975. Space-time scales of internal waves: A progress report. *Journal of Geophysical Research*, 80: 291–297. https://doi.org/10.1029/ jc080i003p00291
- 24. Kowalik Z., Proshutinsky A.Y. **1994.** The Arctic Ocean tides. In: *The Polar Oceans and their role in shaping the global environment: Geophysical Monograph*, 85: 137–158.
- 25. Долгих Г.И., Ковалев П.Д., Ковалев Д.П., Кириллов К.В. **2018.** Особенности волнения под припаем в юго-западной части Охотского моря. Доклады Академии наук, 481(5): 98–102.
- Wadhams P. 1973. Attenuation of swell by sea ice. Journal of Geophysical Research, 78(18): 3552–3563. https://doi.org/10.1029/jc078i018p03552
- 27. Mellor M. **1983.** *Mechanical behavior of sea ice*. Cold Regions Research and Engineering Laboratory Monograph, 83(1). 105 p.

#### References

- Yuan Y., Lei R., Liu L., Cheng B., Heil P., Cheng X., Wang Y., Tian-Kunze X., Zhan Z., Zhang Y. 2023. Enhancing sea ice inertial oscillations in the Arctic Ocean between 1979 and 2019. *Water*, 15(1), 152. https://doi. org/10.3390/w15010152
- Zhang L., Li Y., Xie J., Lin Y., Guo Y., Fu L., Chen L., Wang J., Song X. 2023. Spatial and seasonal variations of near-inertial kinetic energy in the Ross Sea. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1173900. https://doi. org/10.3389/fmars.2023.1173900
- Shen X., Yu X., Zhang Y., Wang J., Wang D. 2023. Near-inertial wave propagation in the deep Canadian Basin. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128(5), e2023JC020228. https://doi.org/10.1029/2023JC020228
- 4. Konyaev K.V., Sabinin K.D. **1992.** [*Waves inside the ocean*]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 272 p.
- 5. Dobrovolsky A.D., Zalogin B.S. **1982.** Seas of the USSR. Moscow: Moscow University Press, 272 p.
- Rippeth T.P., Lincoln B.J., Lenn Y.-D., Mattias Green J.A., Sundfjord A., Bacon S. 2015. Tide-mediated warming of Arctic halocline by Atlantic heat fluxes over rough topography. *Nature Geoscience*, 8: 191–194. doi:10.1038/ngeo2350

- Krumpen T., Hölemann J.A., Willmes S., Morales Maqueda M.A., Busche T., Dmitrenko I.A., Gerdes R., Haas C., Heinemann G., Hendricks S., Kassens H., Rabenstein L., Schröder D. 2011. Sea ice production and water mass modification in the eastern Laptev Sea. *Journal of Geophysical Research*, 116, C05014. doi:10.1029/2010JC006545
- 8. Nekrasov A.V. **1990.** *Energy of ocean tides*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 288 p.
- Parker B.B. 2007. Tidal analysis and prediction. Maryland: Silver Spring, 378 p. http://dx.doi.org/10.25607/ OBP-191
- Furevik T., Foldvik A. **1996.** Stability at M2 critical latitude in the Barents Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C4): 8823–8838. https://doi. org/10.1029/96jc00081
- Kjersti L., Daae K.L., Fer I., Abrahamsen E.P. 2009. Mixing on the continental slope of the southern Weddell Sea. *Journal of Geophysical Research*, 114, C09018. doi:10.1029/2008JC005259
- 12. Lappo S.S. **1979.** [Medium-scale dynamic processes of the ocean excited by the atmosphere]. Moscow: Nauka, 179 p.
- Daae K.L., Fer I., Abrahamsen E.P. 2009. Mixing on the continental slope of the southern Weddell Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114, C09018. doi:10.1029/2008JC005259
- Bai X., Liu Z., Li X., Chen Z., Hu J., Sun Z, Zhu J. 2013. Observations of high-frequency internal waves in the Southern Taiwan Strait. *Journal of Coastal Research*, 29(6): 1413–1419. https://doi.org/10.2112/ jcoastres-d-12-00141.1
- Colosi J.A., Beardsley R.C., Lynch J.F., Gawarkiewicz G., Chiu C.S., Scotti A. 2001. Observations of nonlinear internal waves on the outer New England continental shelf during the summer Shelf Break Primer study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C5): 9587–9601. https://doi. org/10.1029/2000jc900124
- Duda T.F., Lynch J.F., Irish J.D., Beardsley R.C., Ramp S.R., Chiu C.S., Tang T.Y., Yang Y.J. 2004. Internal tide and nonlinear internal wave behavior at the continental slope in the northern South China Sea. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29(4): 1105–1130. https://doi.org/10.1109/joe.2004.836998
- Lee C.-Y., Beardsley R.C. 1974. Generation of long nonlinear internal waves in a weakly stratified shearflow. *Journal of Geophysical Research*, 79(3): 453– 462. https://doi.org/10.1029/jc079i003p00453
- Squire V.A., Kovalev D.P., Kovalev P.D., Medvedev I.P., Kulikov M.E. 2021. A cornucopia of oscillations on the Laptev Sea shelf. *Continental Shelf Research*, 227(2021), 104514. https://doi.org/10.1016/j. csr.2021.104514

- Zakharchuk E.A. **1999.** Internal waves in the Laptev Sea. In: *Land-Ocean systems in the Siberian Arctic. Dynamics and history*. Berlin: Springer-Verlag, p. 43–51. https://doi.org/10.1007/978-3-642-60134-7 5
- Darelius E., Smedsrud L.H., Osterhus S., Foldvik A., Gammelsrod T. 2009. Structure and variability of the Filchner overflow plume. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 61(3): 446–464. https://doi. org/10.3402/tellusa.v61i3.15559
- Levine M.D., Paulson C.A., Morison J.H. 1985. Internal waves in the Arctic Ocean Comparison with lower-latitude observations. *Journal of Physical Oceanography*, 15: 800–809. doi:10.1175/1520-0485(1985)015
- 22. Garrett C., Munk W. **1972.** Oceanic mixing by breaking internal waves. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 19(12): 823–832. https://doi. org/10.1016/0011-7471(72)90001-0

#### Об авторах

Сотрудники лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия:

Ковалев Дмитрий Петрович (https://orcid.org/0000-0002-5184-2350), профессор, доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории, d.kovalev@imgg.ru

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

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

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

Кириллов Константин Владиславович (https://orcid.org/0000-0002-0822-3060), научный сотрудник, k.kirillov@imgg.ru

Поступила 26.02.2025 Принята к публикации 23.05.2025

- Garrett C., Munk W. 1975. Space-time scales of internal waves: A progress report. *Journal of Geophysical Research*, 80: 291–297. https://doi.org/10.1029/ jc080i003p00291
- 24. Kowalik Z., Proshutinsky A.Y. **1994.** The Arctic Ocean tides. In: *The Polar Oceans and their role in shaping the global environment: Geophysical Monograph*, 85: 137–158.
- Dolgikh G.I., Kovalev P.D., Kovalev D.P., Kirillov K.V.
  2018. Peculiarities of waves in fast ice in the Southwestern Sea of Okhotsk. *Doklady Earth Sciences*, 481: 1073–1078. https://doi.org/10.1134/s1028334x18080123
- 26. Wadhams P. **1973.** Attenuation of swell by sea ice. *Journal of Geophysical Research*, 78(18): 3552–3563. https://doi.org/10.1029/jc078i018p03552
- 27. Mellor M. **1983.** *Mechanical behavior of sea ice*. Cold Regions Research and Engineering Laboratory Monograph, 83(1). 105 p.

#### 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 RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia:

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

**Kovalev, Peter D.** (https://orcid.org/0000-0002-7509-4107), Doctor of Engineering, Lead Researcher, p.kovalev@imgg.ru

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

Zarochintsev, Vitaly S. (https://orcid.org/0000-0002-4015-9441), Researcher, zarochintsev@imgg.ru

Kirillov, Konstantin V. (https://orcid.org/0000-0002-0822-3060), Researcher, k.kirillov@imgg.ru

> Received 26 February 2025 Accepted 23 May 2025

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

УДК 550.84:556



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

> https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.0.gah-1 https://elibrary.ru/wvbsfw Опубликована online first 18.04.2025

## Геологические и гидрологические факторы формирования полей повышенных концентраций метана на восточном шельфе острова Сахалин

А. О. Холмогоров, Н. С. Сырбу, В. Б. Лобанов, П. Д. Жердев, Е. В. Мальцева<sup>®</sup> <sup>®</sup>E-mail: ekor@poi.dvo.ru

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

Резюме. Статья продолжает серию исследований формирования и распределения полей повышенных концентраций метана, гелия и водорода на мелководном восточном шельфе о. Сахалин. В ходе комплексной океанографической экспедиции 2024 г. были проведены многочисленные измерения, позволившие выявить локализованные участки выхода газов со дна. Установлены высокие концентрации растворенного метана – 139 нМ/л, гелия – 12 ррт, водорода – 135 ррт, а также углекислого газа – 0.47 %, что может свидетельствовать о глубинном источнике этих газов. Показано, что области формирования полей повышенного содержания метана контролируются региональной системой разломов. Связь между тектоникой и распределением газов является важным фактором для понимания геохимических процессов в этом районе. Анализ данных, полученных в течение различных сезонов, показал существенную сезонную изменчивость в распространении полей повышенных концентраций метана. В теплый период года зоны высоких концентраций метана локализуются в области холодных промежуточных вод Охотского моря. Эти зоны располагаются под нижней границей сезонного пикноклина. Распространение метана к поверхности ограничено, что обусловлено сложной структурой водных масс и процессами вертикальной диффузии. Исследуемая акватория восточного шельфа о. Сахалин подвержена влиянию Восточно-Сахалинского течения, которое играет ключевую роль в распространении растворенных газов, поступающих из источников на дне. Это подчеркивает сложность и многогранность процессов, регулирующих миграцию и распределение газов в морской среде западной части Охотского моря.

**Ключевые слова:** растворенный метан, гелий, водород, остров Сахалин, восточный шельф, Восточно-Сахалинское течение, Охотское море

# Geological and hydrological factors of dissolved methane distribution on the eastern shelf of Sakhalin Island

Andrey O. Kholmogorov, Nadezhda S. Syrbu, Vyacheslav B. Lobanov, Pavel D. Zherdev, Elena V. Maltseva<sup>@</sup>

<sup>@</sup>E-mail: ekor@poi.dvo.ru

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia

**Abstract.** This paper continues a series of studies on the formation and distribution of dissolved methane, helium, and hydrogen on the shallow eastern shelf of Sakhalin Island. Numerous measurements, conducted during a comprehensive oceanographic expedition in 2024, revealed localized areas of gas emission from the seabed. The absolute maximum of dissolved methane was 139 nM/l; helium, 12 ppm; hydrogen, 135 ppm; and carbon dioxide, 0.47 percent, which could indicate the underlying source of these gases. It was shown that the formation of areas of high methane concentrations is controlled by a regional fault system. Tectonic activity has a significant impact on the gas distribution, which is important for understanding geochemical processes in a given area. Analysis of the data collected over different seasons showed a noticeable seasonal variability in the distribution of areas of high methane concentrations. During the warm season, these areas form within cold intermediate waters of the Sea of Okhotsk below the lower boundary of the sea-

sonal pycnocline. Methane diffusion to the surface is limited due to the complex water structure and vertical diffusion processes. The studied water area of the eastern shelf of Sakhalin Island is affected by the East Sakhalin Current, which plays a significant role in the distribution of dissolved gases from the seabed sources. This emphasizes the complexity and versatility of the processes regulating the migration and distribution of gases in the marine environment of the western Sea of Okhotsk.

Keywords: dissolved methane, helium, hydrogen, Sakhalin Island, eastern shelf, East Sakhalin Current, Sea of Okhotsk

Для цитирования: Холмогоров А.О., Сырбу Н.С., Лобанов В.Б., Жердев П.Д., Мальцева Е.В. Геологические и гидрологические факторы формирования полей повышенных концентраций метана на восточном шельфе острова Сахалин. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 2. с. 164–181. https:// doi.org/10.30730/gtrz.2025.0.gah-1; https://elibrary.ru/wvbsfw

#### Финансирование и благодарности

Работы, связанные с проведением экспедиций, осуществлены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания ТОИ ДВО РАН (№ 124022100078-7). Газогеохимические исследования, а также аналитическая работа выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-77-10038). Авторы благодарят научный состав и экипаж 88-го рейса НИС «Профессор Гагаринский» за организацию и сопровождение работ. Отдельная благодарность с.н.с. ТОИ ДВО РАН А.Ф. Сергееву за организацию палубных работ экспедиции, полезные наблюдения и сбор проб. *For citation:* Kholmogorov A.O., Syrbu N.S., Lobanov V.B., Zherdev P.D., Maltseva E.V. Geological and hydrological factors of dissolved methane distribution on the eastern shelf of Sakhalin Island. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 2. p. 164–181. (In Russ., abstr. in Engl.). https:// doi.org/10.30730/gtrz.2025.0.gah-1; https://elibrary.ru/wvbsfw

#### Funding and Acknowledgements

Marine expeditions were carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state task of the POI FEB RAS (No. 124022100078-7). Gas-ge-ochemical studies, as well as analytical work were funded by a Russian Science Foundation grant (No. 23-77-10038). The authors thank research group and crew of cruise 88 of the R/V «Professor Gagarinsky», and especially Aleksandr Sergeev for organizing deck work and efficient observations and sampling.

#### Введение

Континентальные окраины представляют собой обширные, динамичные геологические структуры, являющиеся переходными зонами между континентальной корой и океанической [1–5]. Их изучение критически важно по множеству причин, выходящих далеко за рамки простого научного любопытства.

Континентальные окраины – это зоны активных геологических процессов, где происходит взаимодействие тектонических плит, проявляющееся в виде землетрясений, вулканизма, грязевого вулканизма и формирования горных хребтов [6, 7]. Континентальные окраины являются также перспективными регионами для поиска и добычи углеводородов. Поровые пространства осадочных пород на шельфе и склоне служат ловушками для нефти и газа. Глубоководные месторождения, расположенные на больших глубинах, требуют все более совершенных технологий разведки и добычи, а изучение геологического строения окраин помогает определить наиболее перспективные участки. Кроме того, исследования позволяют оценить потенциальные экологические риски, связанные с добычей углеводородов.

Актуальность исследования связана и с проблемой изменения газогеохимических параметров в морях и прибрежных зонах. Выходы метана и других газов из донных отложений оказывают существенное влияние на биогеохимические циклы и вносят вклад в процессы изменения климата [8–11]. Исследования концентрации растворенных газов, в частности метана, в прибрежных водах, а также изучение газовых гидратов, залежи которых распространены на склонах континентальных окраин, позволяют оценить объемы выбросов и их влияние на окружающую среду. Генетическая связь подводных выходов метана с залежами нефти и газа, скоплениями газогидратов, глубинными разломами установлена для многих морей северо-западной части Тихого океана [12–15].

В современных тектонических исследованиях структура Восточно-Азиатской континентальной окраины рассматривается как коллизионно-аккреционная, сформировавшаяся в результате сложного сочетания в пространстве и времени аккреционных и коллизи-

онных процессов, а также трансформных перемещений как отдельных террейнов, так и их ансамблей [16–20]. В настоящее время считается доказанной взаимосвязь формирования геологической структуры о. Сахалин и прилегающих акваторий с развитием фанерозойских активных тихоокеанских окраин [16, 17, 21–23]. Хорошо выражена поперечная тектоническая зональность складчатой системы, которая прослеживается от южных частей Хоккайдо до п-ова Шмидта на севере Сахалина.

В связи с этим недооценка материковой и прибрежно-шельфовой части окраинных морей приводит к неполному пониманию процессов распределения газогеохимических полей, напрямую связанных с основными геологическими структурами, тектоникой и углеводородным потенциалом территории. Исследования мелководного нефтегазоносного северо-восточного шельфа о. Сахалин позволяют углубить понимание процессов выходов метана в дальневосточных окраинных морях, обусловленных геологическими источниками. При исследовании эмиссии метана необходимо применять комплексный подход, интегрирующий методы нескольких дисциплин - геологии, океанологии, геохимии.

Целью данной работы является обсуждение влияния основных геологических и гидрологических факторов на концентрации растворенных газов и их изменчивость на восточном мелководном шельфе о. Сахалин.

Наблюдения за сезонными изменениями концентраций метана в водных колонках помогут повысить достоверность расчета вклада метана, поступающего с поверхности воды и восточного шельфа Сахалина в атмосферу. Для достижения поставленной цели в ходе рейса № 88 НИС «Профессор Гагаринский» (Ga 88) с 23 августа по 20 сентября 2024 г. были осуществлены измерения концентраций растворенного метана, гелия, водорода и углекислого газа в центральной части восточного шельфа о. Сахалин. Выполнено 2 разреза (10 станций) (рис. 1).



Рис. 1. Карта района исследований. І – станции отбора проб воды в рейсе Ga 88, II – региональные разломы [25]: 1 – Восточно-Сахалинский; 2 – Хоккайдо-Сахалинский, 3 – Западно-Сахалинский, 4 – Центрально-Сахалинский, 5 – Срединно-Сахалинский, 6 – Западно-Байкальский, 7 – Пограничный, 8 – Тюлений, 9 – Сусунайский, 10 – Лиманский, 11 – Владимировский, 12 – Прибрежный, 13 – Мордвиновский, 14 – Аукан-Лунский, 15 – Тымский, 16 – Гыргыланьинский, 17 – Восточно-Байкальский, 18 – Верхне-Пильтунский, 19 – Западно-Шмидтовский, 20 – Западно-Одоптинский, 21 – Совгаванский, 22 – Бошняковский, 23 – Слепиковский, 24 – Монеронский.

Fig. 1. Map of the research area. I, water sampling stations of the cruise Ga 88; II, regional faults [25]: 1, East-Sakhalin; 2, Hokkaido–Sakhalin; 3, West Sakhalin; 4, Central Sakhalin; 5, Medium-Sakhalin; 6, West-Baikal; 7, Pogranichny; 8, Tyuleniy; 9, Susunaysky; 10, Limansky; 11, Vladimirovsky; 12, Pribrezhny; 13, Mordvinovsky; 14, Aukan-Lunsky; 15, Tymsky; 16, Gyrgylaninsky; 17, East-Baikal; 18, Verkhne-Piltunsky; 19, West-Shmidtovsky; 20, West-Odoptinsky; 21, Sovgavansky; 22, Boshnyakovsky; 23, Slepikovsky; 24, Moneron. Исследования стали продолжением серии работ, проведенных на охотоморском шельфе о. Сахалин в 2023 г. [24]. В данном районе до глубины 500 м расположено множество локальных нефтегазоносных структур, на северо-восточном побережье Сахалина обследованы многочисленные проявления термальных вод: Дагинские, Луньские, Паромайские.

#### Материалы и методы

Газогеохимические исследования позволяют оценить изменчивость содержания метана, гелия и водорода в морской воде по горизонтам, выявить источники поступления газа, а также получить информацию для дальнейшей оценки взаимосвязи фонового и аномального содержания с морфоструктурными и тектоническими элементами. Растворенные в воде метан, водород и гелий используются в качестве индикаторов зон разломов, для прогнозирования сейсмической активности, оценки состояния окружающей среды и поиска месторождений углеводородов.

Работы на восточном шельфе о. Сахалин проводились в рейсе № 88 НИС «Профессор Гагаринский» в период с 23 августа по 20 сентября 2024 г.

Отбор проб воды из батометров системы Нискина осуществлялся на станциях при СТДзондировании в диапазоне глубин от поверхности до дна в период 8–9 сентября 2024 г. Всего для анализа было отобрано 118 проб воды.

Содержания метана, гелия и водорода во всех образцах определяли методом равновесных концентраций «HeadSpace» [26]. Вода из батометров отбиралась методом «тройного перелива» в предварительно простерилизованные медицинские стеклянные бутылки объемом 68 и 100 мл, которые герметично закрывались стерильными резиновыми пробками без доступа в бутылки атмосферного воздуха. Для удаления излишков воды применяли иглы от медицинского шприца.

Для анализа содержания метана при создании газовой фазы в бутылки вводили гелий (10 мл) марки 6.0, для анализа содержания гелия и водорода – атмосферный воздух (10 мл). Далее содержимое образца интенсивно перемешивали. Перед проведением анализа газовую фазу равновесно извлекали шприцем для ввода пробы в газовый хроматограф. Метан определяли в лаборатории ТОИ ДВО РАН на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 9000»; концентрации гелия и водорода – на газовом хроматографе «Хроматэк-Газохром 2000» (ОАО «Хроматэк») с датчиками теплопроводности повышенной чувствительности (1–2 ррт по гелию и водороду).

Концентрации метана, растворенного в морской воде, рассчитывали методом равновесного парафазного анализа с помощью констант растворимости по методике [27] в модификации [28].

## Гидрологические особенности района исследований

Восточно-Сахалинское течение (ВСТ) является важным компонентом циркуляции вод Охотского моря, представляя собой западную часть обширного циклонического круговорота, охватывающего данный регион (рис. 2). Течение переносит вдоль восточного шельфа и склона о. Сахалин в южном направлении холодную воду с низкой соленостью из северо-западной части Охотского моря, наиболее изолированного района, где медленно тающие плавучие льды застаиваются до начала лета [29-33]. Летом низкая соленость вод обусловлена стоком р. Амур. На промежуточных глубинах благодаря ВСТ холодная и тяжелая вода дихотермического слоя Охотского моря распространяется на юг к Курильским проливам, где способствует вентиляции промежуточного слоя северной части Тихого океана [34].

Средняя скорость течения составляет 10–12 см/с, а в фазу прилива она может увеличиваться до 20–40 см/с [32]. Структура течения характеризуется сильной сезонной изменчивостью.

Дрифтеры и инструментальные измерения течений, проведенные в 1998–2001 гг. [35], показали, что ВСТ состоит из двух ветвей. Одна ветвь проходит вблизи берега, на глубинах 50–150 м, со скоростью 30–40 см/с. Вторая находится над континентальным склоном, с глубинами 300–900 м и скоростью 20–30 см/с. Такую структуру ВСТ детально подтверждают численное моделирование, представленное в работах [35–38], и данные спутниковой альтиметрии [39], которые также показывают сезонные и межгодовые колебания течения.

В работах [40, 41] приведены результаты моделирования циркуляции в Охотском море для каждого месяца и на различных уровнях от поверхности до горизонта 500 м, демонстрирующие сезонные изменения скорости и направления течения, а также возможность обратного течения, но его общее среднее направление с севера на юг является общепризнанным.



**Рис. 2.** Схема течений в районе исследований на 9 сентября 2024 г. (https://earth.nullschool.net/). 1 – станции отбора проб в рейсе Ga 88, 2 – схематическое направление Восточно-Сахалинского течения.

**Fig. 2.** Scheme of the currents in the research area for September 9, 2024 (https://earth.nullschool.net/). 1, sampling stations of the cruise Ga 88; 2, schematic direction of the East Sakhalin current.

Измерения автономными буйковыми станциями [42] и анализ спутниковых данных [31] показывают, что преобладающие летом южные ветры создают зону сезонного апвеллинга вдоль побережья о. Сахалин, когда более холодная вода поднимается к поверхности. Температура поверхностного слоя воды повышается с удалением от берега.

В результате многолетних (около 40 лет) СТD-наблюдений (conductivity, temperature, depth) на гидрографических разрезах [43] установлено, что Восточно-Сахалинское течение и Восточно-Сахалинское противотечение являются основными и устойчивыми элементами циркуляции вод на северо-восточном шельфе и склоне о. Сахалин. Они постоянно присутствуют в любое время года, но их интенсивность значительно варьирует как во времени, так и в пространстве [40, 41, 44].

Сильное приливное движение является важным компонентом динамики вод на восточном шельфе о. Сахалин [29-32]. Суточные приливы формируют шельфовые волны, которые захватываются в северо-западной части шельфа [31]. Это приводит к мезомасштабным изменениям в потоках. В работе [45] показано также наличие особенностей мезомасштабной циркуляции в Восточно-Сахалинском течении. Авторы связывают образование мезомасштабных вихрей с прибрежным апвеллингом, вызванным северными ветрами и положительным ветровым напряжением вдоль побережья о. Сахалин. Наибольшая интенсивность апвеллинга на восточном шельфе наблюдается в июле-августе [46, 47]. Такие мезомасштабные циклоны и антициклоны обеспечивают водообмен между шельфом и глубокой частью Охотского моря.

## Геологические особенности района исследований

Сахалин и присахалинский шельф являются частью Охотоморского региона, который находится в Азиатско-Тихоокеанской зоне перехода от континента к океану и представляет собой гигантскую межблоковую структуру глобального уровня и область интенсивной

разрядки глубинной энергии, активной позднемезозойско-кайнозойской и современной геодинамики [25].

Согласно ряду последних представлений, Охотоморская плита, сдавливаемая Евроазиатской, Амурской, Североамериканской и Тихоокеанской плитами [48, 49], вращается против часовой стрелки. Об этом косвенно свидетельствует также правосторонний тектогенез в зонах субширотных литосферных разломов Охотоморской плиты [25]. Анализ особенностей строения осадочных бассейнов Охотоморского региона показывает, что подавляющее их большинство контролируется тектоническими прогибами, развивавшимися в условиях деструктивного тектогенеза. Деструктивные рифтогенные процессы не только обеспечили формирование крупных осадочных бассейнов, но и создали благоприятные условия для интенсивного образования, накопления и разрушения углеводородных скоплений. При этом рифты, как наиболее эффективные проводники глубинного тепла Земли, не только сформировали здесь оптимальную для процессов образования нефти и газа термодинамическую обстановку, но и, являясь крупнейшими проницаемыми структурами литосферы, служат проводниками восходящих флюидных потоков [25].

Весь Сахалинский регион расположен в сейсмически активной зоне и относится к Тихоокеанскому подвижному поясу. Сейсмическая активность является индикатором напряженно-деформированного состояния земной коры, влияющего на процессы нефтегазонакопления. Эпицентры большинства землетрясений приурочены к глубинным зонам разломов [50]. Данные по сейсмичности говорят о важной роли глубинных разломов в формировании геологической структуры острова. Сфера влияния глубинных разломов в момент тектонических подвижек распространяется на 60 км, наибольшие напряжения отмечаются в приразломной полосе 3-4 км. Вдоль Хоккайдо-Сахалинского и Центрально-Сахалинского разломов вертикальная амплитуда смещения блоков составляет 400-600 м [51]. В периоды землетрясений в районе глубоких тектонических прогибов может происходить смешивание глубинных флюидов и миграция флюидов в проницаемые зоны. Флюиды заполняют трещины и выдавливаются вверх по разлому. Если разлом перекрыт осадочным чехлом (северовосточная часть о. Сахалин), то флюиды скапливаются в пластах пористых и трещиноватых пород, а если разлом сообщается с земной поверхностью (южная и юго-западная часть Сахалина), то флюиды выходят на поверхность.

Район исследований расположен в центральной части восточной акватории о. Сахалин в пределах Пограничного осадочного бассейна. Пограничный бассейн занимает акваторию шельфа юго-восточного Сахалина и территорию одноименной межгорной депрессии. Прогиб шириной до 40 км имеет крутой, интенсивно дислоцированный западный борт, осложненный приразломными структурами Пограничного надвига [25]. В пределах Пограничного бассейна докайнозойские аккреционные массивы надвинуты на позднемеловые и кайнозойские блоки. Здесь в структурном отношении шельф представляет собой серию продольных чередующихся поднятий и впадин, которые в свою очередь практически полностью компенсированы осадками, осадочными кайнозойскими толщами мощностью до 4-6 км.

На шельфе пробурена скважина Борисовская (см. рис. 1). Скважиной вскрыт разрез от олигоцена до среднего миоцена, сложенный глубоководными и морскими кремнисто-глинистыми, глинистыми породами с прослоями алевролитов.

В акватории и прибрежной зоне Сахалина, в пределах Пограничного нефтегазоносного бассейна, расположено несколько перспективных локальных нефтегазовых месторождений. Среди наиболее известных можно выделить Южно-Окружное, Восточно-Окружное, Восточно-Рыминское, Витницкое и Богатинское. Эти месторождения тесно связаны с геологической структурой региона, а именно - с Пограничным разломом. Этот крупный тектонический разлом простирается вдоль восточного побережья Сахалина, представляя собой сложную систему надвигов и сбросов. В южной части бассейна разлом характеризуется интенсивными надвиговыми дислокациями, где мощные пласты горных пород надвигаются друг на друга, образуя

сложные складчатые структуры, благоприятные для скопления углеводородов. К северу Пограничный разлом выражен в виде сбросовых дислокаций, где ему соответствуют локальные нефтегазоносные структуры Ныйской антиклинальной зоны: Венинская, Лунская, Набильская. Пограничная разломная зона, несмотря на свою сложность, характеризуется высокой проницаемостью. Это связано с сильной трещиноватостью пород, образующейся в зонах тектонических деформаций. Присдвиговые деформации, включающие в себя как сжатие, так и растяжение, создали условия для активных флюидодинамических процессов, способствующих миграции углеводородов из глубинных источников. Наличие зон растяжения вдоль разлома является ключевым фактором, позволяющим углеводородным флюидам мигрировать на значительные расстояния.

#### Результаты

В рейсе № 88 НИС «Профессор Гагаринский» в южной части восточной акватории о. Сахалин выполнены 2 разреза (10 станций) для определения содержаний растворенных метана, гелия, водорода и углекислого газа (рис. 2). Рассмотрим гидрологические характеристики исследуемого района по результатам CTD-зондирований, выполненных вдоль этих разрезов (рис. 3). Распределение температуры воды и солености показывает типичную для летнего сезона вертикальную структуру с прогретым и распресненным поверхностным слоем (12.3-13.8 °С и 28.4-31.1 епс), ниже которого располагаются холодные промежуточные воды Охотского моря (до -0.9 °C), соленость которых возрастает с глубиной до 33.2-33.5 епс. Резкий сезонный термоклин



**Рис. 3.** Вертикальное распределение температуры воды (a, b), солености (c, d) и меридиональной составляющей скорости геострофических течений (e, f) по результатам СТД-зондирований вдоль северного (a, c, e) и южного (b, d, f) разрезов на шельфе о. Сахалин 8–9 сентября 2024 г. На верхней оси указаны номера станций. Положительное направление течений – на север.

**Fig. 3.** Vertical distribution of water temperature (a, b), salinity (c, d), and the meridional component of geostrophic current velocity (e, f) based on the results of CTD soundings along the northern (a, c, e) and southern (b, d, f) sections on the Sakhalin shelf on September 8-9, 2024. The station numbers are shown above. The positive direction of the currents is to the north.

и галоклин, а соответственно и пикноклин находятся в слое 15–30 м. У берега, на глубинах менее 70 м, они расщепляются и заглубляются под воздействием приливного перемешивания. Здесь у дна вода значительно теплее (3.5–5 °С), чем в мористой части. Термохалинная структура вод практически одинакова на северном и южном разрезах.

Геострофические расчеты показывают поток вод южного направления в прибрежной части разрезов (рис. 3 e, f), который, очевидно, соответствует Восточно-Сахалинскому течению. Как известно, Восточно-Сахалинское течение максимально в конце осени – начале зимы, а в летний период выражено слабо [31, 52]. Тем не менее, скорости направленных на юг геострофических течений достигали 22.6 см/с на северном разрезе и 16.3 см/с на южном. Максимальные течения отмечались в поверхностном слое 0-30 м, выше сезонного пикноклина. Этот поток переносит наиболее распресненную воду, соленость которой составляет 28.4-29.0 епс, очевидно под воздействием речного стока, а также водообмена с прибрежными лагунами. Направленное на юг течение, но со слабыми скоростями (1-4 см/с) наблюдается на большей части разрезов, за исключением мористой части северного разреза, где отмечен поток северного направления (рис. 3 д). Вероятно, это соответствует Восточно-Сахалинскому противотечению, на присутствие которого в летнее время указывалось в нескольких публикациях [43].

Сравнение картины течений на северном и южном разрезах – более интенсивный прибрежный южный поток на севере и размытый и слабый на юге, а также северное противотечение на мористом краю северного разреза – указывает на неоднородность поля течений в летний сезон и формирование мезомасштабных возмущений, что отмечалось в других работах [45].

Распределение растворенных газов на этих разрезах показано на рис. 4 и 5. В придонном слое обнаружены участки повышенных концентраций растворенного метана.

На северном разрезе в районе станций № 61–62 в слое 160–80 м при глубине 116–163 м соответственно обнаружена область повышенных концентраций метана – более 100 нМ/л, имеющая горизонтальный масштаб около 40 км. Вероятно, она связана с локальной областью дегазации (рис. 4 а). Абсолютный максимум метана (139 нМ/л) находится в районе станции № 62 у дна на глубине 162 м. При этом на станции № 62 метан распространяется от дна до нижней границы сезонного пикноклина – 25 м (рис. 4 а). Данная аномалия продолжается на восток, в слое 150–250 м.

На крайней восточной станции № 59 в этом слое выявлена область повышенных концентраций метана с локальным максимумом 137 нМ/л на горизонте 200 м при общей глубине станции 325 м. Эта область не имеет явной связи с придонным источником. Вероятно, данное поле метана – результат горизонтальной адвекции вод Восточно-Сахалинским течением с севера.

На этом разрезе обнаружены и две области повышенного содержания гелия – 11.5 ppm в районе станции № 63 и 11.5–12.3 ppm в районе станции № 59 (рис. 4 с), при этом фоновые содержания гелия в воде для Охотского моря составляют 4.2 ppm [53].

Поля повышенного содержания водорода 94 ppm и 135 ppm (рис. 4 d) в районе станций № 59 и № 60 также не имеют однозначной связи с придонным источником. Их наличие в середине водной толщи, как и полей гелия на станции № 59, может быть связано с переносом растворенных газов Восточно-Сахалинским течением. Этот аспект нуждается в дополнительных исследованиях.

Область повышенного содержания растворенного  $CO_2$  до 0.4 % (рис. 4 b) также находится в холодных промежуточных охотоморских водах (рис. 3 а) и распространяется от дна до горизонта 25 м в районе станций № 60–62. Примечательно, что внутри этой области содержание  $CO_2$  составляет 0.35 % и выше.

На южном разрезе (рис. 5) тоже обнаружены области повышенных концентраций растворенного метана (рис. 5 а).

Первая, придонная область находится в районе станций № 64–66, с концентрацией более 100 нМ/л и локальным максимумом 126 нМ/л у дна станции № 65 на глубине 119 м. Данная область распространяется от дна до нижней границы сезонного пикноклина 25 м. Вторая область, с концентрациями растворенного метана 100–115 нМ/л, расположена в районе станций № 67–68 в слое 75–135 м при глубине 230–345 м соответственно (рис. 5 а) и не имеет явной связи с каким-либо придонным источником.

Содержание гелия до 12.5 ppm на южном разрезе (рис. 5 с) также превышает известные фоновые значения 4.2 ppm [54], но количественно ниже значений Не для северного разреза (рис. 4 с). Содержание водорода составило до 6.6 ppm у дна на станции № 66 (рис. 5 d).

Область повышенного содержания растворенного CO<sub>2</sub> до 0.4 % (рис. 5 b) находится, как и на северном разрезе, в холодных промежуточных охотоморских водах (рис. 3 b) и распространяется от дна до горизонта 25 м в районе станций № 65–67. Внутри этой области содержание CO<sub>2</sub> составляет 0.35 % и выше.



**Рис. 4.** Вертикальное распределение метана (а), углекислого газа (b), гелия (c) и водорода (d) на северном разрезе. **Fig. 4.** Vertical distribution of methane (a), carbon dioxide (b), helium (c), and hydrogen (d) in the northern section.



**Рис. 5.** Вертикальное распределение метана (а), углекислого газа (b), гелия (c) и водорода (d) на южном разрезе. **Fig. 5.** Vertical distribution of methane (a), carbon dioxide (b), helium (c), and hydrogen (d) in the southern section.

#### Обсуждение

Проведенные работы стали продолжением экспедиционных исследований распределения полей газов в воде мелководного восточного склона о. Сахалин, выполненных в 2023 г. [24].

Газогеохимические исследования в районе центральной мелководной части восточного шельфа указывают на наличие интенсивных источников дегазации. Подтверждено, что источником метана в исследуемом районе являются подстилающие породы – коллекторы нефти и газа, содержащие флюиды. Нефтегазоносные породы охватывают не только шельф, но и значительные береговые участки острова, где установлены многочисленные термопроявления с преобладанием метана в газовом составе. Совпадение аномалий метана и гелия подтверждает поступление газов из недр в воду по зонам разломов и трещинам из углеводородных залежей.

Газогеохимические исследования южной части восточного шельфа Сахалина также выявили интенсивную дегазацию морского дна, что связано в первую очередь с тектоническими особенностями региона. Существенные сдвиги в блоке, ограниченном с запада Хоккайдо-Сахалинским, с востока Пограничным, а с юго-запада Срединно-Сахалинским глубинными разломами, привели к образованию субмеридиональных и диагональных надвигов. Эти надвиги располагаются практически с одинаковым интервалом в 18-20 км. Такие геодинамические процессы способствовали формированию значительных по размеру Пограничного, Лунского и других узких кайнозойских грабенов вдоль восточного побережья Сахалина. Современная высокая сейсмическая активность и активные разломы, секущие морское дно [25, 54], создают идеальные условия для газопроницаемости. Формирование аномальных концентраций метана и гелия в водной толще - прямое следствие этой интенсивной дегазации. Проведенные исследования показали не только увеличение концентраций этих газов к побережью, но и наличие градиентов концентраций, что позволяет судить о направлении и интенсивности дегазации.

Исследования гелия как инертного газа полезны для изучения природы газовой эмиссии, так как газ является природным инертным индикатором, который переносится без химической реакции с вмещающими породами. Гелий в придонных водах может образовываться из трех источников с различными изотопными характеристиками, позволяющими проследить происхождение и перенос флюидов [55]: атмосферный, коровый и мантийный. Наличие гелия на прилегающем мелководном восточном шельфе Сахалина может быть обусловлено либо радиогенным источником в земной коре, таким как угленосные отложения [53, 56], либо дегазацией мантии [57]. В единственном исследовании на острове, посвященном изотопам гелия, указано, что грязевые вулканы, расположенные на юге Сахалина, содержат мантийный гелий (<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He достигает 3.3  $R_{air}$  ( $R_{air}$  текущее атмосферное соотношение <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He) [56], в то время как горячие источники и минеральные воды, расположенные на северо-восточном побережье острова, показывают некоторое влияние радиогенного гелия  $({}^{3}\text{He}/{}^{4}\text{He} = \sim 0.6 R_{air} [56]).$ 

Повышенные концентрации водорода, вероятно, распространяются в направлении от шельфа, что связано с активной микробиологической продукцией свободного водорода в фотическом слое морской воды [58]. На жизненный цикл фитопланктона в прибрежных водах восточного Сахалина большое влияние оказывает динамика вод. Процессы биопродукции резко усиливаются с развитием мезомасштабной динамики вод. Присутствие водорода и метана может также указывать на биодеградацию длинноцепочечных углеводородов [59, 60].

На TS-диаграмме (рис. 6) видно, что повышенные концентрации растворенного метана расположены в области холодной воды с высокой соленостью.

Растворимость метана в воде при давлении до 50 бар (глубина 500 м) зависит главным образом от температуры и солености воды [61], при этом растворимость повышается при понижении температуры [62]. В районе исследования работы были проведены на глубинах



**Рис. 6.** ТЅ-диаграмма растворенного метана по данным измерений в рейсе Ga 88.

до 400 м, что соответствует около 38 бар давления, и в этом случае главными факторами растворимости метана остаются температура и соленость. Коэффициент растворимости метана [27] значительно изменяется при резких колебаниях термохалинных характеристик воды, например в слое скачка или в потоке теплого течения, проходящем через холодные воды, как это наблюдается в прол. Брансфилд [63] и т.п. Таким образом, метан, выделяющийся из донных источников в шельфовых зонах, растворяется в холодной промежуточной охотоморской водной массе в слое от дна до нижней границы сезонного пикноклина, практически не проникая в поверхностный слой.

Обращают на себя внимание участки с высокими уровнями метана в районе станции № 59 на севере (рис. 4 а) и станций № 67–68 на южном разрезе (рис. 5 а), которые не демонстрируют явной связи с подводными источниками.

Распространение метановых полей, вероятно, связано с адвекцией вод Восточно-Сахалинским течением. Область в районе станций № 67–68 (рис. 5 а) может формироваться метаном, переносимым с севера из района станции № 59 (рис. 4 а), поскольку эти области находятся в районе глубин дна 250–300 м. Вертикальный масштаб данных областей совпадает (125 м), однако область на южном разрезе расположена в слое 25–150 м, а на северном – 125–250 м. Локальный максимум метана снижается в этих областях с севера на юг от 137 до 105 нМ/л. Адвекция полей метана может быть также обусловлена мезомасштабной динамикой вод, развивающимися вихревыми образованиями, интенсивными приливными течениями.

Необходимо также учитывать стратификацию вод и влияние термоклина. Возможно, метан, высвобождающийся со дна в северной области (ст. № 59), поднимается до термоклина и затем распространяется вдоль него на юг, формируя аномалии, наблюдаемые в слое 25– 150 м на южном разрезе. Не исключено формирование метановых полей *in situ*, обусловленное локальными источниками, такими как микропросачивание из донных отложений [64, 65] или разложение органического вещества [66]. В таком случае влияние динамики вод может заключаться в перераспределении метановых областей.

#### Заключение

В ходе газогеохимических и океанологических исследований, проведенных в 2024 г. на южной части восточного шельфа о. Сахалин, были обнаружены значительные зоны интенсивной дегазации. Интенсивность выделения газов заметно увеличивается по направлению с востока на запад, приближаясь к побережью острова. Глубинный характер выделяемых придонными источниками газов подтверждается их компонентным составом: высоким содержанием метана (до 139 нМ/л), гелия (12 ppm), водорода (135 ppm), что подчеркивает сложную природу флюидных потоков. Связь повышенных концентраций растворенных газов в воде с региональной геологической структурой – Пограничным разломом – и локальными месторождениями нефти и газа позволяет предположить, что глубинная флюидодинамика играет ключевую роль в формировании газогеохимических особенностей восточного шельфа Сахалина.

Восточно-Сахалинское течение, один из ключевых элементов гидродинамической системы региона, оказывает существенное

Fig. 6. TS diagram of dissolved methane according to measurements of the cruise Ga 88.

воздействие на перенос газов, выделяющихся из придонных источников. Выделяемый из этих источников метан растворяется в холодных промежуточных водах Охотского моря. Однако помимо зон, непосредственно примыкающих к придонным источникам, повышенные концентрации метана были обнаружены и в основной ветви Восточно-Сахалинского течения. Это говорит о том, что течение переносит растворенный метан на значительные расстояния, перемещая его с севера на юг вдоль побережья.

Таким образом, выявленная картина свидетельствует о комплексной системе взаимодействия глубинных геологических процессов и гидродинамики. Глубинные флюидные потоки, связанные с тектонической активностью и нефтегазовыми месторождениями, являются источником значительных количеств метана, гелия и водорода. Эти газы, растворяясь в морской воде, затем переносятся Восточно-Сахалинским течением, формируя характерное пространственное распределение аномалий, отмечающееся высокой интенсивностью дегазации в западной части исследуемого района шельфа.

#### Список литературы

- Talwani M., Eldholm O. 1973. Boundary between continental and oceanic crust at the margin of rifted continents. *Nature*, 241: 325–330. https://doi. org/10.1038/241325a0
- Moore J.C., Vrolijk P. 1992. Fluids in accretionary prisms. *Reviews of Geophysics*, 30: 113–135. https://doi. org/10.1029/92rg00201
- Казанин Г.С., Барабанова Ю.Б., Кириллова-Покровская Т.А. Черников С.Ф., Павлов С.П., Иванов Г.И. 2017. Континентальная окраина Восточно-Сибирского моря: геологическое строение и перспективы нефтегазоносности. *Разведка и охрана недр*, 10: 51–55.
- 4. Khain V., Polyakova I. **2008.** Oil and gas potential of continental margins of the Pacific Ocean. *Lithology and Mineral Resources*, 43: 81–92. https://doi.org/10.1134/S0024490208010082
- Konyukhov A.I. 2009. Continental margins: Global belts of oil and gas accumulation. *Lithology and Mineral Resources*, 44: 513–530. https://doi.org/10.1134/ S0024490209060017

- Oliver J., Isacks B.L., Barazangi M. 1974. Seismicity at continental margins. In: Burk C.A., Drake C.L. (eds) *The geology of continental margins*. Berlin, Heidelberg, Springer, p. 85–92. https://doi.org/10.1007/978-3-662-01141-6\_7
- Orange D.L., Greene H.G., Reed D., Martin J.B., McHugh C.M, Ryan W., Maher N, Stakes D., Barry J. 1999. Widespread fluid expulsion on a translational continental margin: Mud volcanoes, fault zones, headless canyons, and organic-rich substrate in Monterey Bay, California. *Geological Society of America Bulletin*, 111(7): 992–1009. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1999)111<0992:wfeoat>2.3.co;2
- Reeburgh W.S. 2007. Oceanic methane biogeochemistry. *Chemical Reviews*, 107: 486–513. https://doi. org/10.1021/cr050362v
- Römer M., Sahling H., Pape T., Bohrmann G., Spieβ V. 2012. Quantification of gas bubble emissions from submarine hydrocarbon seeps at the Makran continental margin (offshore Pakistan). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C10): C10015. https://doi. org/10.1029/2011jc007424
- Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson O. 2010. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science*, 327: 1246–1250. https://doi.org/10.1126/science.1182221
- Weber T., Wiseman N.A., Kock A. 2019. Global ocean methane emissions dominated by shallow coastal waters. *Nature Communication*, 10: 4584. https://doi. org/10.1038/s41467-019-12541-7
- 12. Обжиров А.И., Ильичев В.И., Кулинич Р.Г. **1985.** Аномалия природных газов в придонной воде Южно-Китайского моря. Доклады Академии наук СССР, 281(5): 1206–1209.
- Кулинич Р.Г., Обжиров А.И. 1985. О структуре и современной активности зоны сочленения шельфа Сунда и котловины Южно-Китайского моря. *Тихоокеанская геология*, 3: 102–106.
- Abrams M. 1992. Geophysical and geochemical evidence for subsurface hydrocarbon leakage in the Bering Sea, Alaska. *Marine and Petroleum Geol*ogy, 9(2): 208–221. https://doi.org/10.1016/0264-8172(92)90092-s
- Hovland M., Croker P.F., Martin M. 1994. Fault associated seabed mounds (carbonate knolls?) off western Ireland and north-west Australia. *Marine* and Petroleum Geology, 11(2): 232–246. https://doi. org/10.1016/0264-8172(94)90099-x
- Рождественский В.С. 1976. О сдвиговых смещениях вдоль зоны Тымь-Поронайского разлома на о. Сахалин. Доклады АН СССР, 230(3): 678–780.

- Ханчук А.И. 1993. Геологическое строение и развитие континентального обрамления северо-запада Тихого океана: автореферат дис. ... д-ра геол.-минер. наук. Москва, Геологический институт РАН.
- Чехович В.Д. (ред.) 1993. Тектоника и геодинамика складчатого обрамления малых океанических бассейнов. М.: Наука, 271 с.
- Isozaki Y. **1996.** Anatomy and genesis of a subduction-related orogen: A new view on the geotectonic subdivision and evolution of the Japanese Islands. *The Island Arc*, 5: 289–320. https://doi. org/10.1111/j.1440-1738.1996.tb00033.x
- Maruyama S., Isozaki Y., Kimura G., Terabayashi M. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *The Island Arc*, 6: 121–142. https://doi. org/10.1111/j.1440-1738.1997.tb00043.x
- 21. Гранник В.М. **2005.** Сопоставление структурных элементов Сахалина и Хоккайдо. Доклады Академии наук, 400(5): 654–659. EDN: OONLDT
- 22. Гранник В.М. **2013.** Восточно-Сахалинская островодужная система охотоморского региона. *Литосфера*, 1: 36–51.
- Zharov A.E. 2005. South Sakhalin tectonics and geodynamics: A model for the Cretaceous-Paleogene accretion of the East Asian continental margin. *Russian Journal of Earth Sciences*, 7: ES5002. https://doi. org/10.2205/2005ES000190
- Syrbu N., Kholmogorov A., Stepochkin I., Lobanov V., Shkorba S. 2024. Formation of abnormal gas-geochemical fields and dissolved gases transport at the shallow northeastern shelf of Sakhalin Island in warm season: Expedition data and remote sensing. *Water*, 16: 1434. https://doi.org/10.3390/w16101434
- 25. Харахинов В.В. **2010.** Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 276 с.
- Vereshchagina O.F., Korovitskaya E.V., Mishukova G.I. 2013. Methane in water columns and sediments of the north western Sea of Japan. *Deep-Sea Research II: Topical Studies in Oceanography*, 86–87: 25–33. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.08.017
- Yamamoto S., Alcauskas J.B., Crozier T.E. 1976. Solubility of methane in distilled water and seawater. J. of Chemical & Engineering Data, 21(1): 78–80. https://doi.org/10.1021/je60068a029
- Wiessenburg D.A., Guinasso N.L. 1979. Equilibrium solubility of methane, carbon dioxide, and hydrogen in water and sea water. J. of Chemical & Engineering Data, 24(4): 356–360. https://doi.org/10.1021/ je60083a006
- 29. Леонов А.К. **1960.** *Региональная океанография*. Л.: Гидрометеоиздат, 165 с.

- Власова Г.А., Глебова С.Ю. 2008. Сезонная изменчивость поверхностных течений Охотского моря под влиянием синоптических процессов. Известия ТИНРО, 154: 259–269.
- 31. Власова Г.А., Васильев А.С., Шевченко Г.В. 2008. Пространственная и временная изменчивость структуры и динамики вод Охотского моря. М.: Наука, 359 с.
- 32. Лучин В.А. 1998. Непериодические течения. В кн.: Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 9: Охотское море, вып. 1: Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 233–256.
- 33. Ohshima K.I., Wakatsuchi M., Fukamachi Y., Mizuta G. 2002. Near-surface circulation and tidal currents of the Okhotsk Sea observed with satellite-tracked drifters. *J. of Geophysical Research: Oceans*, 107: 11. https://doi.org/10.1029/2001jc001005
- Talley L.D. 1991. An Okhotsk Sea water anomaly: Implications for ventilation in the North Pacific. *Deep-Sea Research A. Oceanographic Research Papers*, 38(S1): S171–S190. https://doi.org/10.1016/s0198-0149(12)80009-4
- Simizu D., Ohshima K.I. 2002. Barotropic response of the Sea of Okhotsk to wind forcing. *Journal of Oceanography*, 58(6): 851–860.
- Shimada Y., Kubokawa A., Ohshima K.I. 2005. Influence of current width variation on the annual mean transport of the East Sakhalin Current: A simple model. *Journal of Oceanography*, 61: 913–920. https://doi.org/10.1007/s10872-006-0009-y
- Simizu D., Ohshima K.I. 2006. A model simulation on the circulation in the Sea of Okhotsk and the East Sakhalin Current. J. of Geophysical Research: Oceans, 111: 05016. https://doi.org/10.1029/2005jc002980
- Ohshima K.I., Simizu D. 2008. Particle tracking experiments on a model of the Okhotsk Sea: Toward oil spill simulation. *Journal of Oceanography*, 64: 103–114. https://doi.org/10.1007/s10872-008-0008-2
- Ebuchi N. 2006. Seasonal and interannual variations in the East Sakhalin Current revealed by the TOPEX/PO-SEIDON altimeter data. *Journal of Oceanography*, 62: 171–183. https://doi.org/10.1007/s10872-006-0042-x
- Файман П.А. 2018. Атлас течений Охотского моря. Владивосток: Дальневост. региональный науч.-исслед. гидрометеорологический инст., 133 с.
- Файман П.А., Пранц С.В., Будянский М.В., Улейский М.Ю. 2021. Моделирование распространения тихоокеанских вод в Охотском море. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 57: 329–340.
- 42. Rybalko S.I., Shevchenko G.V. **2003.** Seasonal and spatial variability of sea currents on the Sakhalin northeastern shelf. *Pacific Oceanography*, 1(2): 168–178.

- 43. Пищальник В.М., Архипкин В.С., Леонов А.В. 2014. Восстановление годового хода термохалинных характеристик и циркуляции вод на северо-восточном шельфе Сахалина. Водные ресурсы, 41(4): 362–374. doi:10.7868/S0321059614040129; EDN: SFAKND
- 44. Fayman P., Prants S., Budyansky M., Uleysky M. 2020. New circulation features in the Okhotsk Sea from a numerical model. *Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, 56: 618–631. https://doi.org/10.1134/ s0001433820060043
- Prants S., Andreev A., Budyansky M., Uleysky M. 2017. Mesoscale circulation along the Sakhalin Island eastern coast. *Ocean Dynamics*, 67: 345–356. https://doi.org/10.1007/s10236-017-1031-x
- Полупанов П.В. 2007. Возникновение и существование апвеллинга у северо-восточного побережья о. Сахалин. *Труды СахНИРО*, т. 9: 257–263.
- 47. Жабин И.А., Дмитриева Е.В. 2016. Сезонная и межгодовая изменчивость ветрового апвеллинга у восточного побережья о-ва Сахалин по данным скаттерометра SeaWinds спутника QuikSCAT. Исследование Земли из космоса, 1-2: 105–115. doi:10.7868/S0205961416010152; EDN: VTOVNB
- Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Соловьев В.М., Горнов П.Ю., Шибаев С.В. 2013.
   Зона сочленения Евразийской, Охотоморской и Амурской плит по геофизическим данным. В кн.: 50 лет сейсмологического мониторинга Сибири: Тез. докл. Всерос. конф. с междунар. участием, 21–25 окт. 2013 г. Новосибирск: ИНГГ, с. 218–221.
- 49. Родников А.Г., Забаринская Л.П., Пийп В.Б., Рашидов В.А., Сергеева Н.А., Филатова Н.И. **2005.** Геотраверс региона Охотского моря. *Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле*, 5: 45–58. EDN: HRSVKV
- 50. Сим Л.А., Каменев П.А., Богомолов Л.М. 2020. Новые данные о новейшем напряженном состоянии земной коры острова Сахалин (по структурно-геоморфологическим индикаторам тектонических напряжений). *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 372–383. https://doi.org/10.30730/ gtrz.2020.4.4.372-383
- 51. Николаевский В.Н., Рамазанов Т.К. **1986.** Генерация и распространение волн вдоль глубинных разломов. Известия АН СССР. *Физика Земли*, 10: 3–13.
- 52. Лучин В.А. **1987.** Циркуляция вод Охотского моря и особенности ее внутригодовой изменчивости по результатам диагностических расчетов. *Труды ДВНИГМИ*, 36: 3–13. EDN: VPXBBX
- 53. Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С., Обжиров А.И. **2016.** Распределение гелия и водорода в отложениях и воде на склоне о. Сахалин. *Литология и полезные ископаемые*, 1: 68–81.

- 54. Воейкова В.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. 2007. Неотектоника и активные разрывы Сахалина. М.: Наука, 186 с.
- Ballentine C.J., Burgess R., Marty B. 2002. Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 47: 539–614. https://doi.org/10.2138/rmg.2002.47.13
- Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г., Прасолов Э.М., Каменский И.Л. 1996. Источники вещества в продуктах грязевого вулканизма (по изотопным, гидрохимическим и геологическим данным). Литология и полезные ископаемые, 6: 625–647.
- 57. Snyder G.T., Sano Y., Takahata N., Matsumoto R., Kakizaki Y., Tomaru H. **2020.** Magmatic fluids play a role in the development of active gas chimneys and massive gas hydrates in the Japan Sea. *Chemical Geology*, 535: 119462. https://doi.org/10.1016/j. chemgeo.2020.119462
- 58. Тищенко П.П. 2022. Первичная продукция фитопланктона на северо-восточном шельфе острова Сахалин в летний период. Морской биологический журнал, 7(4): 81–97. doi:10.21072/mbj.2022.07.4.07
- Charlou J.L., Donval J.P., Fouquet Y., Jean-Baptiste P., Holm N. 2002. Geochemistry of high H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36°14′ N, MAR). *Chemical Geol*ogy, 191(4): 345–359. https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00134-1
- 60. Chen J., Liu Yi-F., Zhou L., Irfan M., Hou Z-W., Li W., Mbadinga S.M., Liu J.-F. Yang Shi-Zh., Wu X.L., Gu Ji-D., Mu Bo-Zh. 2020. Long-chain n-alkane biodegradation coupling to methane production in an enriched culture from production water of a high-temperature oil reservoir. *AMB Express*, 10(63): 1–11. https://doi.org/10.1186/s13568-020-00998-5
- Duan Z., Mao S. 2006. Thermodynamic model for calculating methane solubility, density and gas phase composition of methane-bearing aqueous fluids from 273 to 523 K and from 1 to 2000 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(13): 3369–3386. https://doi. org/10.1016/j.gca.2006.03.018
- Grabowska J., Blazquez S., Sanz E., Zerón I., Algaba J., Míguez J., Blas F., Vega C. 2022. Solubility of methane in water: Some useful results for hydrate nucleation. *The Journal of Physical Chemistry B*, 126(42): 8553–8570. https://doi.org/10.1021/acs. jpcb.2c04867
- Kholmogorov A., Syrbu N., Shakirov R. 2022. Influence of hydrological factors on the distribution of methane fields in the water column of the Bransfield Strait: Cruise 87 of the R/V «Academik Mstislav Keldysh», 7 December 2021 – 5 April 2022. *Water*, 14(20): 3311. https://doi.org/10.3390/w14203311

- 64. Shakirov R.B., Obzhirov A.I., Biebow N., Salyuk A.N., Tsunogai U., Terekhova V.E., Shoji H. **2005**. Classification of anomalous methane fields in the Okhotsk Sea. *Polar Meteorology and Glaciology*, 19: 50–66.
- Obzhirov A.I., Shakirov R., Salyuk A., Suess E., Biebow N., Salomatin A. 2004. Relations between methane venting, geological structure and seismo-tectonics in the Okhotsk Sea. *Geo-Marine Letters*, 24: 135–139. https://doi.org/10.1007/s00367-004-0175-0
- Yoshida O., Yoshikawa-Inoue H., Watanabe S., Noriki S., Wakatsuchi M. 2004. Methane in the western part of the Sea of Okhotsk in 1998–2000. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109: C09S12, Article B09204. https://doi.org/10.1029/2003JC001910

#### References

- Talwani M., Eldholm O. 1973. Boundary between continental and oceanic crust at the margin of rifted continents. *Nature*, 241: 325–330. https://doi. org/10.1038/241325a0
- Moore J.C., Vrolijk P. 1992. Fluids in accretionary prisms. *Reviews of Geophysics*, 30: 113–135. https://doi. org/10.1029/92rg00201
- Kazanin G.S., Barabanova Yu.B., Kirillova-Pokrovskaya T.A., Chernikov S.F., Pavlov S.P., Ivanov G.I. 2017. Continental margin of the East Siberian Sea: geological structure and hydrocarbon potential. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*, 10: 51–55.
- Khain V., Polyakova I. 2008. Oil and gas potential of continental margins of the Pacific Ocean. *Lithology and Mineral Resources*, 43: 81–92. https://doi.org/10.1134/ S0024490208010082
- Konyukhov A.I. 2009. Continental margins: Global belts of oil and gas accumulation. *Lithology and Mineral Resources*, 44: 513–530. https://doi.org/10.1134/ S0024490209060017
- Oliver J., Isacks B.L., Barazangi M. **1974.** Seismicity at continental margins. In: Burk C.A., Drake C.L. (eds) *The geology of continental margins*. Berlin, Heidelberg, Springer, p. 85–92. https://doi.org/10.1007/978-3-662-01141-6\_7
- Orange D.L., Greene H.G., Reed D., Martin J.B., McHugh C.M, Ryan W., Maher N, Stakes D., Barry J. 1999. Widespread fluid expulsion on a translational continental margin: Mud volcanoes, fault zones, headless canyons, and organic-rich substrate in Monterey Bay, California. *Geological Society of America Bulletin*, 111(7): 992–1009. https://doi. org/10.1130/0016-7606(1999)111<0992:wfeoat> 2.3.co;2

- Reeburgh W.S. 2007. Oceanic methane biogeochemistry. *Chemical Reviews*, 107: 486–513. https://doi. org/10.1021/cr050362v
- Römer M., Sahling H., Pape T., Bohrmann G., Spieβ V. 2012. Quantification of gas bubble emissions from submarine hydrocarbon seeps at the Makran continental margin (offshore Pakistan). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C10): C10015. https://doi. org/10.1029/2011jc007424
- Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson O. 2010. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science*, 327: 1246–1250. https://doi. org/10.1126/science.1182221
- Weber T., Wiseman N.A., Kock A. 2019. Global ocean methane emissions dominated by shallow coastal waters. *Nature Communication*, 10: 4584. https://doi. org/10.1038/s41467-019-12541-7
- Obzhirov A.I., Il'ichev V.I., Kulinich R.G. 1985. Natural gas anomaly in bottom waters of South China Sea. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 281(5): 1206–1209. (In Russ.).
- 13. Kulinich R.G., Obzhirov A.I. **1985.** On the structure and current activity of the junction zone of the Sunda shelf and the South China Sea basin. *Geology of the Pacific Ocean*, 3: 102–106. (In Russ.).
- Abrams M. 1992. Geophysical and geochemical evidence for subsurface hydrocarbon leakage in the Bering Sea, Alaska. *Marine and Petroleum Geol*ogy, 9(2): 208–221. https://doi.org/10.1016/0264-8172(92)90092-s
- Hovland M., Croker P.F., Martin M. 1994. Fault associated seabed mounds (carbonate knolls?) off western Ireland and north-west Australia. *Marine and Petroleum Geology*, 11(2): 232–246. https://doi.org/10.1016/0264-8172(94)90099-x
- Rozhdestvenskiy V.S. 1976. [Shear displacements along the Tym-Poronai fault zone on Sakhalin Island]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 230(3): 678–780. (In Russ.).
- Khanchuk A.I. 1993. [The geological structure and development of the continental margin of the Northwest Pacific Ocean]: extended abstract of the thesis of Dr. of Geology and Mineralogy. Moscow, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences. (In Russ.).
- Chekhovich V.D. (ed.) 1993. [Tectonics and geodynamics of folded framing of small oceanic basins]. Moscow: Nauka, 271 p.
- 19. Isozaki Y. **1996.** Anatomy and genesis of a subduction-related orogen: A new view on the geotectonic subdivision and evolution of the Japanese

Islands. *The Island Arc*, 5: 289–320. https://doi. org/10.1111/j.1440-1738.1996.tb00033.x

- Maruyama S., Isozaki Y., Kimura G., Terabayashi M. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *The Island Arc*, 6: 121–142. https://doi. org/10.1111/j.1440-1738.1997.tb00043.x
- Grannik V.M. 2005. Correlation of structural units of Sakhalin and Hokkaido. *Doklady Earth Sciences*, 401(2): 177–181.
- 22. Grannik V.M. **2013.** The East-Sakhalin island arc system of the Okhotsk Sea region. *Lithosphere (Russia)*, 1: 36–51. (In Russ.).
- Zharov A.E. 2005. South Sakhalin tectonics and geodynamics: A model for the Cretaceous-Paleogene accretion of the East Asian continental margin. *Russian Journal of Earth Sciences*, 7: ES5002. https://doi. org/10.2205/2005ES000190
- 24. Syrbu N., Kholmogorov A., Stepochkin I., Lobanov V., Shkorba S. 2024. Formation of abnormal gas-geochemical fields and dissolved gases transport at the shallow northeastern shelf of Sakhalin Island in warm season: Expedition data and remote sensing. *Water*, 16: 1434. https://doi.org/10.3390/w16101434
- 25. Kharakhinov V.V. **2010.** [*Oil-and-gas geology of the Sakhalin region*]. Moscow: Nauchnyy mir, 276 p. (In Russ.).
- Vereshchagina O.F., Korovitskaya E.V., Mishukova G.I. 2013. Methane in water columns and sediments of the north western Sea of Japan. *Deep-Sea Research II: Topical Studies in Oceanography*, 86–87: 25–33. htt-ps://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.08.017
- Yamamoto S., Alcauskas J.B., Crozier T.E. 1976. Solubility of methane in distilled water and seawater. J. of Chemical & Engineering Data, 21(1): 78–80. https:// doi.org/10.1021/je60068a029
- Wiessenburg D.A., Guinasso N.L. 1979. Equilibrium solubility of methane, carbon dioxide, and hydrogen in water and sea water. J. of Chemical & Engineering Data, 24(4): 356–360. https://doi.org/10.1021/ je60083a006
- 29. Leonov A.K. **1960.** [*Regional oceanography*]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 165 p. (In Russ.).
- Vlasova G.A., Glebova S.Yu. 2008. Seasonal variability of surface currents in the Okhotsk Sea under influence of atmospheric processes. *Izv. TINRO*, 154: 259–269.
- Vlasova G.A., Vasiliev A.S., Shevchenko G.V. 2008. [Spatial and temporal variability of the water structure and dynamics of the Sea of Okhotsk]. Moscow: Nauka, 359 p. (In Russ.).
- 32. Luchin V.A. **1998.** Non-periodic currents. In: *Hydro*meteorology and hydrochemistry of the seas. Vol. 9:

*The Sea of Okhotsk*, vol. 1: *Hydrometeorological conditions*. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, p. 233–256. (In Russ.).

- 33. Ohshima K.I., Wakatsuchi M., Fukamachi Y., Mizuta G. 2002. Near-surface circulation and tidal currents of the Okhotsk Sea observed with satellite-tracked drifters. J. of Geophysical Research: Oceans, 107: 11. https://doi.org/10.1029/2001jc001005
- Talley L.D. 1991. An Okhotsk Sea water anomaly: Implications for ventilation in the North Pacific. *Deep-Sea Research A. Oceanographic Research Papers*, 38(S1): S171–S190. https://doi.org/10.1016/s0198-0149(12)80009-4
- Simizu D., Ohshima K.I. 2002. Barotropic response of the Sea of Okhotsk to wind forcing. *Journal of Oceanography*, 58(6): 851–860.
- Shimada Y., Kubokawa A., Ohshima K.I. 2005. Influence of current width variation on the annual mean transport of the East Sakhalin Current: A simple model. *Journal of Oceanography*, 61: 913–920. https://doi.org/10.1007/s10872-006-0009-y
- Simizu D., Ohshima K.I. 2006. A model simulation on the circulation in the Sea of Okhotsk and the East Sakhalin Current. J. of Geophysical Research: Oceans, 111: 05016. https://doi.org/10.1029/2005jc002980
- Ohshima K.I., Simizu D. 2008. Particle tracking experiments on a model of the Okhotsk Sea: Toward oil spill simulation. *Journal of Oceanography*, 64: 103–114. https://doi.org/10.1007/s10872-008-0008-2
- Ebuchi N. 2006. Seasonal and interannual variations in the East Sakhalin Current revealed by the TOPEX/ POSEIDON altimeter data. *Journal of Oceanography*, 62: 171–183. https://doi.org/10.1007/s10872-006-0042-x
- 40. Fayman P.A. **2018.** *Atlas of the Sea of Okhotsk.* Vladivostok: Dal'nevost. Regional. Nauch.-Issled. Gidrometeorologicheskiy Inst. (DVNIGMI), 133 p.
- Fayman P.A., Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. 2021. Simulated pathways of the northwestern pacific water in the Okhotsk Sea. *Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, 57: 329–340. https://doi.org/10.1134/ s000143382103004x
- 42. Rybalko S.I., Shevchenko G.V. **2003.** Seasonal and spatial variability of sea currents on the Sakhalin northeastern shelf. *Pacific Oceanography*, 1(2): 168–178.
- 43. Pishchal'nik V.M., Arkhipkin V.S., Leonov A.V. 2014. Reconstruction of the annual variations of thermohaline characteristics and water circulation on the northeastern Sakhalin shelf. *Water Resources*, 41(4): 385–395. https://doi.org/10.1134/s0097807814040113

- 44. Fayman P., Prants S., Budyansky M., Uleysky M. 2020. New circulation features in the Okhotsk Sea from a numerical model. *Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, 56: 618–631. https://doi.org/10.1134/ s0001433820060043
- Prants S., Andreev A., Budyansky M., Uleysky M. 2017. Mesoscale circulation along the Sakhalin Island eastern coast. *Ocean Dynamics*, 67: 345–356. https:// doi.org/10.1007/s10236-017-1031-x
- Polupanov P.V. 2007. Upwelling along the northeastern coast of Sakhalin Island: origination and existence. In: Water life biology, resources status and condition of inhabitation in Sakhalin-Kuril region and adjoining water areas. Yuzhno-Sakhalinsk: SakhNIRO, p. 257–263. (Transactions of the Sakhalin Research Institute of Fisheries and Oceanography; vol. 9).
- 47. Zhabin I.A., Dmitrieva E.V. 2021. Seasonal and interannual variability of wind-driven upwelling near the east coast of Sakhalin Island based on Quikscat/Seawinds scatterometer data. *Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, 57(12): 1680–1689. https://doi.org/10.1134/ s000143382112029x
- Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Timofeev A.V., Soloviev V.M., Gornov P.Yu., Shibaev S.V. 2013. [The zone of junction of the Eurasian, Okhotsk and Amur plates according to geophysical data]. In: [50 years of seismological monitoring of Siberia]: Abstracts. All-Russian conf. with international participation, October 21–25, 2013. Novosibirsk: INGG, p. 218–221.
- Rodnikov A.G., Zabarinskaya L.P., Piip V.B., Rashidov V.A., Sergeyeva N.A., Filatova N.I. 2005. The Okhotsk Sea geotraverse. Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Earth Sciences Bulletin of KRAESC, 5: 45–58. (In Russ.).
- 50. Sim L.A., Kamenev P.A., Bogomolov L.M. 2020. New data on the latest stress state of the earth's crust on Sakhalin Island (based on structural and geomorphological indicators of tectonic stress). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 372–383. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi. org/10.30730/gtrz.2020.4.4.372-383
- Nikolayevsky V.N., Ramazanov T.K. 1986. Generation and propagation of waves along deep faults. *Izvestia AN* SSSR, Fizika Zemli, 10: 3–13. (In Russ.).
- Luchin V.A. 1987. [Water circulation in the Sea of Okhotsk and patterns of its intra-annual variations as inferred from the results of diagnostic calculations]. *Trudy Dal'nevost. Nauch.-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 36: 3–13. EDN: VPXBBX
- 53. Shakirov R.B., Syrbu N.S., Obzhirov A.I. **2016.** Distribution of helium and hydrogen in sediments and water on the Sakhalin slope. *Lithology and Mineral*

*Resources*, 51(1): 61–73. https://doi.org/10.1134/ s0024490216010065

- Voeikova V.A., Nesmeyanov S.A., Serebryakova L.I.
  **2007.** [Sakhalin neotectonics and active faults]. M.: Nauka, 186 p.
- Ballentine C.J., Burgess R., Marty B. 2002. Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 47: 539–614. https:// doi.org/10.2138/rmg.2002.47.13
- Lavrushin V.Yu., Polyak B.G., Prasolov E.M., Kamensky I.L. 1996. Sources of material in mud volcano products (based on isotopic, hydrochemical, and geological data). *Lithology and Mineral Resources*, 31: 557–578.
- 57. Snyder G.T., Sano Y., Takahata N., Matsumoto R., Kakizaki Y., Tomaru H. 2020. Magmatic fluids play a role in the development of active gas chimneys and massive gas hydrates in the Japan Sea. *Chemical Geology*, 535: 119462. https://doi.org/10.1016/j. chemgeo.2020.119462
- Tishchenko P.P. 2022. Phytoplankton primary production on the northeastern Sakhalin Island shelf in summer. *Marine Biological Journal*, 7(4): 81–97. doi:10.21072/ mbj.2022.07.4.07
- Charlou J.L., Donval J.P., Fouquet Y., Jean-Baptiste P., Holm N. 2002. Geochemistry of high H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36°14′ N, MAR). *Chemical Geol*ogy, 191(4): 345–359. https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00134-1
- Chen J., Liu Yi-F., Zhou L., Irfan M., Hou Z-W., Li W., Mbadinga S.M., Liu J.-F. Yang Shi-Zh., Wu X.L., Gu Ji-D., Mu Bo-Zh. **2020.** Long-chain n-alkane biodegradation coupling to methane production in an enriched culture from production water of a high-temperature oil reservoir. *AMB Express*, 10(63): 1–11. https://doi. org/10.1186/s13568-020-00998-5
- Duan Z., Mao S. 2006. Thermodynamic model for calculating methane solubility, density and gas phase composition of methane-bearing aqueous fluids from 273 to 523 K and from 1 to 2000 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(13): 3369–3386. https://doi. org/10.1016/j.gca.2006.03.018
- Grabowska J., Blazquez S., Sanz E., Zerón I., Algaba J., Míguez J., Blas F., Vega C. 2022. Solubility of methane in water: Some useful results for hydrate nucleation. *The Journal of Physical Chemistry B*, 126(42): 8553– 8570. https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.2c04867
- 63. Kholmogorov A., Syrbu N., Shakirov R. 2022. Influence of hydrological factors on the distribution of methane fields in the water column of the Bransfield Strait: Cruise 87 of the R/V «Academik Mstislav

Keldysh», 7 December 2021 – 5 April 2022. *Water*, 14(20): 3311. https://doi.org/10.3390/w14203311

- Shakirov R.B., Obzhirov A.I., Biebow N., Salyuk A.N., Tsunogai U., Terekhova V.E., Shoji H. 2005. Classification of anomalous methane fields in the Okhotsk Sea. *Polar Meteorology and Glaciology*, 19: 50–66.
- 65. Obzhirov A.I., Shakirov R., Salyuk A., Suess E., Biebow N., Salomatin A. 2004. Relations between meth-

#### Об авторах

Сотрудники Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия:

Холмогоров Андрей Олегович (https://orcid.org/0000-0002-6259-1614), кандидат географических наук, младший научный сотрудник лаборатории комплексных исследований окружающей среды и минеральных ресурсов, kholmogorov.ao@poi.dvo.ru

Сырбу Надежда Сергеевна (https://orcid.org/0000-0002-1441-6133), кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией комплексных исследований окружающей среды и минеральных ресурсов, syrbu@poi.dvo.ru

**Лобанов Вячеслав Борисович** (https://orcid.org/0000-0001-9104-5578), кандидат географических наук, заведующий лабораторией физической океанологии, lobanov@poi.dvo.ru

Жердев Павел Дмитриевич (https://orcid.org/0009-0008-5739-7543), старший инженер лаборатории газогеохимии, zherdev.pd@poi.dvo.ru

Мальцева Елена Валерьевна (https://orcid.org/0000-0003-3230-7042), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории газогеохимии, ekor@poi.dvo.ru

Поступила 26.02.2025 Принята к публикации 21.03.2025 Опубликована online 18.04.2025 ane venting, geological structure and seismo-tectonics in the Okhotsk Sea. *Geo-Marine Letters*, 24: 135–139. https://doi.org/10.1007/s00367-004-0175-0

66. Yoshida O., Yoshikawa-Inoue H., Watanabe S., Noriki S., Wakatsuchi M. 2004. Methane in the western part of the Sea of Okhotsk in 1998–2000. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109: C09S12, Article B09204. https://doi.org/10.1029/2003JC001910

#### About the Authors

Employees of the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia:

**Kholmogorov, Andrey O.** (https://orcid.org/ 0000-0002-6259-1614), Cand. Sci. (Geography), Junior Researcher of the Laboratory of integrated research of environment and mineral resources, kholmogorov.ao@poi.dvo.ru

**Syrbu, Nadezhda S.** (https://orcid.org/0000-0002-1441-6133), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Head of the Laboratory of integrated research of environment and mineral resources, syrbu@poi.dvo.ru

**Lobanov, Vyacheslav B.** (https://orcid.org/0000-0001-9104-5578), Cand. Sci. (Geography), Head of the Laboratory of physical oceanology, lobanov@poi.dvo.ru

Zherdev, Pavel D. (https://orcid.org/0009-0008-5739-7543), Senior Engineer of the Laboratory of gas geochemistry, zherdev.pd@poi.dvo.ru

Maltseva, Elena V. (https://orcid.org/0000-0003-3230-7042), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher of the Laboratory of gas geochemistry, ekor@poi.dvo.ru

> Received 26 February 2025 Accepted 21 March 2025 Published online 18.04.2025

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

УДК 550.34;(571.61/.64)



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

https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.2.182-196 https://www.elibrary.ru/xzupuo

## Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2024 году

Д. А. Сафонов<sup>@1</sup>, Е. П. Семенова<sup>2</sup>, Д. В. Костылев<sup>1,2</sup>, М. А. Щукин<sup>2</sup>

<sup>@</sup>E-mail: d.safonov@imgg.ru

<sup>1</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

<sup>2</sup> Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия

**Резюме.** Работа продолжает цикл ежегодных кратких обзоров сейсмичности южной части Дальнего Востока России, основанный на данных каталога регионального информационно-обрабатывающего центра «Южно-Сахалинск» Сахалинского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН». Приведены основные параметры сейсмичности изучаемой территории в 2024 г.: карты эпицентров землетрясений и их максимальных макросейсмических проявлений, статистическая оценка уровня сейсмичности СОУС'09, графики Беньофа, карты плотности условной упругой деформации. Дана информация об отдельных наиболее значимых и интересных для детального изучения землетрясениях. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2024 г. остается умеренной, в пределах фонового уровня. При этом отмечается пониженный уровень коровой и верхнемантийной сейсмичности ( $h \le 70$  км). Почти все сильные землетрясения 2024 г. произошли в интервале глубоких землетрясений (h > 70 км). Наиболее сильное землетрясение с Mw = 6.8 произошло в средней части Курильской островной дуги на глубине h = 182 км.

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

## Seismicity of the south of the Russian Far East in 2024

Dmitry A. Safonov<sup>@1</sup>, Elena P. Semenova<sup>2</sup>, Dmitry V. Kostylev<sup>1,2</sup>, Michail A. Shchukin<sup>2</sup>

@E-mail: d.safonov@imgg.ru

<sup>1</sup>Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

<sup>2</sup> Sakhalin Branch of the FRC "Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences",

Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

**Abstract.** The paper continues the series of annual brief reviews of the seismicity in the southern part of the Russian Far East, based on the data from the catalog of the "Yuzhno-Sakhalinsk" Regional Information Processing Center of the Sakhalin Branch of the Federal Research Center "Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences". The main parameters of the seismicity of the studied area in 2024 are given: maps of earthquake epicenters and their maximum macroseismic effects, statistical estimate of the seismicity level SESL'09, Benioff graphs, and density maps of nominal elastic deformation. The information on some of the most significant and interesting for detailed study earthquakes is given. Seismicity of the south of the Russian Far East remains moderate in 2024, within the background level. At the same time, there is a reduced level of crustal and upper mantle seismicity ( $h \le 70$  km). Almost all major earthquakes in 2024 occurred in the interval of deep earthquakes (h > 70 km). The strongest earthquake with Mw = 6.8 occurred in the middle part of the Kuril Island arc at the depth of h = 182 km.

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

Для цитирования: Сафонов Д.А., Семенова Е.П., Костылев Д.В., Щукин М.А. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2024 году. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 2, с. 182–196. https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.2.182-196; https://www.elibrary.ru/xzupuo

*For citation:* 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, vol. 9, No. 2, pp. 182–196. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.2.182-196; https:// www.elibrary.ru/xzupuo

#### Финансирование

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/).

#### Введение

Статья продолжает серию ежегодных кратких обзоров [1] 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 1-3) 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.

Цель работы – оценить сейсмичность южной части Дальнего Востока РФ за истекший календарный год по предварительным данным, полученным в оперативном режиме. Основной акцент в статье сделан на наиболее сильных по магнитуде и макросейсмическому эффекту землетрясениях, детальные данные по которым станут доступны после окончательной обработки в течение 2025 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.

#### Funding

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 with large-scale research facilities «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/).

#### Исходные данные

К концу 2024 г. сеть сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН (международный код сети – SAGSR\*) состояла из 42 пунктов непрерывных наблюдений, 31 из которых – стационарные, 8 – автономные полевые локальной сети на юге о. Сахалин остальные – инженерно-сейсмологические пункты наблюдений на Курилах. Из стационарных наблюдательных пунктов 18 – с обслуживающим персоналом и 13 – автоматических, с передачей данных в режиме реального времени на серверы сбора опорных станций.

По сравнению с концом 2023 г. [1] сеть уменьшилась еще на четыре пункта наблюдений. Всего в 2023–2024 гг. в связи с отсутствием технических средств для восстановления работоспособности либо труднодоступностью был закрыт и удален из реестра сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН ряд пунктов сейсмических наблюдений: «Вал» (VAL), «Невельск» (NEV), «Новиково» (NOV), «Новоалександровск» (NVA), «Краснополье» (UGL2) на о-ве Сахалин и «Рейдово» (REID), «Головнино» (YUK2) и «Плато» (SK2) на южных Курильских островах.

Сейсмический мониторинг на территории Приамурья проводится преимущественно сейсмостанциями «Зейского узла»: «Зея» (ZEA), «Бомнак» (BMKR), «Кировский» (KROS) и «Октябрьский» (ОСТВ) (рис. 1). Для расширения регистрационных возможностей сети в этом районе в 2024 г., по соглашению с Якутским филиалом ФИЦ ЕГС РАН, к обра-

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

ботке привлечены данные станций «Чульман» (CLNS) и «Тында» (TNDR). Их использование позволяет повысить точность определения положения эпицентров землетрясений в зоне Зейского приводохранилищного района. Помимо этих станций в системе сбора данных присутствуют другие станций ФИЦ ЕГС РАН и ДВО РАН на территории Дальневосточного федерального округа, а также семь станций, расположенных в префектуре Хоккайдо (Япония). Дополнительно для задач оперативной обработки и повышения надежности оценок параметров землетрясений организована буферизация потоков данных со станций глобальной сейсмографической сети объединения научно-исследовательских институтов по сейсмологии GSN-IRIS, а также сети организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (СТВТО).

В течение 2024 г. продолжался детальный сейсмический мониторинг в районе Солнцевского угольного разреза (Сахалинская область, Углегорский район) [2]. Несмотря на то что в 2023 г. была остановлена регистрация сейсмических сигналов станцией «Краснополье» (UGL2), конфигурация сети мониторинга, включающая в себя три станции, в целом была сохранена. Для этого в селе Поречье (Углегорский район) был установлен экспериментальный пункт сейсмического мониторинга UGL4 на базе короткопериодного сейсмометра СПВ-3к.



Рис. 1. Оценка регистрационных возможностей сети сбора сейсмологических данных СФ ФИЦ ЕГС РАН в зоне ответственности [3]. 1, 2 – сейсмические станции Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН: широкополосные (1), короткопериодные или сильных движений (2); 3 – широкополосные сейсмические станции ФИЦ ЕГС РАН: или ДВО РАН; 4 – станции Хоккайдского университета (г. Саппоро); 5 – станции Аварийно-спасательного центра мониторинга и прогноза (чрезвычайных ситуаций) Главного управления МЧС РФ; 6 – станции мониторинга района Солнцевского угольного разреза; 7 – границы регионов.

**Fig. 1.** Evaluation of the registration capabilities of the seismological data collection network of the SB FRC GS RAS in the area of responsibility [3]. 1, 2 indicate seismic stations of the Sakhalin Branch of the FRC GS RAS: broadband stations (1), short-period or strong motion stations (2); 3, broadband seismic stations of the FRC GS RAS or FEB RAS; 4, stations of the Hokkaido University (Sapporo); 5, stations of the Emergency Rescue Center for Monitoring and Forecasting of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation; 6, monitoring stations of the Solntsevsky coal mine area; 7, region borders.

Результаты оценки регистрационных возможностей сейсмологической сети в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН и прилегающей территории с учетом локальных особенностей затухания волн и уровня сейсмических шумов на станциях [3], а также расположение сейсмических станций, включенных в 2024 г. в систему сбора, приведены на рис. 1.

Текущая конфигурация сети сейсмических станций с привлечением в оперативном режиме данных станций соседних регионов позволяет обеспечить на большей части зоны ответственности возможность регистрации как минимум тремя сейсмостанциями землетрясений начиная с представительной магнитуды  $M_{\rm min} = 4.0$ . Вблизи Южных и Северных Курильских островов, на территории Сахалинского региона, юга Приморского края, а также в зоне Зейского приводохранилищного района благодаря более плотной сети сейсмостанций порог уверенной регистрации составляет  $M_{\min} = 3.0.$ 

Наиболее массовой энергетической характеристикой землетрясений каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» является региональная магнитуда  $M_L$  [4], она определена для всех землетрясений. Для большинства коровых землетрясений Приамурья, Приморья и Сахалинского региона есть определения энергетического класса Т.Г. Раутиан  $K_p$  [5]. Для отдельных сильных и умеренно-сильных землетрясений (50 событий) был определен механизм очага [6, 7] и получена моментная магнитуда  $M_{Wner}$ .

Как и в работе прошлого года [1], для расчета сейсмической энергии по формуле Гуттенберга–Рихтера (Lg  $E = 4.8 + 1.5 M_s$ , Дж [8]) осуществлялся переход к основной расчетной магнитуде M, соответствующей магнитуде по поверхностной волне  $M_{\rm LH}$  (ана-



**Рис. 2.** Карта эпицентров землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2024 г. *М* – магнитуда; *h* – глубина гипоцентра, км; 1, 2 – сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН: 1 – действующие, 2 – не действующие в 2024 г.; 3 – границы регионов. Номера эпицентров землетрясений согласно таблице. Приведены механизмы очагов наиболее сильных землетрясений.

**Fig. 2.** Map of earthquake epicenters in the SB FRC GS RAS area of responsibility in 2024. M, magnitude; h, hypocenter depth, km; 1 and 2, seismic stations of the SB FRC GS RAS: operational (1), non-operational in 2024 (2); 3, region borders. Numbers of earthquake epicenters are given in accordance with Table. Focal mechanisms of the strongest earthquakes are given.

лог  $M_{\rm s}$ ). Для коровых землетрясений Приамурья, Приморья и Сахалина использовалась формула Т.Г. Раутиан для энергетического класса  $K_{\rm p}$  [5]:

$$M = (K_{\rm p} - 4)/1.8$$

Для Курило-Охотского региона и всех глубокофокусных землетрясений использована двухсегментная зависимость между  $M_{\rm LH}$  и  $M_{\rm w}$  [9]:

$$4.0 \le M_{\rm W} \le 6.1$$
:  $M = 1.42 M_{\rm W} - 2.43$ ;  
 $6.2 \le M_{\rm W} \le 8.1$ :  $M = 0.96 M_{\rm W} + 0.37$ .

В случае отсутствия моментной магнитуды использована формула для  $M_{_{\rm I}}$  [4]:

$$M = 1.15 M_{\rm T} - 1.19.$$

Для унификации по магнитуде более ранних, окончательных версий каталогов СФ ФИЦ ЕГС РАН за период 1981–2022 гг. использованы соотношения из работы [10]. Принятый для рассмотрения оперативный каталог землетрясений на основе базы данных РИОЦ «Южно-Сахалинск» был ограничен снизу по магнитуде  $M_L$ =2.2 ( $K_p$  = 8). Из рабочего каталога исключены все сейсмические события, полученные по данным менее трех сейсмических станций, а также отнесенные к взрывам (h = 0 км).

Таким образом, количество землетрясений, определенных в оперативном режиме с учетом упомянутых ограничений в 2024 г. составило 2929 сейсмических событий (рис. 2). Это 2677 землетрясений Курило-Охотского региона, 140 – Сахалинского региона (109 коровых и 31 глубокофокусных), 112 – Приамурья и Приморья (107 коровых и 5 глубокофокусных).

67 землетрясений с эпицентрами в пределах зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН имели ощутимые проявления на территории регионов, также здесь были отмечены проявления 6 землетрясений с эпицентрами за пределами изучаемой территории (рис. 3).



Рис. 3. Карта эпицентров ощутимых землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2024 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 2024. M, magnitude; I, maximum shaking intensity according to the Siberian Branch data, point. For other symbols see Fig. 2.

#### Основные характеристики сейсмичности

Базовой характеристикой сейсмичности является сейсмическая энергия  $\Sigma E$ , оцениваемая на основе магнитуды зарегистрированных землетрясений, как это показано выше.

Статистически обоснованное сравнение величины суммарной сейсмической энергии  $\Sigma E$  регионов в 2024 г. со значениями за предыдущие годы дают графики функции распределения годовой сейсмической энергии F по методике СОУС'09 [11] (рис. 4 и 5) согласно предложенной В.А. Салтыковым градации уровней сейсмичности:

- экстремально высокий  $F \ge 0.995$ ,
- 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.

Как и в предыдущих обзорах, были использованы региональные каталоги: Приамурья и Приморья за 1975–2022 гг., Сахалинского региона 1962–2022, Курило-Охотского региона 1920–2022 гг., опубликованные в [12–14], ежегодно публикуемые в [15] и дополненные данными РИОЦ «Южно-Сахалинск» за 2023– 2024 гг. Статистическая оценка сейсмической энергии коровых и мантийных землетрясений по Приамурью и Приморью, а также Сахалинскому региону проводилась отдельно. Каталоги этих регионов легко разделяются по глубине, так как события в них относятся к разным глубинным диапазонам: землетрясения верхнекоровые, на стыке и внутри Охотской, Амурской и Евразийской литосферных плит (h = 1-30 км), и землетрясения в пределах западной, наиболее глубоко погруженной части Тихоокеанской плиты (h = 250-640 км).

В данной работе Курило-Охотская часть каталога также была разделена на два фрагмента по параметру глубины h = 70 км: события, преимущественно относящиеся к зоне контакта Тихоокеанской и Охотской литосферных плит ( $h \le 70$  км), и события, происходящие внутри погруженной части Тихоокеанской плиты (h > 70 км). Возможно, такой подход в перспективе позволит более детально отследить сейсмическую активизацию в глубинных диапазонах, так как сейсмические активизации глубокофокусных внутриплитовых и неглубоких межплитовых событий, по мнению некоторых исследователей (например, [16]), могут быть взаимосвязаны.

В 2024 г. в регионе Приамурье и Приморье (рис. 4 а) уровень коровой сейсмичности оценивается как фоновый пониженный (F = 0.10).



**Рис. 4.** Эмпирическая функция распределения годовой сейсмической энергии для коровых (черный цвет линии) и мантийных (синий цвет) землетрясений региона Приамурье и Приморье (а) и Сахалинского региона (b). Отмечены точки, соответствующие каждому году периода 2020–2024 гг.

**Fig. 4.** Empirical distribution function of the annual seismic energy for crustal (black line) and mantle (blue line) earthquakes in the Amur–Primorye region (a) and Sakhalin region (b). The dots corresponding to each year of the period 2020–2024 are marked.

Значение функции распределения глубокофокусной сейсмичности F = 0.47 соответствует фоновому среднему уровню.

В Сахалинском регионе (рис. 4 b) уровень коровой сейсмичности 2024 г. также фоновый пониженный (F = 0.10), ниже, чем в прошлом году [1]. Глубокофокусная сейсмичность (F = 0.37) на фоновом среднем уровне.

В Курило-Охотском регионе в целом сейсмическая активность (F = 0.42) соответствует фоновому среднему уровню. Энергия неглубоких землетрясений ( $h \le 70$  км) находится у нижней границы фонового среднего уровня (F = 0.16), глубоких землетрясений (h > 70 км) – вблизи верхней границы фонового среднего уровня (F = 0.84) (рис. 5). При этом значение  $\Sigma E$  глубоких землетрясений в 2024 г. примерно на порядок превысило суммарную величину для неглубоких событий (обычно, как видно из рис. 5, ситуация обратная).

Отследить относительную величину сейсмических событий во времени и общий ход фоновой сейсмичности помогает график Беньофа. График построен для трех регионов в двух временных диапазонах: за 2024 г. и за период 1981–2024 гг. (рис. 6). При построе-



Рис. 5. Эмпирическая функция распределения годовой сейсмической энергии неглубоких  $h \le 70$  км (черная линия) и глубоких h > 70 км (синяя линия) землетрясений Курило-Охотского региона. Отмечены точки, соответствующие каждому году периода 2020–2024 гг.

**Fig. 5.** Empirical distribution function of the annual seismic energy of shallow  $h \le 70$  km (black line) and deep h > 70 km (blue line) earthquakes in the Kuril-Okhotsk region. The dots corresponding to each year of the period 2020–2024 are marked.

нии графиков за длительный период времени для Приамурья и Приморья и Сахалина (рис. 6 а, с, е) учитывались землетрясения магнитудой  $M \ge 3.5$  с эпицентрами в земной коре, для Курило-Охотского региона – с  $M \ge 4.0$  во всем диапазоне глубин. Годовые графики (рис. 6 b, d, f) строились для событий  $M_L \ge 2.2$  ( $K_p \ge 8$ ) с теми же ограничениями по глубине.

В регионе Приамурье и Приморье на протяжении 45 лет сейсмический процесс достаточно равномерен (рис. 6 а), хотя за последние три года наблюдается уменьшение наклона графика, что может быть связано как с ослаблением сейсмической активности, так и с ухудшающимися условиями регистрации событий. Выделяются ступенями два сильнейших региональных землетрясения этого периода – Приморское землетрясение 13 ноября 1990 г. с M = 6.2, h = 18 км с эпицентром в Татарском проливе и Сковородинское землетрясение 14 октября 2011 г. с M = 6.3, *h* = 16 км в Верхнем Приамурье [17]. В 2024 г. на графике (рис. 6 b) выделяется период с конца мая по начало июля, когда произошло несколько относительно слабых землетрясений, тем не менее в совокупности создающих ступень на общем низком фоне. Сильных событий в 2024 г. не отмечено.

В Сахалинском регионе на интервале 1981-2024 гг. (рис. 6 с) выделяются сильнейшие региональные события – Нефтегорское землетрясение 27 мая 1995 г. с M = 7.0, h = 18 км, Углегорское 4 августа 2000 г. с M = 7.0, h = 13 км и серия Невельских событий 2 августа 2007 г. с *M* = 6.1; 6.3 и *h* = 10 км. Последнее землетрясение, которое можно отнести к сильным ( $M \ge 5.5$ ), произошло вблизи с. Онор 14 августа 2016 г. с *M* = 5.8, *h* = 10 км [18]. Также наблюдалась сейсмическая активизация в 2022 г. в виде нескольких умеренно-сильных событий M = 4.9-5.3 в разных районах острова. В последние два года сейсмическая активность в коре региона довольно низкая, что отражается в малом наклоне графика. В 2024 г. (рис. 6 d) наибольшие ступени на графике Беньофа создают события 19 января с M = 4.5 и 28 августа с M = 4.2, сильными для региона они не являются.

В Курило-Охотском регионе (рис. 6 е) событиями регионального масштаба, создавшими значительную ступень на графике Беньофа в 1981–2024 гг., являются Шикотанское землетрясение 4 октября 1994 г. с M = 8.3 и h = 23 км, Симуширские события 15 октября 2006 г. с M = 8.0, h = 37 км и 13 января 2007 г. с M = 8.1, h = 45 км и глубокофокусное



**Рис. 6.** Графики Беньофа для зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН за 1981–2024 гг. и 2024 г.: для Приамурья и Приморья (a, b), Сахалинского региона (c, d), Курило-Охотского региона (e, f).

Fig. 6. Benioff graphs for the SB FRC GS RAS area of responsibility in 1981–2024 and 2024: the Amur–Primorye region (a, b); the Sakhalin region (c, d); the Kuril-Okhotsk region (e, f).

Охотоморское землетрясение 24 мая 2013 г. с M = 8.3, h = 630 км. Последняя сейсмическая активизация наблюдалась в 2020 г. в виде двух событий: 13 февраля с *M* = 6.9 [19] и 25 марта с *M* = 7.5, *h* = 60 км [20]. Из-за высокой сейсмической активности региона в целом даже эти два относительно сильных события создают небольшую ступень на графике. В спокойные периоды, как, например, в 2021-2024 гг., наклон графика Беньофа к Курило-Охотском регионе остается стабильным. В 2024 г. (рис. 6 f) все сильные ( $M \ge 6.0$ ) землетрясения в регионе произошли во второй половине года, наиболее выделяются глубокие события 10 августа с M = 6.5, h = 428 км и 27 декабря с M = 6.9, h = 182 км.

Для демонстрации распределения сейсмичности по площади территории помимо карт эпицентров (рис. 1, 2) построена карта величины плотности условной упругой деформации  $\Sigma E^{1/2}$  в единицу времени (1 год) (рис. 7). Методика построения повторяет примененную ранее [1].

В 2024 г. (рис. 7) максимальное значение параметра плотности условной упругой деформации  $e = 5 \cdot 10^7 \text{ Дж}^{1/2}/\text{год}$  на 1000 км<sup>2</sup> соответствует положению эпицентра силь-

нейшего в этом году регионального события 27 декабря с M = 6.9. Большинство значимых землетрясений (отмечены цифрами на рис. 7 в соответствии с таблицей) также выделяются на общем фоне. Наиболее сейсмически активная область, протянувшаяся между островной дугой и глубоководным желобом и связанная с зоной контакта плит, в 2024 г. заметно менее активна, чем в среднем за период с 1981 г. [1]. Положение других участков активной сейсмогенерации в 2024 г. совпадает с концентрацией повышенных значений е в предыдущие годы, которые находятся вдоль крупнейших региональных разломов меридиональной ориентации на Сахалине, широтной и диагональной ЮЗ-СВ ориентации в Приамурье и Приморье.

## Обзор сильных землетрясений 2024 года

В *Приамурье и Приморье* в 2024 г. зарегистрировано 107 коровых и 5 глубокофокусных землетрясений с  $M_L \ge 2.2$ . Основная часть коровых землетрясений сосредоточена в северной части региона вдоль Монголо-Охотского линеамента и в южной части Становой



Рис. 7. Плотность условной упругой деформации зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН по данным каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» 2024 г. Показано положение наиболее значимых региональных землетрясений согласно таблице. Штриховой линией отмечена граница зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН, точками – положение Курильского глубоководного желоба и Курильской глубоководной котловины.

**Fig. 7.** Density of nominal elastic deformation for the SB FRC GS RAS area of responsibility according to the data of the "Yuzhno-Sakhalinsk" RIPC earthquake catalog in 2024. 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.

системы разломов, что объясняется большей сейсмичностью этой территории.

Однако наиболее сильное по магнитуде и единственное ощутимое региональное событие в 2024 г. произошло в южной части Приамурья на территории Еврейской автономной области 18 июня в 18:46 UTC ( $K_p = 11.4$ ,  $M_L = 4.5$ , h = 11 км; № 1) (здесь и далее номер события приводится в соответствии с приведенной ниже таблицей). Событие вызвало сотрясения интенсивностью до 3–4 баллов в г. Биробиджан. Согласно полученному механизму, очаг находился в условиях СВ-ЮЗ сжатия, что привело к взбросовой подвижке.

Наиболее сильное в регионе в 2024 г. глубокофокусное событие произошло 20 ноября в 15:09 UTC ( $M_L = 5.6$ ,  $M_W = 5.3$ , h = 444 км;  $N \ge 2$ ). На поверхности землетрясение не ощущалось. Механизм очага сдвигового типа с вертикальными нодальными плоскостями сформировался в условиях горизонтального запад-юго-западного сжатия и юго-юго-восточного растяжения.

В *Сахалинском регионе* в 2024 г. произошло 109 коровых и 31 глубокофокусное событие с  $M_L \ge 2.2$ . 16 землетрясений вызвали ощутимые сотрясения.

Наиболее сильное по макросейсмическому эффекту региональное землетрясение в 2024 г. зарегистрировано 19 января в 16:56 UTC ( $K_{\rm p} = 12.1, M_{\rm L} = 4.6, h = 7$  км;  $\tilde{N}_{\rm D}$  3). Эпицентр находится в Татарском проливе северозападнее г. Невельск, где интенсивность сотрясений оценивается в 4-5 баллов. В г. Холмск и с. Правда – 4 балла, в пос. Синегорск и с. Чапланово 3-4 балла. Механизм очага события взбросового типа с небольшой сдвиговой компонентой и диагональной СВ-ЮЗ ориентацией нодальных плоскостей, сформирован в условиях юго-восточного горизонтального сжатия. Землетрясение произошло в очаговой зоне Невельских событий 2 августа 2007 г. с M = 6.1, 6.3 в зоне Западно-Сахалинского разлома.

Можно отметить еще одно событие, произошедшее в южной части Сахалинского региона 15 июня в 13:35 UTC ( $K_p = 11, M_L = 4.1, h = 7$  км; № 6). Эпицентр находится на побережье Анивского залива. Зарегистрированы сотрясения интенсивностью до 4 баллов в г. Анива, пос. Таранай, Огоньки, Шебунино. Механизм очага события – почти чистый взброс с ССВ-ЮЮЗ ориентацией нодальных плоскостей, сформировался в условиях западсеверо-западного горизонтального сжатия. Очаг землетрясения можно отнести к южному флангу Тымь-Поронайской (Центрально-Сахалинской) разломной зоны.

Наиболее сильное по магнитуде в 2024 г. событие, относящееся к Сахалинскому региону, произошло 15 марта в 06:04 UTC ( $K_p = 11.2$ ,  $M_L = 4.7$ , h = 25 км; № 5) на территории Хабаровского края севернее устья р. Амур. Землетрясение ощущалось в г. Николаевск-на-Амуре с интенсивностью в 3–4, поселках Чля, Красное, Белая гора – 3 балла. Механизм очага события определить не удалось.

Наиболее сильное глубокофокусное землетрясение произошло 12 марта в 18:22 UTC  $(M_L = 4.7, M_W = 4.2, h = 317 \text{ км}; \text{ № } 4)$ , эпицентр в прол. Лаперуза. Механизм очага взрезового типа с левосторонней сдвиговой компонентой вдоль вертикальной плоскости северозападного простирания, возможно, является результатом подвижки вдоль трансформного разлома в погруженной части Тихоокеанской литосферной плиты.

В составленный по базе данных РИОЦ «Южно-Сахалинск» оперативный каталог 2024 г. вошло 2677 землетрясений с эпицентрами в **Курило-Охотском регионе** с  $M_L \ge 2.2$ . 1713 события произошли в земной коре региона или в зоне контакта Тихоокеанской и Охотской литосферных плит на глубинах  $h \le 70$  км; 892 – в диапазоне глубин h = 71-300 км; 72 на глубинах  $h \ge 300$  км. Ощутимые колебания на территории Сахалинской области вызвали 50 региональных землетрясений (рис. 3).

В таблице отмечены пять наиболее примечательных событий региона в 2024 г. Наибольшая интенсивность сотрясений отмечена у двух событий. Первое из них произошло 20 августа в 08:24 UTC ( $M_L = 5.1, Mw = 4.8, h = 104$  км; № 8), эпицентр находится в районе Южных Курил вблизи пос. Малокурильское, где это умеренной величины событие вызвало колебания интенсивностью в 4 балла. Механизм очага землетрясения взрезового типа с вертикальной плоскостью, ориентированной вдоль островной дуги и небольшой правосдвиговой подвижкой вдоль нее. Такие механизмы очага характерны для событий, произошедших в области растяжения в нижнем слое двойной сейсмофокальной зоны в пределах погрузившейся Тихоокеанской плиты [19].

Второе событие с эпицентром в районе Северных Курил произошло 23 октября в 14:38 UTC ( $M_L = 6.0, Mw = 6.1, h = 62$  км; № 9), оно ощущалось в г. Северо-Курильск (4 балла) и в южной части п-ова Камчатка, включая г. Петропавловск-Камчатский (2–3 балла). Механизм очага «классического» поддвигового типа с нодальными плоскостями, ориентированными вдоль дуги, и пологой плоскостью, падающей под острова, что наиболее характерно для землетрясений в зоне контакта литосферных плит.

Наиболее сильное по магнитуде из всех землетрясений трех регионов произошло 27 декабря в 12:47 UTC ( $M_{I} = 6.3, M_{W} = 6.8$ , h = 182 км; № 11). Его гипоцентр расположен в средней части островной дуги прямо под островами. Несмотря на удаленность эпицентра от населенных пунктов, это событие ощущалось в южной части Курильских островов с интенсивностью сотрясений в 2-3 балла MSK-64. Японское метеорологическое агентство также отметило сотрясения с силой 1-2 балла шкалы ЈМА в юго-восточной части о. Хоккайдо и на севере о. Хонсю. Механизм очага взрезового типа с вертикальной плоскостью, ориентированной на север, вдоль которой довольно большая левосторонняя сдвиговая компонента. В координатах погружающейся [21] плиты это событие – взбросо-сдвиг, произошедший в условиях сжатия, ориентированного по падению плиты.

Событие 8 декабря в 10:24 UTC ( $M_L = 6.1$ , Mw = 6.0, h = 245 км; № 10) произошло в северной части Средних Курил, его эпицентр находится на охотоморской стороне относительно островной гряды. Событие ощущалось в г. Се-

веро-Курильск с интенсивностью в 3 балла. Механизм очага также взрезового типа, однако вертикальная плоскость ориентирована на юго-восток, вкрест островной дуге, вдоль нее также левосторонняя сдвиговая компонента. В координатах погружающейся плиты это событие – чистый сдвиг, вероятно произошедший вдоль разломной зоны, ориентированной по падению погружающейся плиты.

Сильное глубокофокусное землетрясение с эпицентром в юго-западной части Охотского моря произошло 10 августа в 03:28 UTC (*M*<sub>1</sub> = 6.1, *Mw* = 6.4, *h* = 428 км; № 7). Событие ощущалось на обширной территории: в южной и центральной частях о. Сахалин, на Южных Курилах (сильнее всего в пос. Малокурильское – 3–4 балла MSK-64), а также, согласно данным JMA, - на о. Хоккайдо и северо-восточной половине о. Хонсю с интенсивностью сотрясений 1-3 балла шкалы ЈМА. Что характерно для подобных глубоких событий, сильнее колебания ощущались на восточном и юго-восточном побережьях, удаленных от эпицентра, но находящихся ближе к выходу на поверхность погруженной плиты.

#### Заключение

Сеть сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2024 г. продолжила сокращаться по причине износа оборудования, на конец года в ней официально числится 42 пункта наблюдения, часть оборудования которых работает нестабильно. Сокращение числа сейсмостанций сказывается на уровне представительной регистрации землетрясений, особенно в регионе Курил и в Приамурье. Чтобы компенсировать информацию выбывающих пунктов наблюдения, изыскиваются возможности перераспределения оборудования и привлечения к обработке сейсмических станций других организаций.

По данным оперативного каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск», в 2024 г. на юге Дальнего Востока России зарегистрировано 2929 землетрясений магнитудой  $M_1 \ge 2.2$ : в Курило-
Охотском регионе – 2677, в Сахалинском – 240 (31 глубокофокусное), в Приамурье и Приморье – 107 (5 глубокофокусных).

67 землетрясений с эпицентрами в пределах зоны ответственности филиала имели ощутимые проявления на территории регионов. Также зарегистрированы сотрясения 6 землетрясений с эпицентрами за пределами территории. Максимальная зарегистрированная Сахалинским филиалом интенсивность сотрясений в 2024 г. составила 4–5 баллов MSK-64 при землетрясении с эпицентром у юго-западного побережья о. Сахалин.

По критерию суммарной сейсмической энергии, оцениваемой по методике СОУС'09, сейсмичность коровых землетрясений регионов Сахалин, Приамурье и Приморье в 2024 г. находилась на фоновом пониженном уровне.

**Таблица.** Параметры наиболее значимых землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН 2024 г. (по данным РИОЦ «Южно-Сахалинск»)

**Table.** Parameters of the most significant earthquakes in the SB FRC GS RAS area of responsibility in 2024 (according to the data of the "Yuzhno-Sakhalinsk" RIPC)

No.	Дата / Date dd.mm.yyyy	Время / Time, t <sub>0</sub> hh:mm:ss	φ, N	λ, Ε	<i>h,</i> km	M <sub>L</sub>   Mw	Интенсивность сотрясений (населенный пункт, балл / Shaking intensity (locality, points)	
Приамурье и Приморье / Amur–Primorye region								
1	18.06.2024	18:46:41	48.44	132.75	11	4.5   3.8	Биробиджан, 3–4; Бирофельд, Дубовое, Найфельд, Пронкино, Птичник, 2–3	
2	20.11.2024	15:09:02	46.28	136.10	444	5.6   5.3	Нет данных об ощутимости	
Caxaлинский регион / Sakhalin region								
3	19.01.2024	16:56:59	46.82	141.57	7	4.6   4.0	Невельск, 4–5; Холмск, Правда, 4; Синегорск, Чапланово, 3–4; Анива, Костромское, Луговое, 3; Томари, Долинск, Южно-Сахалинск, 2–3	
4	12.03.2024	18:22:28	45.64	142.16	317	4.7   -	Нет данных об ощутимости	
5	15.03.2024	06:04:40	53.39	140.74	25	4.7   -	Николаевск-на-Амуре, 3–4; Чля, Красное, Белая гора, 3; Оха, 2	
6	15.06.2024	13:35:30	46.67	142.34	7	4.1   4.2	Таранай, Анива, Огоньки, Шебунино, 4; Невельск, 3; Корсаков, 2–3; Южно-Сахалинск, 2	
Курило-Охотский регион / Kuril-Okhotsk region								
7	10.08.2024	03:28:31	46.97	144.65	428	6.1   6.4	Малокурильское, 3–4; Горячий Пляж, 3; Поречье, Шахтерск, Углегорск, Макаров, Южно-Саха- линск, Холмск, 2–3; Тымовское, 2; о. Хоккайдо, Хонсю, Япония – до 3 по шкале JMA*	
8	20.08.2024	08:24:21	44.06	147.61	104	5.1   4.8	Малокурильское, 4; Южно-Курильск, Горячий Пляж, 3; Менделеево, 2–3, северо-восток о. Хоккайдо, Япония – до 2 по шкале JMA**	
9	23.10.2024	14:38:02	49.31	155.83	62	6.0   6.1	Северо-Курильск, мыс Васильева, 4; мыс Лопат- ка, Озерновский, 3–4; Паужетка, 3; Петропав- ловск-Камчатский, Вилючинск, 2–3***	
10	08.12.2024	10:24:58	48.74	152.63	245	6.1   6.0	Северо-Курильск, 3	
11	27.12.2024	12:47:35	46.97	151.48	182	6.3   6.8	Южно-Курильск, Лагунное, Горячий Пляж, Менделеево, Головнино, Малокурильское, 2–3; о. Хоккайдо, Хонсю, Япония – до 2 по шкале JMA****	

\* https://earthquake.tenki.jp/bousai/earthquake/detail/2024/08/10/2024-08-10-12-29-34.html

\*\* https://earthquake.tenki.jp/bousai/earthquake/detail/2024/08/20/2024-08-20-17-24-47.html \*\*\* https://glob.emsd.ru/news/309/

\*\*\*\* https://earthquake.tenki.jp/bousai/earthquake/detail/2024/12/27/2024-12-27-21-48-55.html

Глубокофокусная сейсмичность с эпицентрами в пределах этих регионов – на фоновом среднем уровне. В Курило-Охотском регионе уровень сейсмичности можно оценить как средний фоновый, однако отмечается преобладание сейсмической энергии глубокофокусных землетрясений (h > 70 км), тогда как энергия неглубоких событий ( $h \le 70$  км) находится у нижней границы фонового среднего уровня, уступая энергии глубоких событий более чем на порядок.

Согласно карте распределения плотности условной упругой деформации по площади трех регионов, в 2024 г. пиковые значения этого параметра связаны с сильнейшими землетрясениями регионов и не превышают средние годовые максимумы величины е за длительный период времени [1]. Сейсмогенерирующая область, протянувшаяся между островной дугой и Курило-Камчатским глубоководным желобом, связанная с зоной контакта плит и наиболее сильными событиями предыдущих лет, в 2024 г. заметно менее активна, чем в среднем за период с 1981 г. Положение других участков активной сейсмогенерации в 2024 г. совпадает с концентрацией повышенных значений е в предыдущие годы.

## Список литературы

- Сафонов Д.А., Семенова Е.П. 2024. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2023 году. *Геосистемы переходных зон*, 8(2): 77–90. https://doi. org/10.30730/ gtrz.2024.8.2.077-090
- Костылев Д.В., Богинская Н.В. 2022. Сейсмический мониторинг района угледобычи на о. Сахалин с использованием временных сетей ФИЦ ЕГС РАН. *Геодинамика и тектонофизика*, 13(2), 0634. https:// doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0634
- 3. Дягилев Р.А. **2020.** 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.
- Safonov D.A., Semenova E.P. 2022. Regional magnitude M<sub>wa</sub> in the Russian Far East. *Seismic Instruments*, 58(Suppl 1): S42–S57. https://doi.org/10.3103/ S074792392207009X
- 5. Раутиан Т.Г. **1964.** Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км. В кн.: Экспери-

ментальная сейсмика. М.: Наука, с. 88–93. (Труды ИФЗ АН СССР; № 32(199)).

- Sokos E., Zahradník J. 2013. Evaluating centroid moment tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. *Seismological Research Letters*, 84: 656–665. https://doi.org/10.1785/0220130002
- Сафонов Д.А., Коновалов А.В. 2017. Использование программы ISOLA для определения тензора сейсмического момента землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов. *Тихоокеанская геология*, 36(3): 102–112. URL: http://itig.as.khb.ru/ POG/2017/n\_3/PDF\_3\_17/102-112.pdf
- 8. Richter C.F. **1958.** *Elementary seismology*. New York: Freeman and Co., 768 p.
- Сафонов Д.А. 2025. Соотношение между магнитудами М<sub>LH</sub> и М<sub>w</sub> для Курило-Охотского региона и его использование для транзитных пересчетов в другие магнитуды. Вулканология и сейсмология, 2: 20–37.
- Сафонов Д.А. 2024. Переходные соотношения для энергетических характеристик землетрясений Курило-Охотского региона. Вопросы инженерной сейсмологии, 51(2): 102–117. https://doi.org/10.21455/ VIS2024.2-6
- Салтыков В.А. 2011. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки. Вулканология и сейсмология, 2: 53–59. EDN: NSYPHR
- Поплавская Л.Н. (ред.) 2006. Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 103 с.
- Ким Ч.У., Андреева М.Ю. 2009. Каталог землетрясений Курило-Камчатского региона (1737–2005 гг.). Препринт. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 126 с.
- Сафонов Д.А., Нагорных Т.В., Коваленко Н.С. 2019. Сейсмичность региона Приамурье и Приморье. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 104 с.
- Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Костылев Д.В. 2023. Сейсмичность Приамурья и Приморья, Сахалина и Курило-Охотского региона в 2018–2019 гг. Землетрясения Северной Евразии, 26 (2018–2019 гг.): 154– 170. https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.01
- Родкин М.В., Андреева М.Ю. 2025. Уточнение характера типовых предвестниковых аномалий для разноглубинных землетрясений Курило-Камчатского региона. Геодинамика и тектонофизика, 16(1), 0811. https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-1-0811
- Khanchuk A.I., Safonov D.A., Radziminovich Ya.B., Kovalenko N.S., Konovalov A.V., Shestakov N.V., Bykov V.G., Serov M.A., Sorokin A.A. **2012.** The largest recent earthquake in the Upper Amur Region on October 14, 2011: First results of multidisciplinary study. *Doklady Earth Sciences*, 445(1): 916–919.

- Прытков А.С., Сафонов Д.А., Полец А.Ю. 2018. Модель очага Онорского землетрясения 14 августа 2016 г. Мw= 5.8 (о. Сахалин). *Тихоокеанская геология*, 37(5): 112–119. doi:10.30911/0207-4028-2018-37-5-112-119
- Safonov D.A. 2022. The earthquake of February 13, 2020, M = 7.0 and seismotectonic conditions at intermediate depths of the Southern Kuril Islands. *Pure* and Applied Geophysics, 179(11): 4147–4162. https:// doi.org/10.1007/s00024-021-02926-5
- Прытков А.С., Василенко Н.Ф. 2022. Парамуширское землетрясение 25.03.2020 г., Мw = 7.5, и его влияние на современную геодинамику прилегающего участка Курило-Камчатской зоны субдукции. *Геодинамика и тектонофизика*, 13(3), 0641. https:// doi.org/10.5800/GT-2022-13-3-0641
- Сафонов Д.А. 2020. Реконструкция поля тектонических напряжений глубокой части южного сегмента Курило-Камчатской и северного сегмента Японской зоны субдукции. *Геодинамика и тектонофизика*, 11(4): 743–755. https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-4-0504

## References

- Safonov D.A., Semenova E.P. 2024. Seismicity of the South Far East of Russia in 2023. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 8(2): 77– 90. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/ gtrz.2024.8.2.077-090
- Kostylev D.V., Boginskaya N.V. 2022. Seismic monitoring of the coal mining area on Sakhalin Island using temporary networks of the FRC GS RAS. *Geodynamics* & *Tectonophysics*, 13(2), 0634. (In Russ.). https://doi. org/10.5800/GT-2022-13-2s-0634
- Dyagilev R.A. 2020. 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, 2020. Moscow: Rospatent. (In Russ.).
- Safonov D.A., Semenova E.P. 2022. Regional magnitude Mwa in the Russian Far East. *Seismic Instruments*, 58(Suppl 1): S42–S57. https://doi.org/10.3103/ S074792392207009X
- Rautian T.G. 1964. [On determining the energy of earthquakes at distances up to 3000 km]. In: *Eksperimental 'naia seismika = Experimental seismic*. Moscow: Nauka Publ., p. 88–93. (Trudy IFZ AN SSSR; № 32(199)). (In Russ.).
- Sokos E., Zahradník J. 2013. Evaluating centroid-moment-tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. *Seismological Research Letters*, 84: 656–665. https://doi.org/10.1785/0220130002

- Safonov D.A., Konovalov A.V. 2017. Moment tensor inversion in the Kuril-Okhotsk and Sakhalin regions using ISOLA software. *Russian Journal of Pacific Geology*, 36(3): 102–112. (In Russ.). URL: http://itig.as.khb. ru/POG/2017/n\_3/PDF\_3\_17/102-112.pdf
- 8. Richter C.F. **1958.** *Elementary seismology*. New York: Freeman and Co., 768 p.
- 9. Safonov D.A. **2025.** [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*, 2: 20–37. (In Russ.).
- Safonov D.A. 2024. Relationships for conversion of energy characteristics of earthquakes in the Kuril-Okhotsk region. *Voprosy inzhenernoj sejsmologii*, 51(2): 102–117. (In Russ.). https://doi.org/10.21455/VIS2024.2-6
- Saltykov V.A. 2011. A statistical estimate of seismicity level: The method and results of application to Kamchatka. *Journal of Volcanology and Seismology*, 5: 123–128. https://doi.org/10.1134/S0742046311020060
- Poplavskaya L.N. (ed.) 2006. [Regional catalog of earthquakes on Sakhalin Island, 1905–2005]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN, 103 p. (In Russ.).
- Kim Ch.U., Andreeva M.Yu. 2009. [Earthquake catalog of the Kuril-Kamchatka region (1737–2005)]. Preprint. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN, 126 p. (In Russ.).
- 14. Safonov D.A., Nagornyh T.V., Kovalenko N.S. **2019**. *Seismicity of the Amur and Primorye regions*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, 104 p. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Fokina T.A., Safonov D.A., Kostylev D.V. 2023. Seismicity of the Amur Region and Primorye, Sakhalin and the Kuril-Okhotsk region in 2018–2019. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii = Earthquakes of Northern Eurasia*, 26 (2018–2019): 154–170. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.13
- Rodkin M.V., Andreeva M.Yu. 2025. Clarification of the nature of typical precursor anomalies for differentdepth earthquakes in the Kuril-Kamchatka region. *Geodynamics & Tectonophysics*, 16(1), 0811. (In Russ.). https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-1-0811
- Khanchuk A.I., Safonov D.A., Radziminovich Ya.B., Kovalenko N.S., Konovalov A.V., Shestakov N.V., Bykov V.G., Serov M.A., Sorokin A.A. 2012. The largest recent earthquake in the Upper Amur Region on October 14, 2011: First results of multidisciplinary study. *Doklady Earth Sciences*, 445(1): 916–919.
- Prytkov A.S., Safonov D.A., Polets A.Yu. 2018. Model of the Source of the Mw = 5.8 Onor Earthquake, August 14, 2016, Sakhalin. *Russian Journal of Pacific Geology*, 12(5): 443–449. https://doi.org/10.1134/ S1819714018050093

- Safonov D.A. 2022. The earthquake of February 13, 2020, M = 7.0 and seismotectonic conditions at intermediate depths of the Southern Kuril Islands. *Pure and Applied Geophysics*, 179(11): 4147–4162. https://doi. org/10.1007/s00024-021-02926-5
- Prytkov A.S., Vasilenko N.F. 2022. The March 25, 2020 Mw 7.5 Paramushir earthquake and its impact on recent geodynamics of the adjacent section of the Kuril-Kam-

## Об авторах

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

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

Костылев Дмитрий Викторович (https://orcid.org/0000-0002-8150-9575), кандидат технических наук, директор, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия, kostylev@seismo.sakhalin.ru

Щукин Михаил Анатольевич (https://orcid.org/0009-0001-9587-1997), ведущий программист, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия, vgcat.zero@gmail.com

Поступила 04.04.2025 Принята к публикации 29.04.2025 chatka subduction zone. *Geodynamics & Tectonophysics*, 13(3), 0641. (In Russ.). https://doi.org/10.5800/gt-2022-13-3-0641

 Safonov D.A. 2020. Reconstruction of the tectonic stress field in the deep parts of the Southern Kuril-Kamchatka and Northern Japan subduction zones. *Geodynamics & Tectonophysics*, 11(4): 743–755. (In Russ.). https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-4-0504

## About the Authors

Safonov, Dmitry A. (https://orcid.org/0000-0002-2201-2016), 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

Semenova, Elena P. (https://orcid.org/0000-0002-7435-961X), 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

Kostylev Dmitry Viktorovich (https://orcid.org/0000-0002-8150-9575), Cand. Sci. (Engineering), Director of the Sakhalin Branch of the Federal Research Center "Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences", Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, kostylev@seismo.sakhalin.ru

Shchukin Mikhail Anatolyevich (https://orcid.org/0009-0001-9587-1997), Leading Programmer, Sakhalin Branch of the Federal Research Center "Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences", Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, vgcat.zero@gmail.com

> Received 4 April 2025 Accepted 29 April 2025

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



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

УДК 551.21

https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.2.197-203 https://www.elibrary.ru/fzefsa

## Вулканическая активность на Курильских островах в 2024 году: вулкан Эбеко (о. Парамушир)

A. B. Дегтерев<sup>@</sup>, M. B. Чибисова <sup>@</sup>E-mail: d\_a88@mail.ru

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

**Резюме.** В 2024 г. на влк. Эбеко (о. Парамушир, Северные Курилы) зарегистрировано 616 пепловых выбросов на высоту от 1.5 до 4.5 км н.у.м. (из них 181 – на высоту 3 км и более). Распределение частоты и высоты эксплозий в течение года оказалось нетипичным по сравнению с 2018–2021, 2022–2023 гг. Период с февраля по апрель характеризовался повышенной активностью: общее количество выбросов и их максимальная высота существенно превышали показатели аналогичных месяцев предыдущих лет. С мая по сентябрь эруптивная деятельность, напротив, существенно снизилась относительно средних значений 2018–2021, 2022–2023 гг. (ранее пик активности приходился на летние месяцы, когда могло регистрироваться более 100 событий в месяц). С октября 2024 г. зафиксировано дальнейшее снижение высоты и частоты взрывов, а также уменьшение концентрации пепла в эруптивных шлейфах. Последний парогазовый выброс с незначительным содержанием пепла произошел 16 января 2025 г. Наступивший перерыв в деятельности влк. Эбеко не исключает необходимость постоянного мониторинга, учитывая его высокую активность в последние годы и близость к населенному пункту.

**Ключевые слова:** вулкан, извержение, Эбеко, Парамушир, Курильские острова, эксплозия, вулканический пепел, спутниковые снимки

## The volcanic activity on the Kuril Islands in 2024: Ebeko volcano (Paramushir Island)

Artem V. Degterev<sup>®</sup>, Marina V. Chibisova <sup>®</sup>E-mail: d\_a88@mail.ru Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

**Abstract.** In 2024, 616 ash emissions were registered at Ebeko volcano (Paramushir Island, Northern Kurils) to heights from 1.5 to 4.5 km above sea level (181 of them reached a height of 3 km or more). The distribution of emission frequency and height during the year turned out to be unusual compared to the periods 2018–2021 and 2022–2023. The period from February to April was characterized by increased explosive activity: the total number of emissions and their maximum height significantly exceeded the values of the same months of the previous years. From May to September, on the contrary, the eruptive activity significantly decreased relative to the average values of 2018–2021 and 2022–2023 (previously, the peak activity occurred during the summer months, when more than 100 events per month could be registered). From October 2024, a further decrease in the height and frequency of emissions, as well as a decrease in the concentration of ash in eruptive clouds, has been recorded. The last vapor-gas emission with insignificant ash content occurred on January 16, 2025. The pause in the activity of the Ebeko volcano since mid-January 2025 still maintains the need for continuous monitoring, given its high activity in recent years and its proximity to the settlement.

Keywords: volcano, eruption, Ebeko volcano, Paramushir, the Kuril Islands, volcanic ash, satellite images

Для цитирования: Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Вулканическая активность на Курильских островах в 2024 году: вулкан Эбеко (о. Парамушир). Геосистемы переходных зон, 2025, т. 9, № 2, с. 197–203. https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.2.197-203; https://www.elibrary.ru/fzefsa

## 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». Авторы благодарны С.П. Лакомову и В.В. Исупову (г. Северо-Курильск) за предоставленные фотоматериалы и данные о состоянии влк. Эбеко. *For citation:* Degterev A.V., Chibisova M.V. The volcanic activity on the Kuril Islands in 2024: Ebeko volcano (Paramushir Island). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 2, pp. 197–203. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.2.197-203; https://www.elibrary.ru/fzefsa

## Funding and Acknowledgements

The research was carried out within the framework of the research project "Volcanism of Sakhalin and the Kuril Islands: chronology, petrological and geochemical features, hydrothermal activity, and monitoring of volcanic activity". The authors are grateful to S. P. Lakomov and V.V. Isupov (Severo-Kurilsk) for providing photographic materials and data on the state of Ebeko volcano.

## Введение

Вулканическая активность на Курильских островах в 2024 г. была относительно низкой. В состоянии извержения находился только влк. Эбеко (о. Парамушир, Северные Курильские острова), по количеству и частоте извержений являющийся одним из самых активных вулканов архипелага как в последние годы, так и на протяжении исторического времени в целом (рис. 1). Наблюдение за эксплозивной деятельностью Эбеко традиционно осуществлялось на основе анализа изображений (фотоснимков), поступающих с IP-камеры AXIS 0526-001, установленной в г. Северо-Курильск, дополняемых наземными визуальными наблюдениями (спутниковые снимки для отслеживания пепловых и парогазовых выбросов неинформативны, поэтому для задач ежедневного мониторинга не используются).



Рис. 1. Географическое положение о. Парамушир (красными треугольниками показаны активные вулканы острова). Справа спутниковый снимок вершинной части влк. Эбеко по состоянию на 30.08.2024 г., использованы данные ГИС-сервиса Google Earth.
Fig. 1. Geographical position of Paramushir Island. Paramushir Island (red triangles show active volcanoes of the island). On the right is a satellite image of Ebeko volcano summit on August 30, 2024; data from Google Earth GIS service were used.

Настоящая публикация, посвященная анализу эруптивной деятельности Эбеко в 2024 г., продолжает серию регулярных сводок Сахалинской группы реагирования на вулканические извержения (SVERT), направленных на систематизацию данных наблюдений и оценку текущего состояния действующих вулканов региона.

## Деятельность вулкана в 2024 г.

Действующий вулкан Эбеко (абс. выс. 1156 м) расположен в северной части о. Парамушир, в системе хр. Вернадского (рис. 1). В 7 км к восток-юго-востоку от вулкана находится г. Северо-Курильск (на 01.01.2024 г. – 2378 чел.).

Постройка влк. Эбеко представляет собой сложное «кустовое» сооружение, образованное слившимися разновозрастными конусами. Вершина его увенчана тремя кратерами (Северный, Средний, Южный) (рис. 1) [1–4]. С 1989 г. проявления эруптивной активности приурочены преимущественно к Северному кратеру, где с 2018 г. действует кратер Корбута (Новый Северный кратер) [3, 4]. Вещественный состав пород вулкана представлен андезибазальтами и андезитами, продукты исторических извержений (1934–1935, 2021–2022 гг.) относятся главным образом к андезитам [1–4].

С айнского языка Эбеко (Эбэку) переводится как «горящий» [5], что хорошо соотносится с высокой активностью вулкана в историческое время. Его извержения происходили в 1793 г., 1833–1834, 1859, 1934–1935, 1963, 1965, 1967–1971, 1987–1991, 2009, 2010–2011, 2016–2021, 2022–2025 гг. [1–6 и др.].

С октября 2016 г. по декабрь 2021 г. влк. Эбеко находился в состоянии длительного эксплозивного извержения, протекающего в форме регулярных (десятки в месяц) фреатических и фреато-магматических взрывов [3, 5, 6]. Суммарно за год группой SVERT регистрировалось от 550 до 805 выбросов на высоту 1–3 (до 5.5) км н.у.м. (здесь и далее приводится высота в километрах над уровнем моря). Наступивший с конца 2021 г. период затишья прервался в июне 2022 г., когда вулкан вновь заработал в прежнем режиме: в 2022 г. зафиксировано суммарно 600 эксплозий (253 на 3 км и более), а в 2023 г. – 675 (293 на 3 км и более).

В 2024 г. эруптивная деятельность влк. Эбеко продолжилась: на протяжении всего года преобладали слабые и умеренные парои пепло-газовые выбросы вулканского типа, связанные с деятельностью кратера Корбута (рис. 2). По данным видеонаблюдения, суммарно произошло порядка 616 пепловых эксплозий на высоту от 1.5 до 4.5 км, из них 181 – на высоту 3 км и более (в светлое время суток и в условиях достаточной видимости) (рис. 3 а). Максимум активности (по количеству и высоте выбросов) пришелся на период с февраля по апрель – в эти месяцы было зафиксировано наибольшее количество взрывов, превышающее средние значения за предыдущие годы (2018-2020, 2022-2023 гг.) на 40-55 % (рис. 3 а). Рекордным по количеству выбросов стал апрель 2024 г. (рис. 3 а), когда было зарегистрировано 112 эксплозий, 33 из которых на высоту 3 км и более, что примерно в два раза выше, чем за 2018-2021, 2022-2023 гг. (от 21 до 56 событий). Данная ситуация нетипична для влк. Эбеко. По результатам наших наблюдений за предыдущие годы, усиление эруптивной деятельности отмечалось преимущественно в летнее время, в отдельные месяцы количество взрывов достигало 100 и более (например, июль 2022 г. – 174, август 2022 – 137). В 2024 г., напротив, активность вулкана с июня по август была пониженной. В июне было зафиксировано 56 событий, что на 16 % ниже средних значений за 2018-2021, 2022-2023 гг., в июле и августе показатели были еще ниже – 51 (44 %) и 54 (38 %) соответственно. Количество эксплозий в июле 2024 г. (рис. 3 а) было минимальным за все время наблюдений, выполняемых группой SVERT с 2017 г.

По данным сервиса MIROVA (https:// www.mirovaweb.it/?action=volcanoDetails\_ MOD&volcano\_id=290380), на протяжении 2024 г. на вулкане периодически отмечались слабые термальные аномалии, большинство которых фиксировалось с мая по июнь (рис. 3 b).



15.04.2024, 00:12:02 UTC



15.04.2024, 03:26:02 UTC



Рис. 2. Примеры пепловых взрывов на влк. Эбеко, зафиксированных камерой видеонаблюдения. Fig. 2. Examples of ash explosions at Ebeko volcano recorded by the video surveillance camera.

Рис. 3. Графики распределения: (а) пепловых выбросов (1 – общее количество, 2 – на высоту 3 км н.у.м. и более); (b) термальных аномалий (по данным сервиса MIROVA (https:// www.mirovaweb.it/?action=volcanoDetails\_MOD&volcano\_id=290380)); (c) пеплопадов (по данным С.П. Лакомова), связанных с активностью влк. Эбеко в 2024 г.

**Fig. 3.** Distribution diagrams (histograms) of: (a) ash explosions (1, total number; 2, to a height of 3 km or more above sea level), (b) thermal anomalies (according to MIROVA service data); (c) ashfall (according to S.P. Lakomov) associated with the activity of Ebeko volcano in 2024.



Рис. 4. Кратер Корбута (вид с востока), 15 апреля 2025 г. Фото В.В. Исупова

**Fig. 4.** The Korbuta crater (view from the east), April 15, 2025. *Photo by V.V. Isupov* 



С октября 2024 г. активность Эбеко существенно снизилась. Это выражалось в уменьшении частоты и высоты взрывов, увеличении времени между ними и снижении концентрации пепла в шлейфах (рис. 3 а). Последний парогазовый выброс с небольшим количеством пепла зафиксирован 16 января 2025 г. После 16 января вулкан находится в спокойном состоянии, признаков возобновления эксплозивной деятельности до текущего времени (до 15 мая 2025 г.) не наблюдается. По результатам визуального осмотра кратера Корбута (по данным В.В. Исупова и С.П. Лакомова) в апреле 2025 г. было установлено проявление относительно слабой парогазовой активности на дне и стенках кратера (рис. 4).

Пепловые шлейфы на протяжении 2024 г. распространялись главным образом на север, юг, северо-восток, восток, юго-восток, реже – в западном направлении (рис. 5). Их протяженность составляла 5–10 км.



Рис. 5. Основные направления распространения пепловых облаков от влк. Эбеко в 2024 г. Значения на оси соответствуют количеству эксплозий по данным IP-камеры и визуальным наблюдениям.

**Fig. 5.** The main directions of the distribution of ash clouds from Ebeko volcano in 2024. The values on the axis correspond to the quantity of observed explosions, according to the IP camera data and visual observations.

Эксплозивная деятельность влк. Эбеко, как и в предыдущие годы, сопровождалась частыми пеплопадами на территории Северо-Курильска и его окрестностей. По сообщению С.П. Лакомова, пеплопады наблюдались 5, 9, 10, 18 января; 1, 3, 4, 8, 9, 12, 17–19, 21–27 февраля; 2, 4, 6, 7, 11, 12 марта; 3, 4, 11, 14–17, 29, 30 апреля; 1, 3 мая; 29 июня; 17, 28 июля; 8, 18, 19, 21, 28 августа; 3, 10, 26 сентября; 13, 31 октября; 8, 10, 12, 15 ноября; 12, 18 декабря (рис. 3 с).

## Заключение

В 2024 г. вулканическая деятельность на Курильских островах сохранялась на умеренно-низком уровне, при этом единственным вулканом, находившимся в состоянии извержения в регионе, оставался Эбеко (о. Парамушир), демонстрирующий высокую эксплозивную активность в последние годы. По данным группы SVERT, в минувшем году зарегистрировано 616 пепловых эксплозий на высоту 1.5-4.5 км над уровнем моря, в том числе 181 событие с подъемом эруптивного облака свыше 3 км. Распределение частоты и высоты выбросов на протяжении 2024 г. существенно отличалось от 2018-2021 и 2022-2023 гг.: период с февраля по апрель 2024 г. характеризовался повышенной активностью, количество и высота выбросов в феврале и апреле превзошли максимумы аналогичных месяцев предшествующих лет. Напротив, с мая по сентябрь 2024 г. активность влк. Эбеко заметно снизилась – частота событий упала существенно ниже средних значений прошлых лет. С октября 2024 г. началась фаза ослабления эруптивной деятельности, сопровождавшаяся уменьшением высоты, частоты выбросов и концентрации пепла в шлейфах. Последний парогазовый выброс с незначительным количеством пепла зафиксирован 16 января 2025 г. Несмотря на перерыв в эксплозивной активности (первые признаки ослабления которой наблюдались еще летом 2024 г.), мониторинг вулкана остается критически важным из-за его близости к г. Северо-Курильску (~7 км).

## Список литературы

- 1. Горшков Г.С. **1967.** *Вулканизм Курильской островной дуги*. М.: Наука, 287 с.
- Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Будников В.А. 1992. Активность вулкана Эбеко в 1987–1991 гг.: характер извержений, особенности их продуктов, опасность для г. Северо-Курильск. Вулканология и сейсмология, 5–6: 21–33.
- Котенко Т.А., Смирнов С.З., Тимина Т.Ю. 2023. Активность вулкана Эбеко в 2022 г.: механизм и продукты извержения. Вулканология и сейсмология, 4: 3–22. https://doi.org/10.31857/ s0203030623700244
- Belousov A., Belousova M., Auer A. et al. 2021. Mechanism of the historical and the ongoing Vulcanian eruptions of Ebeko volcano, Northern Kuriles. *Bull. of Volcanology*, 83(4). https://doi.org/10.1007/s00445-020-01426-z
- 5. Акулов А.Ю. **2022.** Айнская топонимика Северных Курил. *Вестник Сахалинского музея*, 1: 118–134
- 6. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В. **2017.** Активность вулканов Курильских островов в 2016 г. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(33): 83–88.

## Об авторах

Дегтерев Артем Владимирович (https://orcid.org/0000-0001-8291-2289), кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, d a88@mail.ru

Чибисова Марина Владимировна (https://orcid.org/0000-0003-0677-6945), старший научный сотрудник, лаборатория вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, m.chibisova@imgg.ru

Поступила 29.04.2025 Принята к публикации 12.05.2025

## References

- 1. Gorshkov G.S. **1967.** [Volcanism of the Kuril island arc]. Moscow: Nauka, 287 p. (In Russ.).
- Menyajlov I.A., Nikitina L.P., Budnikov V.A. 1992. Activity of Ebeko volcano in 1987–1991: eruption character, their product features, danger for the city of Severo-Kurilsk. *Volcanology and Seismology*, 5-6: 21–33. (In Russ.).
- Kotenko T.A., Smirnov Z.3, TiminaT.Y. 2023. The 2022 Activity of Ebeko volcano: The mechanism and ejecta. *Journal of Volcanology and Seismology*, 17: 259–277. https://doi.org/10.1134/s0742046323700264
- Belousov A., Belousova M., Auer A. et al. 2021. Mechanism of the historical and the ongoing Vulcanian eruptions of Ebeko volcano, Northern Kuriles. *Bull.* of Volcanology, 83(4). https://doi.org/10.1007/s00445-020-01426-z
- 5. Akulov A.Yu. **2022.** The Ainu toponymics of Northern Kuriles. *Vestnik Sahalinskogo muzeya*, 1: 118–134. (In Russ.).
- Rybin A.V., Chibisova M.V., Degterev A.V. 2017. Activity of the Kurile Islands volcanoes in 2016. Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences, 1(33): 83–88. (In Russ.). https://doi.org/10.31431/1816-5524-2018-2-38-102-109

## About the Authors

**Degterev, Artem V.** (https://orcid.org/0000-0001-8291-2289), Cand. of Sci. (Geology and Mineralogy), Head of Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, d a88@mail.ru

Chibisova, Marina V. (https://orcid.org/0000-0003-0677-6945), Senior Researcher, Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, m.chibisova@imgg.ru

Received 29 April 2025 Accepted 12 May 2025

### © Автор, 2025 г.

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



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

УДК 551.21+551.4.044

## https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.2.204-212 https://www.elibrary.ru/hxhvyu

## Дистанционные видеонаблюдения извержения Главного Пугачевского грязевого вулкана (остров Сахалин) 15 января 2025 г.

Р. В. Жарков

E-mail: rafael\_zharkov@mail.ru Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

**Резюме.** Впервые в истории исследований грязевых вулканов о. Сахалин применялись методы дистанционного видеонаблюдения, целью которых было слежение за активностью Главного Пугачевского грязевого вулкана (центральная часть о. Сахалин) и фиксирование процесса его извержения в зимний период года. В результате получены уникальные видеоматериалы извержения Западного поля Главного Пугачевского грязевого вулкана, позволившие проследить этапы его очередной активизации. Зафиксированное 15 января 2025 г. извержение грязевого вулкана началось в 18:15 по местному времени стремительно, без ощутимых предвестников. Основные эксплозии происходили в течение первых 30 мин, интенсивность эксплозий в первые минуты извержения составляла 1–3 с, высота выбросов грязевых масс достигала 10–12 м. В 18:17 наблюдалась эксплозия в виде направленного взрыва, грязевая масса под углом около 45° была выброшена на расстояние около 20 м. По предварительным визуальным данным это извержение характеризуется как типичное для Главного Пугачевского грязевого вулкана. При диаметре грязевого поля более 50 м и средней мощности 0.5–0.7 м объем грязевой массы составил не менее 1000 м<sup>3</sup>. В период извержения на Западном поле на других полях Пугачевской группы грязевых вулканов активизация не отмечалась.

Ключевые слова: остров Сахалин, грязевой вулкан, извержение, эксплозия, дистанционное видеонаблюдение

## Remote video surveillance of the eruption of Main Pugachev mud volcano (Sakhalin Island) on January 15, 2025

Rafael V. Zharkov

E-mail: rafael\_zharkov@mail.ru Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

**Abstract.** For the first time in the history of mud volcano research on Sakhalin Island, remote video surveillance methods were used to monitor the activity of Main Pugachev mud volcano (central part of Sakhalin Island) and record its eruption process in the winter. As a result, a unique video footage of the eruption of the Western field of Main Pugachev mud volcano was obtained, allowing to trace the stages of its next activation. The eruption of the mud volcano, recorded on January 15, 2025, began rapidly at 6:15 p.m. (local time), without any noticeable precursors. The main explosions occurred during the first 30 minutes, the intensity of explosions in the first minutes of the eruption was 1–3 seconds, and the height of the mud mass ejections reached 10–12 m. At 6:17 p.m., an explosion in the form of a directed blast was observed; the mud mass was ejected at an angle of approximately 45° to a distance of about 20 m. According to preliminary visual data, this eruption is characterized as typical of Main Pugachev mud volcano. With a mud field diameter of more than 50 m and an average thickness of 0.5–0.7 m, the volume of the mud mass was at least 1000 m<sup>3</sup>. During the eruption, no activation was observed on other fields of the Pugachev group of mud volcanoes.

Keywords: Sakhalin Island, mud volcano, eruption, explosion, remote video surveillance

Для цитирования: Жарков Р.В. Дистанционные видеонаблюдения извержения Главного Пугачевского грязевого вулкана (остров Сахалин) 15 января 2025 г. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 2, с. 204–212. https://doi.org/10.30730/ gtrz.2025.9.2.204-212; https://www.elibrary.ru/hxhvyu

## Финансирование и благодарности

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН «Вулканизм Сахалина и Курильских островов: хронология, петролого-геохимические особенности, гидротермальные проявления, мониторинг вулканической активности» (FWWM-2024-0003).

Автор выражает огромную признательность Дмитрию Александровичу Андриянову и Сергею Владимировичу Володько за участие в полевых работах на Пугачевском грязевом вулкане и обсуждение полученных материалов.

## *For citation:* Zharkov R.V. Remote video surveillance of the eruption of Main Pugachev mud volcano (Sakhalin Island) on January 15, 2025. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 2, pp. 204–212. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.2.204-212; https://www.elibrary.ru/hxhvyu

## Funding and Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the state task of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS "Volcanism of Sakhalin and the Kuril Islands: chronology, petrological and geochemical features, hydrothermal manifestations, and monitoring of volcanic activity" (FWWM-2024-0003).

The author expresses his deep gratitude to Dmitry Andriyanov and Sergei Volodko for participating in field work on Pugachev mud volcano and discussing the obtained materials.

## Введение

За последние десятилетия появилось множество фото и видеоматериалов, фиксирующих извержения грязевых вулканов по всему миру. Некоторая часть этих хроник собрана на тематических страницах в сети Интернет (наприhttps://www.reddit.com/r/DisasterUpdate; мер, https://www.reddit.com/user/MarkTingay), гле можно увидеть извержения грязевых вулканов Азербайджана, Мьянмы, Индонезии, Колумбии, Новой Зеландии и др. Среди последних событий интересна любительская видеосъемка извержения 6 апреля 2025 г. грязевого вулкана возле деревни Нага (штат Ракхайн, Мьянма): во время бурного извержения грязевые фонтаны поднимались на высоту первых десятков метров. Предполагается, что активизация этого грязевого вулкана связана с катастрофическим землетрясением с  $M_{\rm w}$  = 7.7 [1, 2], произошедшим 28 марта 2025 г. в этом регионе.

На территории России в последние годы также все чаще появляются любительские видеоролики бурных извержений грязевых вулканов на Таманском полуострове (например, грязевой вулкан Шуго) и в акватории Азовского моря (https://www.rgo.ru/ru/article/geolognazval-vozmozhnuyu-prichinu-izverzheniyavulkana-shugo-v-krasnodarskom-krae; https:// rg.ru/2023/05/04/reg-ufo/v-krasnodarskom-kraenachalos-izverzhenie-griazevogo-vulkana-shugo. html; https://xmlsearch.yandex.kz/video/preview/ 15845418085847500212?how=tm; https://trinixy. ru/120412-izverzhenie-gryazevogo-vulkana-vazovskom-more.html).

Грязевой вулкан Шуго, расположенный в Крымском районе Краснодарского края, по морфологическим особенностям поверхности грязевого поля (концентрически зональная структура центральной части с комковатоячеистой поверхностью) и характеру извержений (относительно небольшие, но частые эксплозии, без горения газов) близок к грязевым вулканам о. Сахалин, особенно некоторая схожесть проявляется с Главным Пугачевским грязевым вулканом. Одной из характерных особенностей сахалинских грязевых вулканов, отличающих их от других грязевых вулканов России и мира, является расположение в умеренном муссонном климате с холодной снежной зимой. Нередко извержения происходят в холодный период года, грязевые массы растекаются по снежному покрову, что влияет на морфологию грязевых полей сахалинских грязевых вулканов.

В настоящее время на о. Сахалин проявляют активность 3 центра грязевого вулканизма: Южно-Сахалинский грязевой вулкан на юге острова, группа Пугачевских грязевых вулканов и Восточный грязевой вулкан (рис. 1 а) в центральной части острова. В пределах Пугачевской группы грязевых вулканов (рис. 1 b) выделяют Главный (Центральный), Малый Северный и Малый Южный грязевые вулканы [3, 4].

По имеющимся сведениям, зачастую противоречивым и неточным (далее после таких дат стоит знак вопроса), извержения Главного Пугачевского грязевого вулкана происходили в 1906(?), 24 июля 1910, 24 июня 1911(?), 17 октября 1929, 20 ноября 1933, 7 мая 1934, 1 сентября 1934(?), 27 июня 1935(?), 7 сентября 1935(?), осенью 1948, 29–31 августа 1952, в 1958, 25 сентября 1961, 31 августа 1967, в 1988 и 1996, в апреле 2002, осенью 2003, зимой 2005, зимой или ранней весной 2006, в 2018, 2021 гг. [3–13]. Стоит отметить, что изза относительной труднодоступности и малой посещаемости грязевого вулкана многие его извержения не обследовались, а даты зимних извержений и вовсе были неизвестны. До недавнего времени исследователи достоверно не знали, когда и как происходят извержения, особенно в холодный период года. С появлением возможности использовать спутниковые снимки с аппаратов Sentinel и Landsat (https:// аpps.sentinel-hub.com) с 2013 г. мы можем установить даты (не всегда точно, в зависимости от



Рис. 1. Схема расположения активных грязевых вулканов на острове Сахалин (а): *I* – Южно-Сахалинский грязевой вулкан, *II* – группа Пугачевских грязевых вулканов, *III* – Восточный грязевой вулкан. Спутниковый снимок (Sentinel–2 L2A от 21.01.2025 г.) Пугачевской группы грязевых вулканов (b): Малый Северный, Главный (Центральный) и Малый Южный грязевые вулканов. *I* – IP-камера № 1; *2* – IP-камера № 2; *3* – примерное расположение грязевого поля извержения 15 января 2025 г.

**Fig. 1**. Location scheme of the active mud volcanoes on Sakhalin Island (a): *I*, Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano; *II*, Pugachev group of mud volcanoes; *III*, Vostochny mud volcano. Satellite image (Sentinel–2 L2A from 21.01.2025) of the Pugachev group of mud volcanoes (b): Small Northern, Main (Central) and Small Southern mud volcanoes. *I*, IP camera No. 1; *2*, IP camera No. 2; *3*, approximate location of the mud field of the eruption on January 15, 2025.

облачности и видимости объекта) и морфологические параметры извержений группы Пугачевских грязевых вулканов на о. Сахалин. Главный Пугачевский грязевой вулкан довольно часто извергается (1-3 раза в год в последнее время), но за всю историю исследований имеется всего несколько свидетельств самого процесса извержения, а в холодный период года с устойчивым снежным покровом до начала 2025 г. не было детально задокументировано ни одно извержение. С целью достоверной фиксации активизации и детального изучения процесса извержения с ноября 2022 г. на периферии Главного Пугачевского грязевого вулкана временустанавливались HO

# IP-камеры. К сожалению, заснять ход извержений с ноября 2022 г. по сентябрь 2024 г. не удавалось, в этот период смогли лишь констатировать прошедшие уже извержения на Западном поле Главного Пугачевского вулкана 9 марта и 13 ноября 2023, 5 марта 2024 г. Первая полноценная видеосъемка получилась только 8 сентября 2024 г. при извержении на Восточном поле Главного Пугачевского грязевого вулкана (http://www.imgg.ru/ru/news/465). Зимнее извержение впервые удалось зафиксировать 15 января 2025 г., событие произошло на Западном поле Главного Пугачевского грязевого вулкана и дистанционно наблюдалось нами с помощью IP-камер.

## Материалы и методы исследований

Для визуальных наблюдений и изучения процесса извержения Главного Пугачевского грязевого вулкана использовалась дистанционная видеосъемка. Впервые для этого вулкана видеофиксация извержения проводилась с помощью двух бытовых 4G IP-камер, оснащенных аккумулятором 6000 мАч и солнечной батареей 8 Вт. Камеры временно установлены с юго-запада и востока от Западного поля Главного Пугачевского грязевого вулкана (рис. 1 b) на мачтах высотой около 5 м. IP-камера № 1 расположена в 68 м от центра Западного поля, IР-камера № 2 – всего в 60 м. Управление камерами осуществляется со смартфона в приложении «О-Кам PRO», разрешение видео достигает 1920×1080 точек с частотой 15 кадров в секунду, запись ведется со звуком. С момента входа в приложение автоматически происходит видеозапись, при непрерывной съемке создаются видеоролики продолжительностью 5 мин и размером 19-23 Мб. Также видеозапись может начаться при срабатывании датчика движения и видимых изменениях окружающего ландшафта.

В оформлении картосхем использован спутниковый снимок Sentinel–2 L2A от 21.01.2025 г. (https://apps.sentinel-hub.com), построение картосхем и рисунков выполнено в CorelDRAW Graphics Suite X8.

## Результаты и обсуждение

Дистанционно наблюдаемое с помощью цифровых IP-камер извержение Западного поля Главного Пугачевского грязевого вулкана началось вечером 15 января 2025 г. В 18:12:32 (здесь и далее - по местному времени) ІРкамера № 1 по неустановленной причине самостоятельно включилась в режим видеозаписи. До 18:14:16 на Западном поле, полностью покрытом снежным покровом (рис. 2 а), не отмечалось проявлений какой-либо активности. Затем видеоряд в ролике оборвался, и следующий фрагмент видео продолжился в 18:15:31, когда на первых кадрах запечатлено уже начавшееся извержение (рис. 2 b). По всей видимости, это были первые секунды извержения, высота выбросов грязеводогазовой смеси достигала 10 м, при этом диаметр жерловой части, из которой происходили все эксплозии, составлял более 10 м. В последующую минуту фиксировались практически ежесекундные эксплозии с выбросами грязевой массы и газо-водяной смеси на высоту 10-12 м (рис. 2 с-ј). При эксплозиях и между ними из центра извержения выдавливались порции грязевой массы, которая быстро растекалась по снежному покрову, образовав за минуту свежее грязевое поле диаметром около 30 м. Аэрозольную смесь газов и воды с глинистыми частицами сильный северо-западный ветер сносил на юго-восток, клубы и шлейф «пара» распространялись на десятки метров. Выбросы сопровождались громким шумом, схожим с мощным водопадом.

В 18:17:05 (рис. 2 k) началась эксплозия в виде направленного взрыва: грязевая масса под углом около 45° к горизонту была выброшена в юго-восточном направлении на расстояние около 20 м (рис. 2 l–n). Последние мощные эксплозии, зафиксированные на записи камеры № 1, были в 18:17:12 (рис. 2 о) и 18:17:15 (рис. 2 р). К этому времени диаметр свежего грязевого поля составил около 40 м.

IP-камера № 2 также самостоятельно включилась в режим видеозаписи в 18:13:29 и снимала до 18:14:16. Следующее включение

(a)		(b)	
18:14:16		18:15:31	10 м
(c)		(d)	
18:15:32	10 м	18:15:33	10 м
(e)	And the second	(f)	- Internet
18:15:36	10 м	18:15:38	10 м
(g)		(h)	
18:16:23	10 м	18:16:26	10 м
<i>(i)</i>		0	
18:16:30	10 м	18:16:33	10 м
(k)		()	The second
18:17:05	10 м	18:17:07	10 м
( <u>m</u> )		(n)	
18:17:07	10 м	18:17:08	10 м
(0)		(p)	8 8 9
18:17:12	10 м	18:17:15	10 м

Рис. 2. Хронология извержения на Западном поле Главного Пугачевского грязевого вулкана 15 января 2025 г. с 18:14:16 до 18:17:15 (по местному времени). *Кадры с IP-камеры* № 1.

**Fig. 2.** Chronology of the eruption on the Western field of Main Pugachev mud volcano on January 15, 2025 from 6:14:16 p.m. to 6:17:15 p.m. (local time). *Images from IP-camera No. 1.* 

произошло благодаря срабатыванию датчика движения в 18:27:17, когда уже новое грязевое поле полностью сформировалось, достигнув в диаметре более 50 м (рис. 3). В это время попрежнему происходили постоянные эксплозии (рис. 3 а–п), но их мощность была небольшой, высота выбросов в редких случаях превышала 5–7 м (рис. 3 f–i). Эти эксплозии практически не прибавляли грязевой массы, фронтальная часть грязевого поля уже не изменялась. В сумерках ухудшилась видимость (рис. 3 n), последние эксплозии еще отмечались в 18:47:57, затем начался снегопад, и проводить дистанционные визуальные наблюдения стало затруднительно. В редкие перерывы между снежными зарядами было видно новообразованное поле, на котором уже не отмечалась эксплозивная активность.



Рис. 3. Хронология извержения на Западном поле Главного Пугачевского грязевого вулкана 15 января 2025 г. с 18:27:24 до 18:42:18 (по местному времени). *Кадры с IP-камеры № 2*.

Fig. 3. Chronology of the eruption on the Western field of Main Pugachev mud volcano on January 15, 2025 from 6:27:24 p.m. to 6:42:18 p.m. (local time). *Images from IP-camera No. 2*.



**Рис. 4.** Новообразованное Западное поле Главного Пугачевского грязевого вулкана: 16 января 2025 г. (а); 15 июня 2025 г. (b). Пунктиром показаны границы полей извержений 23.06.2024 и 15.01.2025. *Фото с IP-камеры* № 2

Fig. 4. The newly formed Western field of Main Pugachev mud volcano: January 16, 2025 (a); June 15, 2025 (b). Dotted lines show the boundaries of the eruption fields of June 23, 2024 and January 15, 2025. *Photo from IP-camera No. 2* 

На следующее утро можно было наблюдать припорошенное снегом свежее Западное грязевое поле Главного Пугачевского грязевого вулкана с концентрически зональной структурой вокруг центра извержения и комковатоячеистой поверхностью (рис. 4 а). Таким оно остается вплоть до середины июня 2025 г., на фотографии видно (рис. 4 b), как грязевое поле январского извержения перекрыло основную часть поля извержения 23 июня 2024 г.

По визуальным дистанционным наблюдениям это извержение характеризуется как типичное для Главного Пугачевского грязевого вулкана. По аналогии с предыдущими его извержениями можно предположить, что при диаметре грязевого поля более 50 м (площадь поверхности около 2000 м<sup>2</sup>) и средней мощности 50–70 см объем грязевой массы составил не менее 1000 м<sup>3</sup>.

В период извержения 15 января 2025 г. и после него на соседнем Восточном поле активность не отмечалась. Последнее извержение на нем было 8 сентября 2024 г. Судя по доступным спутниковым снимкам Sentinel 1–2 и Landsat 8–9 (https://apps.sentinel-hub.com), Малый Северный и Малый Южный грязевые вулканы Пугачевской группы также не проявляли активности.

Полученные видеоматериалы позволили не только впервые зафиксировать особенности извержения Главного Пугачевского грязевого вулкана в зимний период, но и наглядно оценить чрезвычайную опасность таких извержений для туристов. Внезапное и бурное начало извержения грязевого вулкана не оставляет шансов на спасение людей, оказавшихся в этот момент в радиусе 10-20 м от эруптивного центра. В теплый период года грязевой вулкан могут посещать до 30-40 человек в день, в зимнее время 2025 г. было всего несколько посетителей. Они добираются до вулкана на снегоходах, некоторые стараются собрать относительно свежую грязь в центральной части поля, которая имеет высокие бальнеотерапевтические свойства и используется потом для самолечения и профилактики широкого спектра заболеваний.

## Заключение

Группа Пугачевских грязевых вулканов – наиболее активная на о. Сахалин. За период наблюдений здесь отмечено более 20 извержений различной мощности, большая часть которых из-за его труднодоступности исследователями осталась неизученной. В последние годы появилась возможность дистанционно наблюдать за грязевыми вулканами с помощью спутников Sentinel и Landsat, а также автономных бытовых ІР-камер видеонаблюдения. Установлено, что ежегодно тут происходит от 1 до 3 извержений, наиболее активен Главный (Центральный) Пугачевский грязевой вулкан, в пределах которого есть несколько центров извержений, но в последние 20 лет действуют два основных, формирующих так называемые Западное и Восточное поля.

В январе 2025 г. впервые в истории изучения сахалинских грязевых вулканов был зафиксирован процесс зимнего извержения. Уникальные видеоматериалы, полученные с помощью двух находящихся непосредственно на вулкане видеокамер, позволили достоверно проследить этапы активизации грязевого вулкана, интенсивности эксплозий и особенности формирования грязевого поля на устойчивом снежном покрове. Извержение началось внезапно 15 января в 18:15 по местному времени и продолжалось более получаса. Интенсивность эксплозий в первые минуты составляла 1-3 с, при этом высота выбросов грязевых масс и газо-водяной смеси достигала 10-12 м. В результате на снежном покрове сформировалось грязевое поле диаметром более 50 м. При средней мощности грязевой массы 50-70 см ее объем может составить около 1000 м<sup>3</sup>, что относительно немного. В период извержения на Западном поле на других полях Пугачевской группы грязевых вулканов активизация не отмечалась. Стоит отметить, что подобные извержения очень опасны для посетителей грязевого вулкана.

Подробные исследования морфологических особенностей новообразованного грязевого поля и физико-химических характеристик продуктов извержения планируются нами в предстоящий полевой сезон. В будущем необходимо увеличить и технически переоснастить сеть видеонаблюдения, в том числе установить тепловизионные IP-камеры для фиксации температуры грязевой массы при извержении.

## Список литературы

- Chenna R., Prakash V.J., Shubham S. 2025. Seismological features and preliminary damage assessment of the devastating March 28, 2025 Myanmar earthquake: a comprehensive overview: Posted article. SSRN. 24 p. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5219429
- Inoue N., Yamaguchi R., Yagi Yu., Okuwaki R., Bogdan E., Tadapansawut T. 2025. A multiple asymmetric bilateral rupture sequence derived from the peculiar tele-seismic P-waves of the 2025 Myanmar earthquake. Preprint. *Seismica*. https://doi.org/10.31223/ X5MX56
- Мельников О.А. 2011. О динамике и природе Пугачевской группы газоводолитокластитовых («грязевых») вулканов на Сахалине по данным визуальных наблюдений и орогидрографии. Вулканология и сейсмология, 6: 47–59.
- Сирык И.М. 1962. Грязевые вулканы Южного Сахалина – вероятные спутники нефтяных и газовых месторождений. *Геология и геофизика*, 7: 66–75.
- 5. Уэда М. 1938. Грязевой вулкан Магунтан. Ред. М.М. Шукевич. Новоалександровск: Фонды ИМГиГ ДВО РАН. 31 с.
- 6. Смехов Е.М. **1947**. Грязевые вулканы острова Сахалина. Известия Всесоюзного географического общества, 79(4): 493–495.
- 7. Чернышевская З.А. **1958.** О грязевых вулканах в южной части Сахалина. *Труды СахКНИИ СО АН СССР*, 6: 118–130.
- Сирык И.М., Федорченко В.И. 1962. Извержение Пугачевского вулкана на Сахалине осенью 1961 г. *Труды СахКНИИ СО АН СССР*, 12: 103–113.
- Сирык И.М. 1970. Грязевые вулканы. В кн.: Геология СССР. Остров Сахалин. М.: Недра, т. 33(7): 355–368.
- Ильев А.Я., Сапрыгин С.М., Сирык И.М. 1970. Извержение Пугачевского грязевого вулкана в 1967 г. Известия Сахалинского отдела Географического общества СССР, 1: 92–99.
- Ершов В.В., Мельников О.А. 2007. О необычном извержении Главного Пугачевского газоводолитокластитового («грязевого») вулкана на Сахалине зимой 2005 г. Тихоокеанская геология, 26(4): 69–74.

- Мишуринский Д.В., Ершов В.В., Жарков Р.В., Копанина А.В., Козлов Д.Н., Лебедева Е.В., Абдуллаева И.В., Власова И.И., Михалев Д.В. 2018. Геолого-геоморфологические и ландшафтно-экологические особенности Пугачевского грязевого вулкана как основа для организации и информационного сопровождения туристического маршрута (остров Сахалин). *Геосистемы переходных* зон, 2(4): 398–408. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.398-408
- Жарков Р.В., Козлов Д.Н. 2021. Активность Пугачевских грязевых вулканов (о. Сахалин) в 2019–2021 гг. Геодинамические процессы и природные катастрофы: тезисы докладов IV Всерос. науч. конф. с междунар. участием, г. Южно-Сахалинск, 6–10 сентября 2021 г. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, с. 100.

## References

- Chenna R., Prakash V.J., Shubham S. 2025. Seismological features and preliminary damage assessment of the devastating March 28, 2025 Myanmar earthquake: a comprehensive overview: Posted article. SSRN. 24 p. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5219429
- Inoue N., Yamaguchi R., Yagi Yu., Okuwaki R., Bogdan E., Tadapansawut T. 2025. A multiple asymmetric bilateral rupture sequence derived from the peculiar tele-seismic P-waves of the 2025 Myanmar earthquake. Preprint. *Seismica*. https://doi.org/10.31223/ X5MX56
- Mel'nikov O.A. 2011. On the dynamics and origin of. the Pugachevo group of gas-water-lithoclast («mud») volcanoes on Sakhalin Island: Visual observations and orohydrography. *Journal of Volcanology and Seismology*, 5: 409–420. https://doi.org/10.1134/s0742046311060054
- 4. Siryk I.M. **1962.** Mud cones of southern part of Sakhalin as probable accessories of oil and natural gas deposits. *Geologiya i geofizika*, 7: 66–75. (In Russ.).
- 5. Ueda M. **1938.** *Mud volcano Maguntan*. Ed. M.M. Shukevich. Novoalexandrovsk: Funds of IMGG FEB RAS. 31 p. (In Russ.).
- Smekhov E.M. 1947. [Mud volcanoes of Sakhalin Island]. *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva*, 79(4): 493–495. (In Russ.).
- Chernyshevskaya Z.A. 1958. [On mud volcanoes of the southern part of Sakhalin]. *Trudy SakhKNII SO AN* SSSR, 6: 118–130. (In Russ.).
- 8. Siryk I.M., Fedorchenko V.I. **1962.** [Eruption of Pugachevo volcano on Sakhalin, Autumn, 1961]. *Trudy SakhKNII SO AN SSSR*, 12: 103–113. (In Russ.).

- Siryk I.M. 1970. Mud volcanoes. In: Geology of USSR. Sakhalin Island. Moscow: Nedra, vol. 33, pt 7, p. 355– 368. (In Russ.).
- Il'yev A.Ya., Saprygin S.M., Siryk I.M. 1970. [1967 eruption of Pugachev mud volcano in 1967]. *Izvestiya* Sakhalinskogo otdela Geograficheskogo obshchestva SSSR [Bulletin of the Sakhalin Department of USSR Geographical society], 1: 92–99. (In Russ.).
- Ershov V.V., Mel'nikov O.A. 2007. Unusual eruption of the Main Pugachevo gas-water-lithoclastic (mud) volcano in Sakhalin during the winter of 2005. *Tikhookeanskaya geologiya = Pacific Geology*, 1(4): 366–370.
- Об авторе

Жарков Рафаэль Владимирович (https://orcid.org/0000-0002-9753-0627), кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, Россия, rafael\_zharkov@mail.ru

Поступила 23.05.2025 Принята к публикации 11.06.2025

- 12. Mishurinskij D.V., Ershov V.V., Zharkov R.V., Kopanina A.V., Kozlov D.N., Lebedeva E.V., Abdullaeva I.V., Vlasova I.I., Mikhalev D.V. 2018. Geological-geomorphological and landscape ecological features of the Pugachev mud volcano as a basis for organization and information support of the tourist route (Sakhalin Island). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(4): 398–408. (In Russ.).
- Zharkov R.V., Kozlov D.N. 2021. [Activity of Pugachevskiye mud volcanoes (Sakhalin Island) in 2019–2021]. In: Geodynamical processes and natural hazards: Abstracts of the IV National scientific conf., Yuzhno-Sakhalinsk, 6–10 September 2021. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, p. 100. (In Russ.).

## About the Author

**Zharkov, Rafael V.** (https://orcid.org/0000-0002-9753-0627), Cand. of Sci. (Geography), Leading Researcher, Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, rafael\_zharkov@mail.ru

> Received 23 May 2025 Accepted 11 June 2025

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



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

## КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 551.432.7+556.5

https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.2.213-220 https://www.elibrary.ru/kqsgqa

## Новые данные о морфологии котловины озера Кипящее (вулкан Головнина, о. Кунашир, Курильские о-ва): по результатам работ 2023 г.

Д. Н. Козлов<sup>@</sup>, Р. В. Жарков

<sup>®</sup>E-mail: kozlovdn@bk.ru Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. Вулкан Головнина (о. Кунашир, Курильские острова) представляет собой кальдеру, возникшую около 39 тыс. л.н., в которой в настоящее время расположено два вулканогенных озера: кальдерное Горячее и кратерное Кипящее. Исторически сложилось, что морфология наземной части кальдеры была изучена достаточно подробно, а ее подводный рельеф – рельеф озерных котловин – исследовался несколькими научными коллективами лишь эпизодически, эти сведения имели весьма упрощенный характер, необходимый для таких задач, как, например, оценка потенциала сероносных районов. Данные по морфометрическим параметрам за разные годы не сопоставлялись. С середины 2000-х годов эту работу начал проводить коллектив лаборатории вулканологии и вулканоопасности ИМГиГ ДВО РАН. До 2023 г. выполнена серия таких работ на озерах кальдеры. В этих исследованиях впервые с помощью эхолота был получен уникальный высокоточный материал о морфометрических параметрах котловин в цифровом виде. Целью исследований в 2023 г. было установить современное строение котловины оз. Кипящее и провести предварительную оценку изменений в морфологии котловины за период наблюдений с 2005 г. Впервые представлена высокоточная батиметрическая модель оз. Кипящее с шагом изобат 0.5 м, построенная на основе 23 эхолотных профилей со спутниковой привязкой. По состоянию на сентябрь 2023 г. максимальная длина озера составила 330 м, ширина 190 м, длина береговой линии 870 м, площадь зеркала 0.0462 км<sup>2</sup>, максимальная глубина 24 м. Наши предыдущие работы, выполненные два десятилетия назад, показывали максимальные отметки глубины в 16 м, а по промерам камчатских коллег в 2020-2021 гг. была зафиксирована отметка 25 м. Таким образом, за период наблюдений с 2005 г. в воронке оз. Кипящее произошли изменения глубины минимум на 50 %, что характеризует водоем как один из самых динамичных в регионе.

**Ключевые слова:** вулкан Головнина, озеро Кипящее, эхолот, морфология, батиметрическая съемка, газогидротермы

## New data on the morphology of Kipyashchee lake (Golovnin volcano, Kunashir Isl., Kuril Islands) based on the 2023 study results

Dmitrii N. Kozlov<sup>@</sup>, Rafael V. Zharkov <sup>@</sup>E-mail: kozlovdn@bk.ru

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

**Abstract.** Golovnin volcano (Kunashir Island, Kuril Islands) is a caldera that arose approximately 39 thousand years ago, in which two volcanic lakes are currently located: Goryachee caldera lake and Kipyashchee crater lake. The morphology of the terrestrial part of the caldera has been studied sufficiently, whereas its underwater relief – the relief of lake basins – has been studied by several scientific teams only sporadically. This information was rather simplified, which was necessary for such tasks as assessing the potential of sulfur-bearing areas. Data on morphometric parameters

for different years were not compared. Since the mid-2000s, such study has been carried out by the team of the Laboratory of volcanology and volcanic hazard of the IMGG FEB RAS, having completed a series of studies on the lakes of the caldera until 2023. In these studies, for the first time a unique high-precision digital material was obtained using a sonar, describing in detail the morphometric parameters of the basins. The aim of the study in 2023 was to establish the current structure of the Kipyashchee lake basin and to conduct a preliminary assessment of changes in the morphology of the basin over the observation period since 2005. In this paper, we analyzed current parameters and changes in the morphology of the Kipyashchee lake basin, as well as the events that occurred during the period of the observations since 2005, and compared these results with the studies of other authors. A high-precision bathymetric model of the Kipyashchee lake is presented for the first time with an isobath spacing of 0.5 m, built on the basis of 23 sonar profiles with satellite reference. As of September 2023, the maximum length of the lake was 330 m, the width was 190 m, the length of the coastline was 870 m, the mirror area was 0.0462 km<sup>2</sup>, and the maximum depth was 24 m. Our previous studies, carried out two decades ago, showed a maximum depth of 16 m, and, according to the measurements of our colleagues from Kamchatka in 2020–2021, the depth of 25 m was recorded. Thus, during the period of observations since 2005, there were changes in the depth of at least 50 % in the Kipyashchee lake crater, which characterizes the reservoir as one of the most dynamic in the region.

Keywords: Golovnin volcano, Kipyashchee lake, sonar, morphology, bathymetric survey, gas hydrotherms

Для цитирования: Козлов Д.Н., Жарков Р.В. Новые данные о морфологии котловины озера Кипящее (вулкан Головнина, о. Кунашир, Курильские о-ва): по результатам работ 2023 г. Геосистемы переходных зон, 2025, т. 9, № 2, с. 213–220. https://doi. org/10.30730/gtrz.2025.9.2.213-220; https://www.elibrary.ru/kqsgqa

## Финансирование и благодарности

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН по темам «Вулканизм Сахалина и Курильских островов: мониторинг, хронология активности, вещественный состав продуктов, гидротермальные системы» (FWWM-2021-0003) и «Вулканизм Сахалина и Курильских островов: хронология, петролого-геохимические особенности, гидротермальные проявления, мониторинг вулканической активности» (FWWM-2024-0003).

Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам заповедника «Курильский» за неоценимую помощь при организации полевых работ в кальдере вулкана Головнина, особенно директору Александру Александровичу Кислейко и заместителю директора по научной работе Елене Викторовне Линник.

## Введение

Вулкан Головнина (547 м) расположен на юге о. Кунашир (рис. 1 а). По морфогенетической классификации вулканов Курильских островов [2] он относится к кальдерным пемзово-пирокластическим вулканам. Около 39 тыс. л.н. в результате мощного извержения и разрушения постройки вулкана образовалась кальдера, при этом было выброшено около 15 км<sup>3</sup> андезидацитовой пирокласти*For citation:* Kozlov D.N., Zharkov R.V. New data on the morphology of Kipyashchee lake (Golovnin volcano, Kunashir Isl., Kuril Islands) based on the 2023 study results. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 2, pp. 213–220. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.2.213-220; https://www.elibrary.ru/kqsgqa

## **Funding and Acknowledgements**

The study was carried out within the framework of the state task of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS "Volcanism of Sakhalin and the Kuril Islands: monitoring, chronology of activity, material composition of products, and hydrothermal systems" (FWWM-2021-0003) and "Volcanism of Sakhalin and the Kuril Islands: chronology, petrological and geochemical features, hydrothermal manifestations, and monitoring of volcanic activity" (FWWM-2024-0003).

The authors express their sincere gratitude to the team of the Kurilsky Nature Reserve for their invaluable assistance in organizing field work in the Golovnin volcano caldera, especially to Director Alexander Kisleyko and Deputy Director Elena Linnik.

ки [1]. По данным наших последних измерений, выполненных при помощи открытых веб-геоинформационных и картографических сервисов SAS-Planet и Google Earth Pro, диаметр кальдеры достигает более 10 км в основании и 4.5 км по гребню. Дно ее преимущественно ровное с небольшим уклоном на северо-восток, значительную часть кальдеры занимает вулканогенное озеро Горячее. В центре кальдеры вулкана Головнина (рис. 1 б) расположено небольшое кратерное озеро Кипящее и два экструзивных купола – Центральный Восточный и Центральный Западный, подобные купола имеются в северо-западной (Подушечный) и юго-восточной (Крутой) частях кальдеры [3].

Кратер, заполненный водами озера (рис. 2), врезан в озерные отложения и южную часть экструзивного купола Центральный Восточный. В настоящее время на периферии куполов и в озерах наблюдается газогидротермальная активность, внутри кальдеры и на побережье выделяют шесть наземных и одно подводное гидротермальное поле.

Морфология наземной части кальдеры изучена достаточно подробно, а ее подводный рельеф в разные годы исследовался при помощи лота несколькими научными коллективами: оз. Горячее промеряли С.М. Фазлуллин



**Рис. 1.** Вулкан Головнина (о. Кунашир, Курильские острова): район проведения работ (а); расположение вулканогенных озер в центральной части кальдеры вулкана Головнина (б); схема промеров цифровым эхолотом на оз. Кипящее (в) на спутниковом снимке © 2022 Maxar Technologies из Google Earth Pro от 23.07.2021 г. Экструзивные купола (по [3]): 1 – Центральный Восточный; 2 – Центральный Западный; 3 – Подушечный; 4 – Крутой.

**Fig. 1.** Golovnin volcano (Kunashir Island, Kuril Islands): study area (a); location of volcanic lakes in the central part of the Golovnin volcano caldera (b); scheme of measurements by a digital sonar on Kipyashchee lake (c) from a satellite image © 2022 Maxar Technologies from Google Earth Pro dated 07/23/2021. Extrusive domes according to [3]: 1, Tsentral'nyy Vostochnyy; 2, Tsentral'nyy Zapadnyy; 3, Podushechnyy; 4, Krutoy.



**Рис. 2.** Кратерное озеро Кипящее. Панорамный снимок выполнен с юго-восточной части кратера. 2023 г. *Фото Д.Н. Козлова* **Fig. 2.** Kipyashchee crater lake. A panoramic image taken from the southeastern part of the crater. 2023. *Photo by D. Kozlov* 

и В.В. Батоян [4], оз. Кипящее – А.К. Марков [5], А.В. Зотов, В.И. Сорокин и И.Б. Никитина [6]. В ИМГиГ ДВО РАН работы по изучению морфологии кальдерных озер ведутся с 2005 г. [7-9]. В 2020-2021 гг. сотрудниками ИВиС ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский) в ходе полевых исследований [10; https:// kurilskiy.ru/tpost/9095m31pl2-kamchatskievulkanologi-issledovali-vulk; https://kurilskiy.ru/ tpost/ec7sm37n91-polucheni-novie-dannie-povulkanicheskim] были получены новые данные, указывающие на значительные изменения морфологии котловины оз. Кипящее. Важно также отметить работу Н.Г. Разжигаевой и Л.А. Ганзей [11], в которой они получили актуальную датировку образования воронки, занятой оз. Кипящее, -1 тыс. л.н. [11].

Целью наших исследований в сентябре 2023 г. было путем детальных промеров цифровым эхолотом (рис. 1 в) уточнить современное строение котловины оз. Кипящее и провести предварительную оценку изменений морфологии котловины этого уникального вулканогенного водоема за период наблюдений с 2005 г.

## Материалы и методы

В сентябре 2023 г. нами выполнены плановые вулканологические работы по обследованию оз. Кипящее. Основной составляющей этих работ была батиметрическая съемка озерной котловины при помощи цифрового эхолота Lowrance LMS-527 cDF iGPS (частота излучателя 200 кГц) со спутниковой привязкой профилей, сьемка выполнялась с маломерного судна. Данная методика ранее успешно апробирована в наших исследованиях [7–9].

## Результаты и обсуждение

По данным, полученным нами в 2005 г. [7], в центральной части оз. Кипящее находилась воронка глубиной около 16 м (рис. 3), со



**Рис. 3.** Батиметрическая карта озера Кипящее по данным [7]. **Fig. 3.** Bathymetric map of Kipyashchee lake according to data from [7].

дна которой поднимались газогидротермальные струи.

В июле 2021 г. сотрудниками ИВиС ДВО РАН было выполнено эхолотное профилирование, по результатам которого построена батиметрическая карта и рассчитаны морфометрические параметры оз. Кипящее. Отметим, что максимальная глубина озера – 25 м (рис. 4) – превысила предыдущее значение за 2005 г. (16 м) более чем наполовину. Рассчитанный в 2021 г. объем водных масс составил 2.9 × 10<sup>5</sup> м<sup>3</sup> [10].

По результатам эхолотной съемки оз. Кипящее в сентябре 2023 г. нами получены 23 высокоточных профиля со спутниковой привязкой, которые покрыли практически всю центральную часть котловины озера (рис. 1 в) и представляют собой детализированное изображение озерной котловины в вертикальной плоскости. На основе обработки и интерпретации полученного массива профилей была составлена батиметрическая карта водоема (рис. 5). В ходе работ выполнен анализ профилей на наличие и интенсивность подводных газогидротермальных выходов и эксплозивных

воронок в озере, рассчитаны их морфометрические параметры. В результате получены представления о современном морфологическом облике оз. Кипящее. Его основные морфометрические параметры следующие: максимальная длина зеркала озера 330 м, ширина 190 м, длина береговой линии 870 м, площадь зеркала 0.0462 км<sup>2</sup>. Максимальная глубина в 24 м была зафиксирована на небольшом участке днища котловины, в ее центральной части. Котловина оз. Кипящее имеет форму воронки, сжатой в горизонтальной плоскости, с существенным углублением в центральной части. Важно отметить, что на новой, высокодетализированной карте нам впервые удалось выделить характерный микрорельеф, представленный набором из 5 небольших воронок (обозначены римскими цифрами на рис. 5), осложняющих рельеф основной воронки-котловины. К каждой из этих воронок приурочены интенсивные подводные газогидротермы (ПГ). В центре водоема сосредоточены 4 из 5 найденных и выделенных нами в 2023 г. воронок, каждая из которых представляет собой четко оконтуренную на карте и эхограммах структуру. Эти воронки



**Рис. 4.** Батиметрическая карта оз. Кипящее в 2021 г. [10]. **Fig. 4.** Bathymetric map of Kipyashchee lake in 2021 [10].



Рис. 5. Батиметрическая карта оз. Кипящее, изобаты даны через 0.5 м. Римскими цифрами обозначены обнаруженные в 2023 г. воронки. 1–19 – изобаты.

**Fig. 5.** Bathymetric map of Kipyashchee lake, isobaths are given every 0.5 m. Roman numerals indicate craters discovered in 2023. 1–19 indicate isobaths.

объединены в рельефе дна изобатой 18 м, а их наиболее глубокие части достигают отметок 19–24 м. Помимо них на севере озера отмечена отдельная небольшая воронка глубиной около 15 м (рис. 5, *I*). В нескольких точках на эхолотных профилях прослеживаются подводные газогидротермы (ПГ на рис. 6), поднимающиеся со дна озерной котловины. Их можно часто визуально наблюдать и на поверхности озера.

В дальнейшем мы планируем провести сравнительный анализ имеющихся материалов по морфологии оз. Кипящее за разные годы, с учетом как современных исследований за три последних десятилетия, так и работ авторов советского периода и более ранних японских трудов. Помимо фактического сравнения считаем важным определение условий, при которых происходили изменения морфологии озерной котловины: в каких случаях это происходило стремительно и было связано с усилением поствулканической активности, а в каких, возможно, было обусловлено и другими факторами, например антропогенными, которые имели место непосредственно на берегу озера



**Рис. 6.** Фрагменты эхолотных профилей по галсам АБ и ВГ на оз. Кипящее (на врезке показано положение профилей). ПГ – подводные газогидротермы.

Fig. 6. Fragments of sonar profiles along AB and B $\Gamma$  lines on Kipyashchee lake (the inset shows the position of the profiles).  $\Pi\Gamma$ , underwater gas and hydrothermal vents.

(разработка серного месторождения). В настоящее время мы можем говорить об отсутствии каких-либо зафиксированных свидетельств по гидротермальным и/или фреатическим извержениям за последние десятилетия, поскольку исследователями, туристами и работниками заповедника «Курильский» не отмечены заплески по берегам водоема, непосредственные отложения выбросов, взрывов, излияний серы и других процессов, способных резко изменить котловину озера. Вероятно, процессы изменения морфологии идут постепенно, хотя и протекают быстрее, чем в обычных озерах, газогидротермы интенсивнее вымывают и переотлагают донные отложения, мощность которых, по данным А.К. Маркова [5], достигает 9 м.

## Заключение

Работы, проведенные нами в сентябре 2023 г. на оз. Кипящее, подтвердили существенные изменения морфологии его котловины. В результате наших промеров впервые составлена актуальная высокодетализированная батиметрическая карта оз. Кипящее с шагом изобат 0.5 м, подсчитаны его основные морфометрические параметры, выделены отдельные подводные воронки и выходы газогидротерм. Максимальная длина зеркала озера составила 330 м, ширина – 190 м, длина береговой линии – 870 м, площадь зеркала – 0.0462 км<sup>2</sup>, а максимальная глубина – 24 м. В пределах озерной котловины нами впервые выделены 5 воронок, осложняющих ее рельеф. К этим воронкам приурочены интенсивные подводные газогидротермы, которые фиксируются эхолотом на профилях и наблюдаются визуально на поверхности озера.

В дальнейшей работе предполагается выяснить причины увеличения глубины озера. До середины 2000-х годов она составляла 16– 17 м, а измерения 2021–2023 гг. показывают максимальные глубины до 24–25 м. Научная значимость этих исследований связана с тем, что динамика изменений морфометрических параметров активного кратерного озера является важным индикатором как прошедших, так и потенциально возможных поствулканических процессов в кальдерном комплексе вулкана Головнина.

## Список литературы

- 1. Лаверов Н.П. (ред.) **2005.** *Новейший и современный вулканизм на территории России*. М.: Наука, 604 с.
- 2. Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И. **1989.** Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенез. М.: Наука, 239 с.
- Мархинин Е.К. 1959. Вулканы острова Кунашир. Труды лаборатории вулканологии АН СССР, 17: 64–110.
- 4. Фазлуллин С.М., Батоян В.В. **1989.** Донные осадки кратерного озера вулкана Головнина. *Вулканология и сейсмология*, 2: 44–55.
- Марков А.К. 1958. Геологические условия, поиски и разведка некоторых вулканических месторождений самородной серы. Записки Горного института, 33(2): 194–208.
- Зотов А.В., Сорокин В.И., Никитина И.Б. 1988. Некоторые особенности современной гидротермальной деятельности в кальдере вулк. Головнина (о-в Кунашир). В кн.: Современные гидротермы и минералообразование. М.: Наука, с. 54–69.
- Козлов Д.Н., Белоусов А.Б. 2007. Современные методы исследований внутрикальдерных озер активных вулканов (на примере вулкана Головнина, о. Кунашир, Курильские о-ва). В кн.: Материалы XIII научного совещания географов Сибири и Дальнего Востока, 27–29 ноября 2007, Иркутск. Иркутск: ИГ СО РАН, т. 1, с. 142–144.
- Козлов Д.Н., Жарков Р.В. 2010. Морфология и генезис озер кальдерных комплексов Головнина и Заварицкого (Курильские острова). Вестник ДВО РАН, 3: 103–106.
- Kozlov D.N., Lebedeva E.V. 2024. Morphology of crater and caldera lakes in the Far Eastern region of Russia and the features of their development. *Journal* of *Mountain Science*, 21(4): 1246–1258. https://doi. org/10.1007/s11629-023-8253-9
- Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Волошина Е.В., Тарасов К.В., Мельников Д.В., Котенко Т.А., Эрдниева Д.Ю. 2023. Кратерное озеро Кипящее в кальдере вулкана Головнина: геохимия воды и газов, вынос магматических летучих (о. Кунашир). Вулканология и сейсмология, 1: 3–20. https://doi.org/10.31857/ s0203030622700018; EDN: https://elibrary.ru/ARDAAU
- 11. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А. **2006.** Обстановки осадконакопления островных территорий в плейстоцен-голоцене. Владивосток: Дальнаука, 247 с.

## References

- 1. Laverov N.P. (ed.) **2005.** [*Most recent and modern volcanism on the territory of Russia*]. Moscow: Nauka, 604 p. (In Russ.).
- Fedorchenko V.I., Abdurakhmanov A.I., Rodionova R.I. 1989. [Volcanism of the Kuril island arc: Geology and petrogenesis]. Moscow: Nauka, 239 p. (In Russ.).
- Markhinin E.K. 1959. Volcanoes of Kunashir Island. Proceedings of the Volcanology Laboratory of the USSR Academy of Sciences, 17: 64–110. (In Russ.).
- 4. Fazlullin S.M., Batoyan V.V. **1989.** [Bottom sediments of the crater lake of Golovnin volcano]. *Volcanology and Seismology*, 2: 44–55. (In Russ.).
- Markov A.K. 1958. [Geological conditions, prospecting and exploration of some volcanic deposits of native sulfur]. *Zapiski Gornogo Instituta*, 33(2): 194–208. (In Russ.).
- Zotov A.V., Sorokin V.I., Nikitina I.B. 1988. [Some features of modern hydrothermal activity in the caldera of Golovnin volcano (Kunashir Island)]. In: *Modern hydrothermal springs and mineral formation*. Moscow: Nauka, p. 54–69. (In Russ.).
- 7. Kozlov D.N., Belousov A.B. **2007.** [Modern methods of studying intracaldera lakes of active volcanoes (us-

## Об авторах

Козлов Дмитрий Николаевич (https://orcid.org/0000-0002-8640-086X), кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, Россия, kozlovdn@bk.ru

Жарков Рафаэль Владимирович (https://orcid.org/0000-0002-9753-0627), кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, Россия, rafael zharkov@mail.ru

Поступила 07.05.2025 Принята к публикации 16.06.2025 ing the example of Golovnin volcano, Kunashir Island, Kuril Islands)]. In: *Proceedings of the XIII scientific conference of geographers of Siberia and the Far East*, *November 27–29, 2007, Irkutsk.* Irkutsk: IG SB RAS, vol. 1, p. 142–144. (In Russ.).

- Kozlov D.N., Zharkov R.V. 2010. Morphology and genesis of the lakes of Golovnin and Zavaritsky calderal complexes (Kuril Islands). *Vestnik DVO RAN* = *Vestnik of the FEB RAS*, 3: 103–106. (In Russ.).
- Kozlov D.N., Lebedeva E.V. 2024. Morphology of crater and caldera lakes in the Far Eastern region of Russia and the features of their development. *Journal* of Mountain Science, 21(4): 1246–1258. https://doi. org/10.1007/s11629-023-8253-9
- Kalacheva E.G., Taran Yu.A., Voloshina E.V., Tarasov K.V., Melnikov D.V., Kotenko T.A., Erdnieva D.Yu. 2023. Crater Lake Kipyashchee in the caldera of Golovnin volcano: Water and gas geochemistry, output of magmatic volatiles (Kunashir Island). *Journal of Volcanology and Seismology*, 17: 1–16. https://doi.org/10.1134/S0742046322700063
- Razzhigaeva N.G., Ganzey L.A. 2006. Sedimentary environments on islands in Pleistocene-Holocene. Vladivostok: Dal'nauka, 247 p. (In Russ.).

## About the Authors

Kozlov, Dmitrii N. (https://orcid.org/0000-0002-8640-086X), Cand. of Sci. (Geography), Senior Researcher, Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, kozlovdn@bk.ru

Zharkov, Rafael V. (https://orcid.org/0000-0002-9753-0627), Cand. of Sci. (Geography), Leading Researcher, Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, rafael zharkov@mail.ru

> Received 7 May 2025 Accepted 16 June 2025