

ISSN 2541-8912 (Print)
ISSN 2713-2161 (Online)

ГЕОСИСТЕМЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН

GEOSYSTEMS
of Transition Zones

2023 **Том 7** **№ 2**

Научный журнал

Учредитель и издатель:

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения
Российской академии наук

Издаётся с января 2017 г.

Периодичность издания 4 раза в год

Scientific journal

Founder and Publisher:

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

Published since January 2017

Periodicity: Quarterly

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

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

Журнал:

- индексируется в **Российском индексе научного цитирования (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 квартиля (K2).

The Journal is:

- indexed in **Russian Science Citation Index (RISC)**;
- 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 quartile in the VAK list.

Адрес учредителя и издателя

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

Postal address

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

© ИМГиГ ДВО РАН, 2023

Редакционная коллегия*Главный редактор*

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

Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

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

- **Адушкин Виталий Васильевич**, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, Институт динамики геосфер РАН; Московский физико-технический институт, Москва
- **Алексанин Анатолий Иванович**, д-р техн. наук, Институт автоматизации 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 автоматизации 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
- **Марапупец Юрий Валентинович**, д-р физ.-мат. наук, доцент, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, Паратунка
- **Огородов Станислав Анатольевич**, профессор РАН, д-р геогр. наук, чл.-корр. РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
- **Плехов Олег Анатольевич**, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
- **Разжигаяева Надежда Глебовна**, д-р геогр. наук, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток
- **Ребetsкий Юрий Леонидович**, д-р физ.-мат. наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва
- **Родкин Михаил Владимирович**, д-р физ.-мат. наук, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва
- **Рыбин Анатолий Кузьмич**, д-р физ.-мат. наук, Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия
- **Сасорова Елена Васильевна**, д-р физ.-мат. наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Editorial Board*Editor-in-Chief*

Peter O. Zav'yalov, Corr. Member of the RAS, Dr. Sci. (Geography), Deputy Director, Head of the Laboratory of land-ocean interactions and the anthropogenic impact, P.P. Shirshov Institute of Oceanology of 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 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 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 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 RAS, Perm'
- **Nadezhda G. Razjigaeva**, Dr. Sci. (Geogr.), Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok
- **Yuri L. Rebetskiy**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow
- **Mikhail V. Rodkin**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of RAS, Moscow
- **Anatoly K. Rybin**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Research Station of RAS in Bishkek City, Bishkek, Kyrgyzstan
- **Elena V. Sasorova**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow

Редакционная коллегия

- **Сергеева Ирина Вячеславовна**, д-р биол. наук, профессор, Саратовский государственный аграрный университет 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
- **Христофорова Надежда Константиновна**, д-р биол. наук, профессор, чл.-корр. РАЕН, Заслуженный деятель науки РФ, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток
- **Шакиров Ренат Белалович**, д-р геол.-минер. наук, доцент, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток
- **Шевченко Георгий Владимирович**, д-р физ.-мат. наук, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск
- **Шеменда Александр Ильич**, профессор исключительного класса, Университет Ниццы София-Антиполис, Ницца, Франция
- **Ярмолук Владимир Викторович**, академик РАН, д-р геол.-минер. наук, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

Editorial Board

- **Irina V. Sergeeva**, Dr. Sci. (Biology), Professor, Saratov State Vavilov Agrarian University, 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 RAS, Nizhny Novgorod; Lobachevsky University, Nizhny Novgorod
- **Nadezhda K. Khristoforova**, Dr. Sci. (Biology), Professor, Corr. Member of RAES, Far Eastern Federal University, Vladivostok
- **Renat B. Shakirov**, Dr. Sci. (Geol. and Miner.), Associate Professor, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the FEB RAS, Vladivostok
- **Georgiy 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 RAS, Moscow

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-73243 от 13.07.2018 г. Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Переводчик Гачесова Галина Сергеевна

Редактор к.ф.н. **Низяева Галина Филипповна**
Дизайн **Леоненкова Александра Викторовна**
Компьютерная верстка **Филимонкина Анна Александровна**
Корректор **Гачесова Галина Сергеевна**

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

Формат 60 × 84 /8. Усл. печ. л. 12,6.
 Тираж 150 экз. Заказ 8018. Свободная цена.
 Дата выхода в свет 28.06.2023.

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

По вопросам распространения обращаться также в редакцию.

Translator Galina S. Kachesova

Editor **Galina Ph. Nizyaeva**, Cand. Sci. (Phylogeny)
Design **Alexandra V. Leonenkova**
Desktop publishing **Anna A. Filimonkina**
Proofreader **Galina S. Kachesova**

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 12,6.
 Number of copies 150. Order no. 8018. Free price.
 Date of publishing 28.06.2023.

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

Please also contact the Editorial Office for distribution.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

Геофизика. Сейсмология

Л.М. Богомолов, Д.В. Костылев, Н.В. Костылева, С.А. Гуляков, И.П. Дудченко, П.А. Каменев, Н.С. Стовбун. Наблюдения обратного сейсмoeлектрического эффекта II рода при электрoзoндирoвaнияx в районе Центрально-Сахалинского разлома 115

Д.А. Сафоно́в, Е.П. Семёнова. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2022 году 132

Океанология

В.М. Кайстренко. Проблема оценки точности параметров цунамиактивности 149

Д.П. Ковалев, П.Д. Ковалев, В.С. Зарочинцев, К.В. Кириллов. Длинные волны на шельфе юго-западного побережья о. Сахалин 160

Механика деформируемого твердого тела

М.А. Мищенко, И.А. Ларионов, В.А. Васькин. Оптическая система регистрации прогиба образца в испытаниях на изгиб 175

П.Г. Великанов, Ю.П. Артюхин. Исследование по динамике рамных конструкций 180

Геоинформатика, картография. Геоэкология

Т.К. Музыченко. Оценка эколого-хозяйственного баланса в водосборе залива Петра Великого (Японское море) 196

Экология

А.К. Ежкин, И.А. Галанина, Ф.А. Романюк. Первые сведения о лишайниках с острова Матуа, Дальний Восток России. Семейства *Physciaceae* и *Caliciaceae* [На англ. яз.] 206

Вулканология

МОНИТОРИНГ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

А.В. Дегтерев, М.В. Чибисова. Эксплозивная активность вулкана Чикурачки в январе–феврале 2023 г. (о. Парамушир, Северные Курильские острова) 212

Geophysics. Seismology

L.M. Bogomolov, D.V. Kostylev, N.V. Kostyleva, S.A. Gulyakov, I.P. Dudchenko, P.A. Kamenev, N.S. Stovbun. Observations of the inverse seismoelectric effect of the second kind during electrical sounding in the Central Sakhalin fault zone 115

D.A. Safonov, E.P. Semenova. Seismicity of the South Far East of Russia in 2022 132

Oceanology

V.M. Kaistrenko. The problem of estimating the accuracy of the tsunami activity parameters 149

D.P. Kovalev, P.D. Kovalev, V.S. Zarochintsev, K.V. Kirillov. Long waves on the shelf of the southwest coast of Sakhalin Island 160

Mechanics of deformable solids

M.A. Mishchenko, I.A. Larionov, V.A. Vas'kin. Optical system for recording specimen deflection in bending tests 175

P.G. Velikanov, Yu.P. Artyukhin. Research on the dynamics of frame structures 180

Geoinformatics and cartography. Geoecology

T.K. Muzychenko. Ecological and economic balance evaluation of Peter the Great Gulf basin (Sea of Japan) 196

Ecology

A.K. Ezhkin, I.A. Galanina, F.A. Romanyuk. First data on lichens from Matua Island, Far East of Russia. Families *Physciaceae* and *Caliciaceae* [In English] 206

Volcanology

MONITORING OF GEOLOGICAL HAZARDS

A.V. Degterev, M.V. Chibisova. Explosive activity of Chikurachki volcano in January–February of 2023 (Paramushir Island, Northern Kuril Islands) 212

© Авторы 2023 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2023. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.370+550.379+550.34016

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.115-131>
<https://www.elibrary.ru/bogdqg>

Наблюдения обратного сейсмoeлектрического эффекта II рода при электрoзондированиях в районе Центрально-Сахалинского разлома*

Л. М. Богомолов*¹, Д. В. Костылев^{1,2}, Н. В. Костылева¹, С. А. Гуляков¹,
И. П. Дудченко¹, П. А. Каменев¹, Н. С. Стoвбун¹

*E-mail: bleom@mail.ru

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

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

Резюме. Представлены результаты экспериментов по электрoзондированию приповерхностного слоя земной коры в разломной зоне с регистрацией сейсмоакустических и сейсмических шумов в ближней зоне у источника (возбуждающего диполя). Эксперименты проведены в 2021–2022 гг. в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием разработанного в ИМГиГ ДВО РАН источника электрических импульсов, мощностью до 3 кВт. Цель была исследовать сейсмоакустические проявления реакции среды на зондирование импульсами тока силой 5–13 А. Генераторное устройство обеспечивало силу тока в диполе существенно выше ее характерных значений в случае зондирования при электрoразведке методами со-противлений, а также при обычной сейсмoeлектрoразведке. При этом диапазон токовых амплитуд был намного меньше, чем в случае глубинных зондирований с использованием геофизических МГД-генераторов или сверхмощных электроимпульсных устройств. До настоящего времени обратный сейсмoeлектрический эффект оставался практически неисследованным при токах в «промежуточном» диапазоне ~10 А и при масштабах порядка нескольких сотен метров. Наличие или отсутствие реакции среды на электрoзондирования устанавливалось по записям молекулярно-электронных приборов (производитель ООО «R-sensors», Россия): широкополосного сейсмометра СМЕ-6111 и гидрофона, установленных на расстоянии около 50 м от одного из полюсов возбуждающего электрического диполя. Обнаружено возрастание среднего уровня сейсмоакустического шума при электрoзондированиях, что по существу является разновидностью обратного сейсмoeлектрического эффекта II рода (возбуждение упругих волн при прохождении электрического тока в двухфазной среде). Подобное проявление реакции среды в ближней зоне около одного из электродов диполя на пропускание импульсов тока ранее не отмечалось. При этом прирост уровня шума происходит практически без задержек после начала электрoзондирований, что находится в соответствии с ранее полученными результатами об откликах сейсмоакустической эмиссии на мощные импульсы тока, которые применялись для глубинных зондирований в Северном Тянь-Шане.

Ключевые слова: электрoзондирование, сейсмический шум, сейсмоакустическая реакция среды, сейсмoeлектрический эффект

Observations of the inverse seismoelectric effect of the second kind during electrical sounding in the Central Sakhalin fault zone*

Leonid M. Bogomolov*¹, Dmitry V. Kostylev^{1,2}, Natalya V. Kostyleva¹, Sergey A. Gulyakov¹,
Ilya P. Dudchenko¹, Pavel A. Kamenev¹, Nikolay S. Stovbun¹

*E-mail: bleom@mail.ru

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

² Sakhalin Branch, FRC “United Geophysical Survey of RAS”, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

* Полный текст данной статьи на английском языке размещен на сайте журнала [The full text of this article in English can be found on the website of the «Geosystems of Transition Zones» journal]: <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2023-2-1.pdf>

Abstract. The results of experiments on electrical sounding of the near-surface layer of the Earth's crust in the fault zone, which have involved a recording of seismoacoustic and seismic noise in the close zone near the source (the primary dipole source), are represented. The experiments were carried out in 2021-2022 in the southern part of the Central Sakhalin fault with the use of the generator of electric pulses developed at IMGG FEB RAS, output electric power being up to 3 kW. The aim was to reveal seismoacoustic signatures of the medium reaction to the soundings with current pulses of 5–13 A. The generator provided significantly higher current in the dipole than its typical characteristics in the case of soundings for electrical exploration by resistance methods, as well as in the case of conventional seismic and electrical exploration. At the same time, the range of current amplitudes was much smaller in comparison with the case of a deep sounding based on application of geophysical MHD generators or other extra high-power electric pulses units. Up to now, the inverse seismoelectric effect has remained practically unexplored at currents in the “intermediate” range of ~10 A and scale lengths of the order of few hundreds of meters. The presence or absence of the medium reaction to electrical soundings was distinguished by the records of molecular-electronic devices developed by R-sensors LLC: the CME-6111 broadband seismometer and the hydrophone, installed at a distance of about 50 m from one of the poles of the electric dipole source. An increase in the average level of seismoacoustic noise during electrical soundings was revealed, which is essentially a variety of the inverse seismoelectric effect of the second kind (excitation of elastic waves during an electric current run in a two-phase medium). Previously, no similar signature of medium reaction to the current pulses was noted in the close zone adjacent to one of the dipole electrodes. The noise level increase occurs almost without delay after the start of electrical soundings, and this is in accordance with the previously obtained results on the responses of seismic acoustic emission to powerful current pulses, which were used for a deep sounding in the Northern Tien Shan.

Keywords: electrical sounding, seismic noise, medium seismoacoustic reaction, seismoelectric effect

Для цитирования: Богомолов Л.М., Костылев Д.В., Костылева Н.В., Гуляков С.А., Дудченко И.П., Каменев П.А., Стовбун Н.С. Наблюдения обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода при электроразведках в районе Центрально-Сахалинского разлома. Геосистемы переходных зон, 2023, т. 7, № 2, с. 115–131. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.115-131>; <https://www.elibrary.ru/bogdqg>

For citation: Bogomolov L.M., Kostylev D.V., Kostyleva N.V., Gulyakov S.A., Dudchenko I.P., Kamenev P.A., Stovbun N.S. Observations of the inverse seismoelectric effect of the second kind during electrical sounding in the Central Sakhalin fault zone. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 2, pp. 115–131. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.115-131>; <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2023-2-1.pdf>

Благодарности

Авторы признательны Ю.В. Марапульту и С.Б. Турунтаеву за предоставленную возможность провести эксперименты на площадках стационара «Карымшина» и ГФО «Михнево», А.С. Закупину за обсуждение результатов.

Acknowledgements

The authors are grateful to Yury V. Marapulets and Sergey B. Turuntayev for the opportunity to conduct experiments at the sites of the «Karymshyna» station and «Mikhnevo» GPO, and to Alexander S. Zakupin for discussing the results.

Введение

Взаимодействие между сейсмическими волнами и электрическими полями уже долгое время представляет практический интерес, поскольку может стать основой новых методов изучения глубинных процессов. Сейсмическое и электрическое поля – одни из самых изученных типов физических полей, которые существуют в геофизической среде, широко используются на практике и которые можно эффективно создавать и измерять. Тем не менее сложность геомеханических и физических процессов в неоднородных средах, их восприимчивость к внешним воздействиям физических полей определяют актуальность дальнейшего исследования преобразований этих полей [1].

Различают два рода сейсмоэлектрических эффектов: первый – изменение электросопротивления пород при воздействии упругих полей (прохождении сейсмических волн), родни эффекту микрофона, а второй – возникновение электрического поля, т.е. градиента разности потенциала, в среде при таком же воздействии. Прямой сейсмоэлектрический эффект второго рода был открыт А.Г. Ивановым при полевых геофизических исследованиях в 1939–1940 гг. [2, 3]. Он обнаружил возникновение электризации при прохождении упругих волн через влажную горную породу и предположил, что природа сейсмоэлектрического эффекта связана с тем, что на границе раздела жидкой и твердой фаз (минерального раствора и твердых частиц горной породы) присутству-

ет двойной электрический слой, одна часть которого, обращенная к жидкости, сдвигается за счет перепада давлений. Модель сейсмоэлектрических эффектов была предложена в работах [4, 5], где дано объяснение возникающей разности электрических потенциалов при прохождении упругих волн. Эта модель (названная по имени авторов моделью Френкеля–Био) получила дальнейшее развитие в работах [6, 7] и др. Современные теоретические представления о сейсмоэлектрических эффектах детально описаны в монографии [8].

Наличие сейсмоэлектрического эффекта II рода подтверждено в недавних работах [9, 10] при одновременной регистрации сейсмических колебаний и вертикальной компоненты напряженности электрического поля на земной поверхности. Исследования в геофизической обсерватории Института динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН «Михнево» показали, что распространение сейсмических волн в большинстве случаев сопровождается вариациями напряженности электрического поля на земной поверхности. Исключением являются периоды сильных возмущений электрического поля в виде атмосферных явлений (холодные фронты, сильный ветер и др.), когда сейсмоэлектрические эффекты невозможно выделить [11].

Обратный сейсмоэлектрический эффект II рода – возбуждение упругих волн при прохождении электрического тока – в меньшей степени привлекал внимание исследователей (хотя стоит упомянуть использование этого эффекта для оконтуривания месторождений углеводородов и подземных вод, а также для уточнения границ раздела между этими жидкостями). Так обстояло дело до проведения на полигонах в Центральной Азии в 1980-х годах электроразведок земной коры с применением наиболее мощных источников тока – геофизических МГД-генераторов [12, 13]. В этих и последующих работах, посвященных электроразведкам, например [14, 15], были получены статистически значимые результаты о пространственно-временном изменении сейсмического режима после подачи импульсов тока в земную кору через заземленный диполь. Аналогичные результаты были получены и для зондирований с использованием менее

мощного источника – электроразведочной генераторной установки, которые проводились в 2000–2005 гг. на Бишкекском геодинимическом полигоне в Киргизии [16]. Эти результаты можно охарактеризовать как проявление обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода, особенностью которого является наличие задержки во времени после начала электрического воздействия и наличие неупругой деформации среды (источника стимулированных сейсмических сигналов). Реальность электромагнитного триггера неупругой деформации геоматериалов вследствие обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода была подтверждена в лабораторных экспериментах на нагруженных породных образцах [17, 18].

Однако механизм воздействия импульсов тока на сейсмические очаги до конца не выяснен. Сложность разработки модели сейсмоэлектрических взаимодействий обусловлена необходимостью учета разных по природе процессов в неоднородных средах и средах, состоящих из твердого скелета и внутрипоровой жидкости. В таких средах при воздействии внешнего электрического поля возбуждаются сторонние по отношению к приложенному полю силовые поля различной физико-химической природы. Существенный вклад вносят эффекты вызванной поляризации [19], а также электрокинетические и/или электрохимические эффекты [11, 20]. Для продвижения к модели, объясняющей сейсмоэлектрический эффект II рода при электроразведках среды, крайне важно получение новых данных об этом эффекте, включая разные уровни силы тока, длительности воздействия и масштабов среды.

В Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН в 2020 г. начали проводить малоглубинные электроразведки земной коры на геофизическом полигоне «Петропавловское», расположенном в южной части Центрально-Сахалинского разлома [22]. В качестве источника тока использовался генератор импульсных напряжений (разработан в ИМГиГ ДВО РАН, описание в [22]), нагруженный на возбуждающий диполь с разном электродов 408 м. Были получены записи сейсмического и сейсмоакустического шума, по которым можно проследить реакцию сре-

ды на воздействие серий токовых импульсов. Для дальнейших исследований проявлений обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода и выявления его особенностей в разломных зонах необходимо накопление данных о реакции среды на электротзондирования – о возрастании амплитуды сейсмоакустических и сейсмических шумов. С этой целью в 2021 и 2022 гг. эксперимент на полигоне «Петропавловское» был продолжен, было проведено 3 серии электротзондирований. Полученные результаты анализируются в данной работе. Также обсуждаются возможности и проблемы сейсмоэлектрического мониторинга сегмента активного разлома на основе разработанного источника электротзондирований и переносных сейсмических или сейсмоакустических станций.

Аппаратурное обеспечение зондирований

Экспериментальные малоглубинные зондирования проводились на комплексном геофизическом полигоне ИМГиГ ДВО РАН у с. Петропавловское Анивского района о. Саха-

лин, в южной части Центрально-Сахалинского разлома (ЦСР) [23]. Оценка реакции среды на электротзондирование определялась по записям молекулярно-электронных приборов (производитель ООО «R-sensors», Россия): широкополосного сейсмометра СМЕ-6111 и гидрофона [23, 24], установленных на этом полигоне на расстоянии около 50 м от одного из полюсов возбуждающего электрического диполя.

Использование перечисленного оборудования позволяет выявлять реакцию среды на электротзондирования по сигналам в широком частотном диапазоне. При этом гидрофон может регистрировать высокочастотные сигналы, источники которых находятся на расстоянии не более нескольких сотен метров (из-за сферической расходимости и затухания волн). Сейсмометр СМЕ-6111 предназначен для регистрации сейсмических волн на частотах 1–50 Гц, источники которых на глубинах как минимум несколько километров. В ближней зоне около места размещения приборов источники сейсмических сигналов отсутствуют. Таким образом, сочетание сейсмометра и гидрофона позволяет сравнивать реакцию среды на электротзондирования на разных расстояниях воз-

буждающего диполя. Общая схема расположения комплексного полигона «Петропавловское», сейсмических станций и разломных структур южного Сахалина [25] приведена на рис. 1. На этом же рисунке (врезка А) показано положение возбуждающего электрического диполя АВ, образованного двумя заземленными электродами. Для привязки к местности также указаны координаты реперной точки.

Нужно отметить, что на заключительном этапе эксперимента в ноябре 2022 г. сейсмометр СМЕ-6111 был вынужденно перемещен из сейсмокамеры [1] на бетонный постамент. Из-за этого снизилась степень защиты прибора от воздействия внешних помех, несмотря на оснащение прибора защитным кожухом.

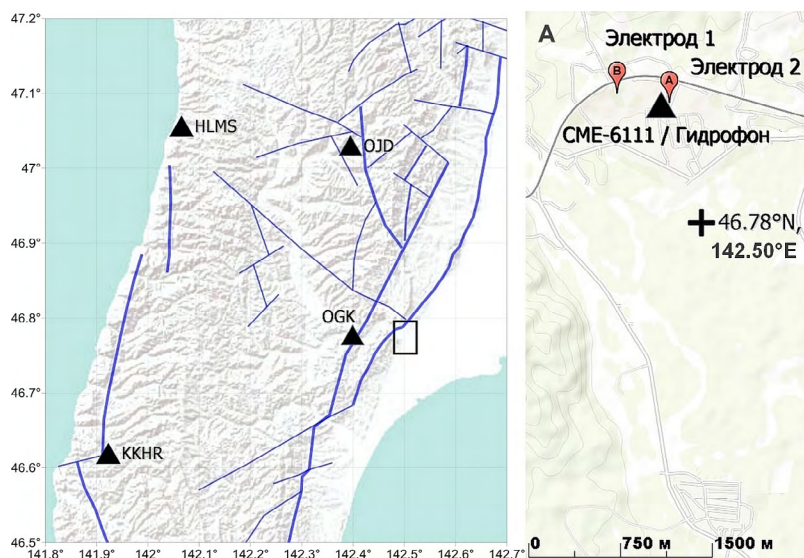


Рис. 1. Расположение геофизического полигона «Петропавловское» (прямоугольник) и сейсмических станций сети СФ ФИЦ ЕГС РАН (черные треугольники) на карте южного Сахалина. Синие линии – тектонические разломы, согласно [25]. Врезка (справа): размещение заземляющих электродов 1 (полюс В) и 2 (полюс А) и сейсмических приборов на территории полигона.

Fig. 1. The location of the Petropavlovskoye geophysical test site (rectangle) and seismic stations of the network of the SB UGS RAS (black triangles) on the map of southern Sakhalin. The blue lines are tectonic faults, according to [25]. Inset (right): Positions of earthing electrodes 1 (pole B) and 2 (pole A) and seismic instruments in the test site.

Особенности методики проведения электрозондирований

Эксперимент проводился в 4 этапа в течение 2020–2022 гг. Информация о времени зондирований и параметрах импульсов тока на каждом этапе приведена в таблице. Методика зондирований описана в статье [23], посвященной первому этапу эксперимента. На всех этапах для возбуждения в земле импульсов тока использовался один и тот же диполь АВ длиной 408 м. Сопротивление нагрузки, получающееся в результате растекания тока в среде, было определено с помощью тестера «Измеритель сопротивления изоляции», модель MS5209, оно составило 38 Ом. Величина сопротивления контролировалась перед началом каждого этапа эксперимента. Было установлено, что длительное пребывание в увлажненном грунте электродов, изготовленных из нержавеющей стальных труб, практически не повлияло на так называемое «кажущееся сопротивление», складывающееся из сопротивления на контактах электродов с землей и собственно сопротивления распределенной нагрузки.

При подготовке к экспериментам 2021–2022 гг. для устранения недостатков, выявленных на первом этапе в 2020 г., было усовершенствовано генераторное устройство для электрозондирований. Работоспособность устройства была проверена в серии испытаний на площадке в ИМГиГ ДВО РАН с применением макетной нагрузки с сопротивлением 38 Ом, как и у диполя на полигоне «Петропавловское». Разработанное и усовершенствованное в ИМГиГ ДВО РАН устройство получило название ИЭИГ-7-400 – источник электроимпульсов геофизический с номи-

нальным током 7 А и максимальным напряжением 400 В. Структурная схема ИЭИГ, используемого на втором и третьем этапах эксперимента, показана на рис. 2. В устройстве используется генератор переменного тока с выходным значением напряжения 230 В и частотой 50 Гц в качестве первичного источника электропитания. Переменное напряжение с выхода первичного генератора подается на блок питания CSP-3000-400¹, с помощью которого происходит преобразование напряжения в постоянное с амплитудой 400 В, что обеспечивает силу тока до 7.5 А. Напряжение с блока питания далее подается через прерыватель тока на электрический диполь, в соответствии с программой управления. Особенностью прерывателя тока в ИЭИГ является применение мощного электронного IGBT-ключа [23], способного коммутировать ток до 40 А и выдерживать напряжение до 1200 В. Запас по напряжению необходим для предотвращения выхода из строя полупроводникового ключа прерывателя из-за отрицательного коммутационного перенапряжения, возникающего при отключении цепи вследствие растекания тока с полюсов диполя (наличия эквивалентной индуктивности). Для защиты от электромагнитных наводок в полевых условиях, нарушающих управление по программе, прерыватель экранирован специальным защитным покрытием.

Напряжение с блока питания через прерыватель тока подается на электрический диполь, согласно управляющей программе. На всех этапах эксперимента, начиная со второго (см. таблицу), устройство ИЭИГ-7-400 было размещено вблизи электрода 2 (полюса А).



Рис. 2. Структурная схема источника электроимпульсов ИЭИГ-7-400, использованного при электрозондированиях в периоды 15–18 ноября 2021 г. и 25–28 апреля 2022 г.

Fig. 2. The block diagram of the IEIG-7-400 source of electric pulses, used for electrical sounding in the periods of November 15–18, 2021 and April 25–28, 2022.

¹ MW, 3000W Power Supply with Single Output. CSP-3000 series. URL: <http://www.mean-well.ru/uploads/files/datasheets/CSP-3000-400.pdf> (accessed 10.03.2023).

Таблица. Параметры зондирований на комплексном геофизическом полигоне у с. Петропавловское, о Сахалин
Table. Sounding parameters at the geophysical test site near the Petropavlovskoye village, Sakhalin Island

№ этапа	Дата зондирований	Время начала (UTC)	Источник импульсов тока	Среднее напряжение, В	Средняя амплитуда тока, А
1	29.10.2020 29.10.2020	00:15 01:45	Модуль PF1000A-360	360	4.9
2	15.11.2021 16.11.2021 17.11.2021 18.11.2021	00:50 02:45 09:29 00:33	Генератор 230 В АС с блоком CSP-3000-400	300	5.1
3	25.04.2022 26.04.2022 27.04.2022 28.04.2022	02:20 00:30 07:36 23:39	Генератор 230 В АС с блоком CSP-3000-400 в режиме источника тока	200-400	5.9
4	07.11.2022 08.11.2022 09.11.2022 10.11.2022	01:39 07:18 01:47 01:05	Источник ИИН-25-540: трехфазный генератор АС с выпрямителем	540	13

Примечание. На каждом этапе время зондирования и параметры импульсов тока одинаковы: серия в 200 имп. 20 с длительности с паузами 20 с.

Note. The sounding time and current pulse parameters are the same at each stage: a series of 200 pulses with a duration of 20 s and pauses of 20 s.

На втором и третьем этапах эксперимента аппаратура работала в повторно-кратковременном режиме, с чередованием импульсов тока и бестоковых пауз. При электрозондированиях 15–18 ноября импульсы генерировались однократными сериями по 200 импульсов с равной длительностью тока и бестоковой паузы по 20 с. Таким образом, сеанс электрозондирований занимал около 2.2 ч. 15, 16 и 18 ноября сеанс проводился в светлое время суток, начало было приурочено к полудню, который в данном районе наступает около 13:40 местного времени (2.40 UTC), а 17 ноября зондирования проводились незадолго до астрономической полуночи. В ходе зондирований осуществлялся непрерывный контроль тока и напряжения непосредственно на электродах, для чего была проложена отдельная линия к электроду 2. В каждом отдельном импульсе ток снижался с максимального значения ~7 А в начале до ~5 А в конце. На протяжении сеанса происходило плавное снижение максимальной амплитуды тока, которое компенсировалось ручной подстройкой напряжения модуля CSP-3000-400 во время бестоковых пауз. В период бестоковой паузы отмечалось остаточное напряжение на нагрузке (диполе АВ), величина которого была ~10 В в начале паузы, постепенно уменьшаясь до следующего импульса

тока. После последнего импульса в сеансе напряжение на электродах сохранялось.

Существенное отличие третьего этапа эксперимента от двух предшествующих заключается в использовании блока питания CSP-3000-400 в режиме источника тока, а не источника напряжения. Данное решение устранило непостоянство силы тока (снижение с 7 до 5 А) в ходе отдельного импульса. Для поддержания постоянного значения силы тока использован метод широтно-импульсной модуляции. Однако этот метод приводит к некоторому уменьшению амплитуды напряжения. Для отслеживания изменений амплитуды тока и напряжения при электрозондированиях применялась фото- и видеофиксация показаний измерительных приборов. В дальнейшем предполагается автоматизация измерений электрических параметров.

На рис. 3 представлены устройство для электрозондирований ИЭИГ-7-400, размещенное вблизи электрода 2, и электрод 1 с подключенным к нему геофизическим кабелем.

На четвертом, завершающем этапе эксперимента потребовалось увеличить ток и напряжение в импульсах, подаваемых на возбуждающий диполь, чтобы возможная деградация реакции среды на повторные воздействия, аналогичная эффекту Кайзера, не повлияла на статистику результатов по всем четырем этапам.



Рис. 3. Источник электроимпульсов и измерительная аппаратура, используемая на втором и третьем этапах эксперимента (слева). Стрелка указывает на электрод 1. 15 ноября 2021 г. *Фото И.П. Дудченко*

Fig. 3. The source of electrical pulses and measuring equipment used in the second and third stages of the experiment (left). The arrow points to the electrode 1. November 15, 2021. *Photo by I.P. Dudchenko*

Был учтен опыт многоэтапного проведения электрoзондированиях на Бишкекском геодинамическом полигоне с применением мощной электроимпульсной установки [16].

Характеристики блока питания CSP-3000-400 не позволяли увеличить мощность выдаваемых импульсов, поэтому в источнике зондированиях были сделаны следующие изменения. В качестве первичного источника напряжения на этом этапе эксперимента (ноябрь 2022 г.) использовался трехфазный генератор переменного тока. Напряжение генератора подается на трехфазный выпрямитель с амплитудным значением напряжения 540 В. Трехфазный вы-

прямитель был выполнен в качестве отдельного устройства в корпусе со встроенным автоматическим выключателем и сглаживающим фильтром. С выхода выпрямителя напряжение поступает в блок прерывателя тока, как и в ранее применяемом устройстве ИЭИГ-7-400. На рис. 4 показан внешний вид трехфазного выпрямителя – нового узла по отношению к устройству ИЭИГ-7-400 (рис. 2, 3). При использовании нового источника импульсного напряжения, названного ИИН-25-540 (номинальный ток 25 А, средневыврямленное напряжение 540 В), действительно удалось повысить силу тока в диполе. При электрoзондированиях

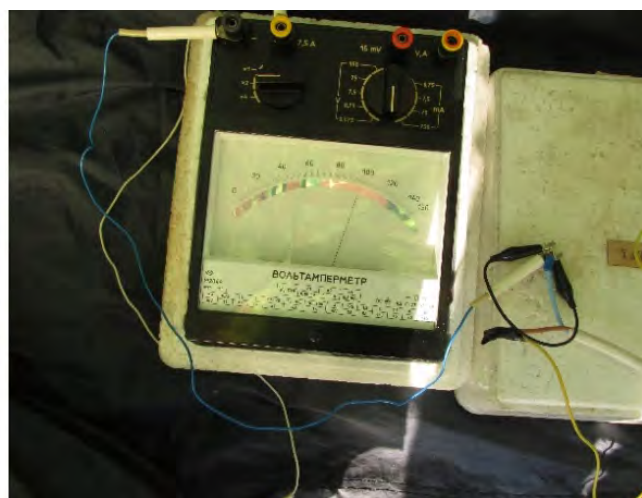


Рис. 4. Внешний вид трехфазного выпрямителя – источника тока в электрoзондированиях 7–10.11.2022 (слева). Регистрация тока 13 А на вольтамперметре в момент отдельного импульса (справа).

Fig. 4. The exterior of three-phase rectifier – a current source in electrical soundings of 7–10.11.2022 (left). Recording of 13 A current on the voltammeter at the moment of a separate pulse (right).

в период с 7 по 10 ноября 2022 г. средняя за серию в 200 импульсов амплитуда тока составила 13 А (рис. 5, справа), что почти в два раза выше ее значений на втором и третьем этапах.

Стоит отметить, что ресурс прерывателя тока позволяет формировать и более мощные импульсы для электроразведки. Но в настоящее время их максимальная мощность ограничена первичным источником напряжения (мобильным генератором переменного тока).

Проявления реакции среды в сейсмическом и сейсмоакустическом шуме

Первоначально был проведен анализ записей сейсмического шума по данным молекулярно-электронного гидрофона в дни проведения электроразведки. Для этого использовалась программа SpectrumSeism, предна-

значенная для анализа спектров сейсмических данных [26]. Построенные с помощью этой программы записи волновых форм сейсмоакустических сигналов в дни проведения электроразведки в ноябре 2021 г. показаны на рис. 5. Время начала и конца интервалов с возрастанием сейсмоакустических шумов на рис. 5 соответствует началу и завершению сеанса зондирования согласно дневнику эксперимента. Таким образом, молекулярно-электронный гидрофон устойчиво зарегистрировал все сеансы с подачей в диполь импульсов тока. По записям волновых форм можно проследить продолжительность сеансов зондирования и даже число импульсов в сеансе.

Для выявления региональных особенностей реакции среды на импульсы тока при зондировании в зоне Центрально-Сахалинского разлома был построен спектр сейсмоакустических сигналов с молекулярно-электронного гидрофона. Использовалась запись сейс-

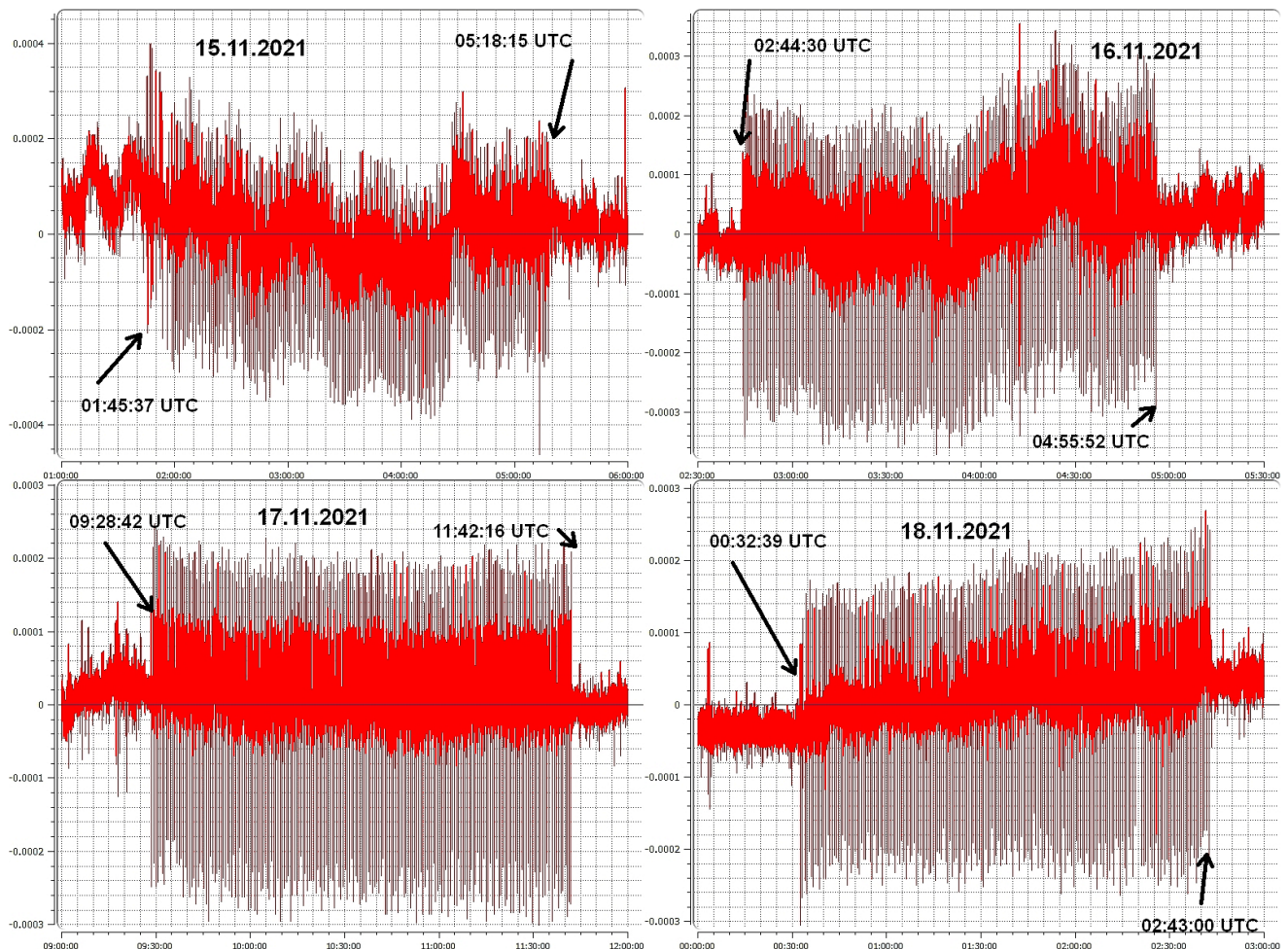


Рис. 5. Волновые формы по записям молекулярно-электронного гидрофона в дни проведения электроразведки в ноябре 2021 г.
Fig. 5. The waveforms given by the molecular-electronic hydrophone on the days of electrical sounding in November 2021.

молекулярного шума в период с 00:00:00 15.11.2021 г. по 06:00:00 18.11.2021 г. (UTC). При спектрально-временном анализе во время сеансов зондирования были выделены отдельные гармоники с частотами 4.27 и 12.5 Гц (рис. 6, верхняя панель). Для этих гармоник анализировалась зависимость спектральной плотности от времени (рис. 6, нижняя панель). Выбор гармоник определялся тем, что в ранее проведенном эксперименте на Бишкекском геодинамическом полигоне [27] как раз на этих частотах были обнаружены сейсмоакустические отклики на электровоздействие по записям скважинного геофона.

На спектре на рис. 6 (вверху) заметна реакция сигналов гидрофона на электроразондирования в частотном диапазоне 3–25 Гц. На более высоких частотах анализ затруднен из-за наличия различных постоянных помех, очевидно техногенного характера. Важно отметить, что описанный ранее в [27] характерный отклик

на внешнее воздействие на частоте 4.27 Гц проявляется и в нашем эксперименте, а вот амплитуда отклика на частоте 12.5 Гц на порядок меньше, хотя он все же имеет место.

Для определения частот, на которых происходит максимальное воздействие упругих колебаний на околотрубное пространство и жидкости внутри обсадной трубы, где установлен молекулярно-электронный гидрофон, были построены частотные зависимости спектральной амплитуды сигнала, зарегистрированного гидрофоном в начале сеансов электроразондирования 15 и 18 ноября 2021 г. (рис. 7).

На рис. 7 видно, что в обоих случаях максимальная плотность спектра приходится на частоты 4.7–4.9 Гц, что может считаться подтверждением чувствительности сейсмоакустических сигналов, регистрируемых гидрофоном, к началу сеанса с серией импульсов тока. Источник сигналов с такой частотой мог находиться на расстоянии не более десятков

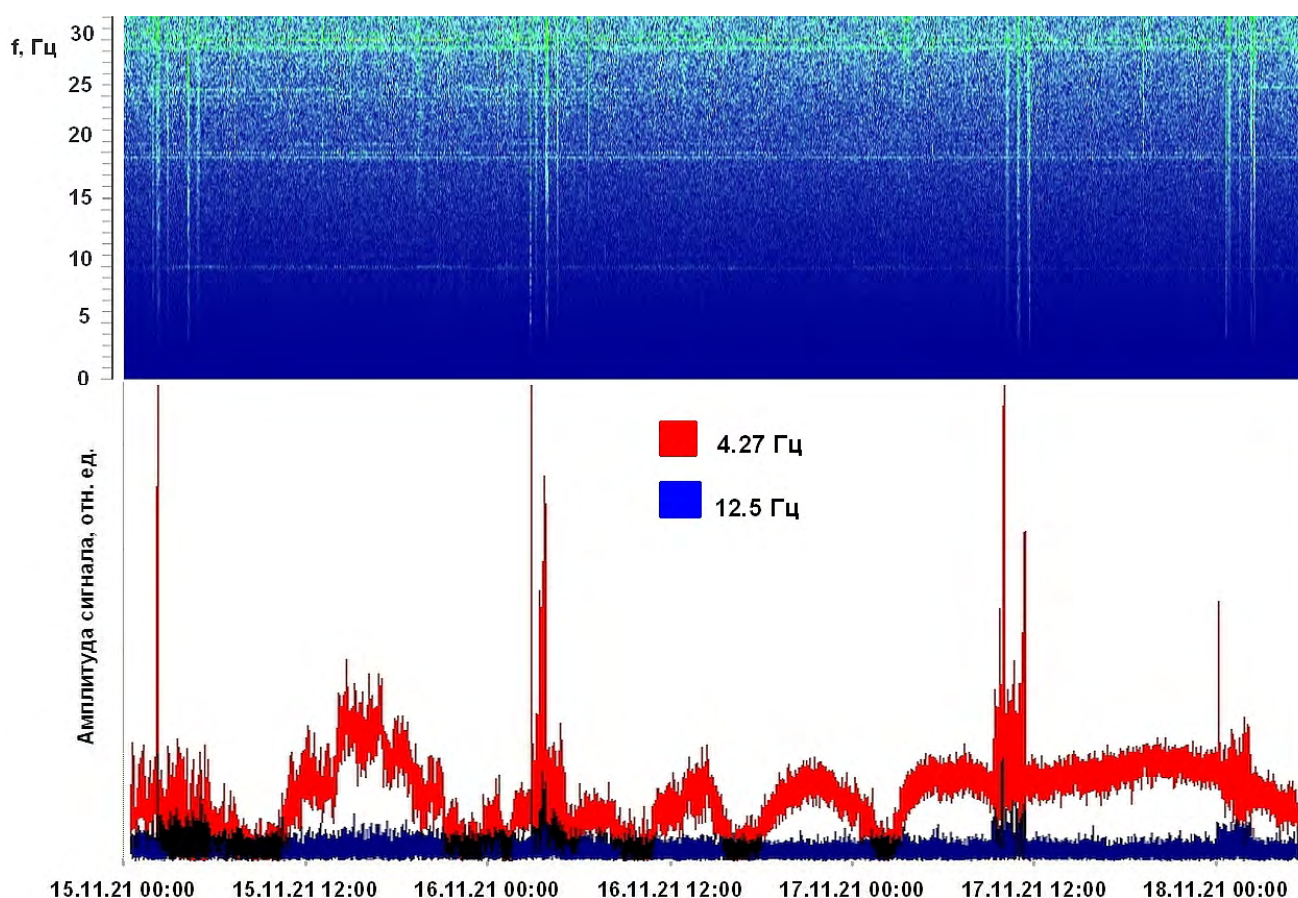


Рис. 6. Спектрограмма сейсмоакустического шума по записям молекулярно-электронного гидрофона (верхняя панель) и спектральная плотность на частотах 4.27 и 12.5 Гц (нижняя панель) на втором этапе эксперимента.

Fig. 6. The spectrogram of seismoacoustic noise recorded by the molecular-electronic hydrophone (top panel) and the spectral density at frequencies 4.27 and 12.5 Hz (bottom panel) at the second stage of the experiment.

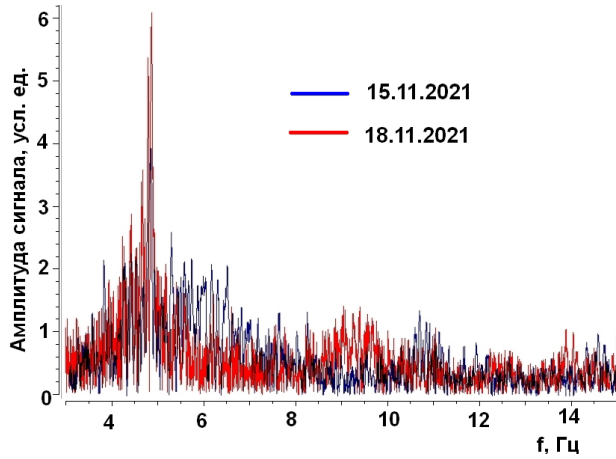


Рис. 7. Спектральный состав сейсмоакустических сигналов в моменты проведения электроразведки по записям молекулярно-электронного гидрофона.

Fig. 7. Spectral density of seismoacoustic signals during electrical sounding according to the records of the molecular-electronic hydrophone.

или нескольких сотен метров от гидрофона, иначе сигналы не могли быть зарегистрированы из-за расходимости и поглощения упругих волн. При электроразведках в 2022 г. (третий и четвертый этапы эксперимента) не было выявлено существенных различий

в записях сейсмоакустического шума по сравнению с вышеизложенными результатами.

Всего в 2021–2022 гг. было проведено 12 сеансов электроразведки (см. таблицу). Для каждого сеанса анализировались сейсмические записи, полученные молекулярно-электронным сейсмометром СМЕ-6111, продолжительностью 4 ч каждая. Период записи охватывает время самого сеанса (2.2 ч), а также интервалы около 1 ч до начала и после завершения электроразведки. Для анализа сейсмических записей использовалась программа SpectrumSeism [26]. Для всех 12 случаев электроразведки записи практически идентичны, небольшие различия заключаются в наличии или отсутствии прочих шумов, не связанных с возбуждением в среде импульсов тока. На рис. 8 показана спектрограмма сейсмических сигналов во время одного из сеансов на втором этапе эксперимента. По рисунку можно четко видеть, что во время сеанса сейсмометр СМЕ-6111 регистрирует увеличение амплитуды сигнала на частотах около 25 Гц, причем на двух близких гармониках.

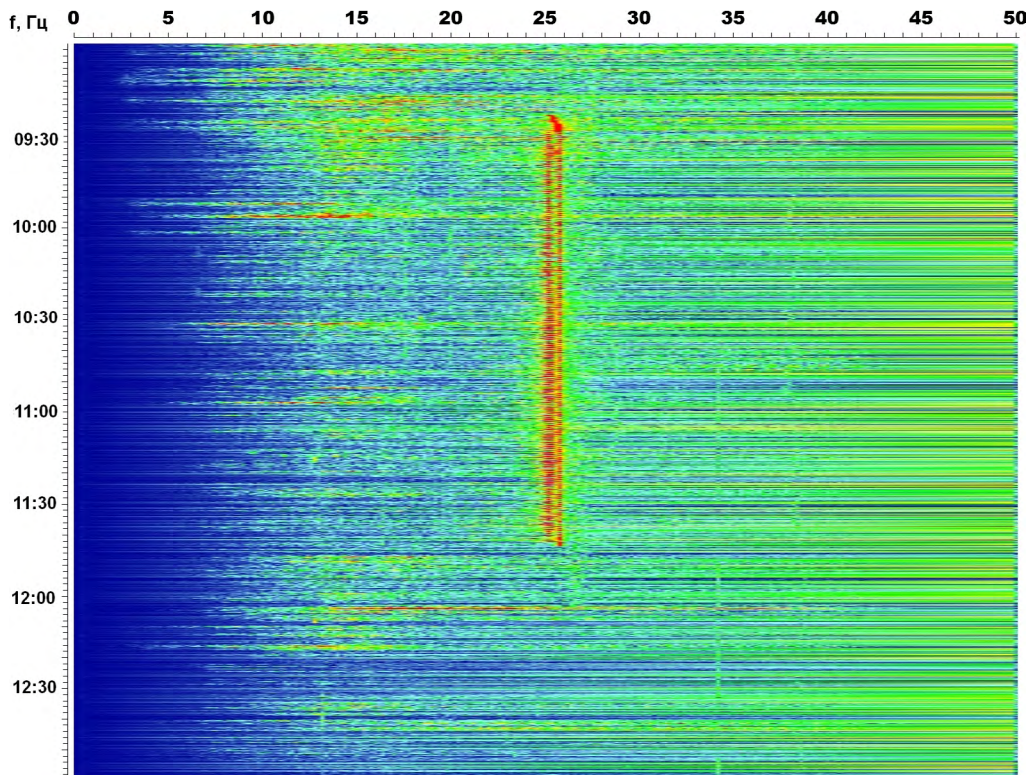


Рис. 8. Спектрограмма записи сейсмического сигнала, зарегистрированного 17.11.2021 по вертикальному каналу сейсмометра СМЕ-6111.

Fig. 8. Spectrogram of the seismic signal record of 17.11.2021, which was recorded on the vertical channel of the CME-6111 seismometer.

Для уточнения значений этих частот с помощью этой же программы для всех 12 случаев построены графики спектральной плотности сейсмических сигналов в произвольное время после начала сеансов электровоздействия. На рис. 9 представлены примеры таких графиков, даты электроразведок – 18.11.2021 и 09.11.2022 гг.

На рис. 9 и на всех остальных полученных графиках также хорошо прослеживаются две гармоники, причем амплитуда первой превышает амплитуду второй. Для частоты, на которой зафиксирована максимальная амплитуда сигнала, построены графики изменения амплитуды этой гармоники со временем в течение 4 ч (также для всех 12 случаев). Два примера таких графиков показаны на рис. 10,

один для третьего этапа электроразведок (см. таблицу), другой для четвертого.

На графиках, показанных на рис. 10, и на аналогичных графиках для других сеансов электроразведок четко видно время начала и конца этих сеансов (совпадающее с записями из дневников экспериментов), а также все случаи, когда в ходе сеансов происходили перерывы или сбои (как, например, 7-минутный перерыв на рис. 10, кадр слева). Влияние электровоздействия отмечено в диапазоне сейсмических частот до 25 Гц, при этом оно проявляется наиболее контрастно для отдельных гармоник. Параметры импульсов тока на разных этапах эксперимента и в разные дни зондирования на каждом этапе несколько отличались друг от друга по амплитуде тока, поля-

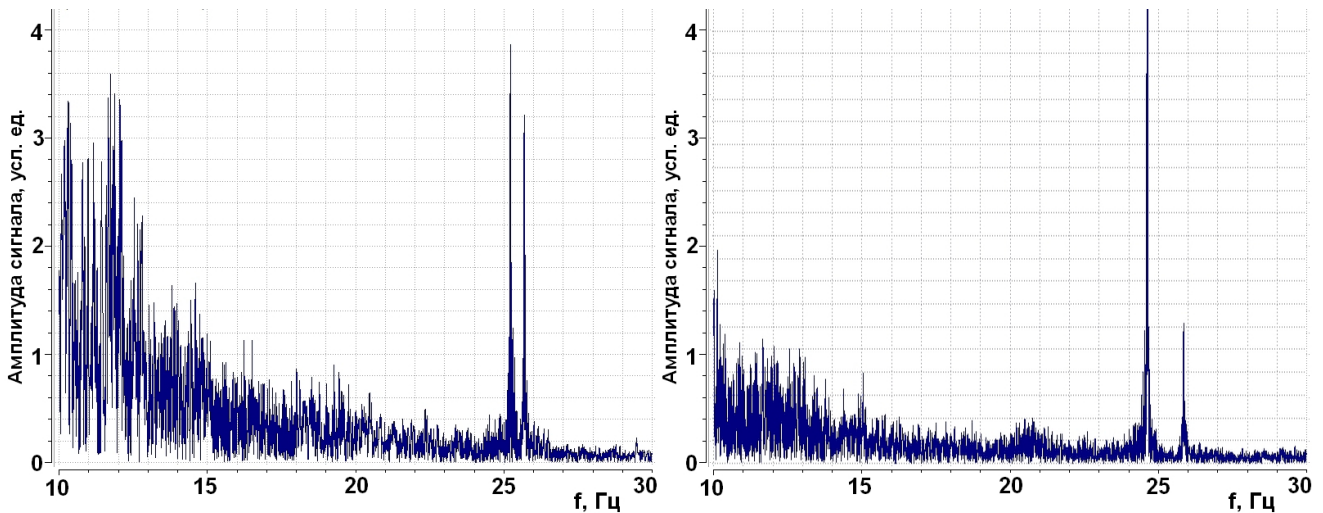


Рис. 9. Спектральная плотность сигнала в периоды проведения электроразведок 18.11.2021 (слева) и 09.11.2022 (справа).
 Fig. 9. The spectral density of the signal during the periods of electrical sounding 18.11.2021 (left) and 09.11.2022 (right).

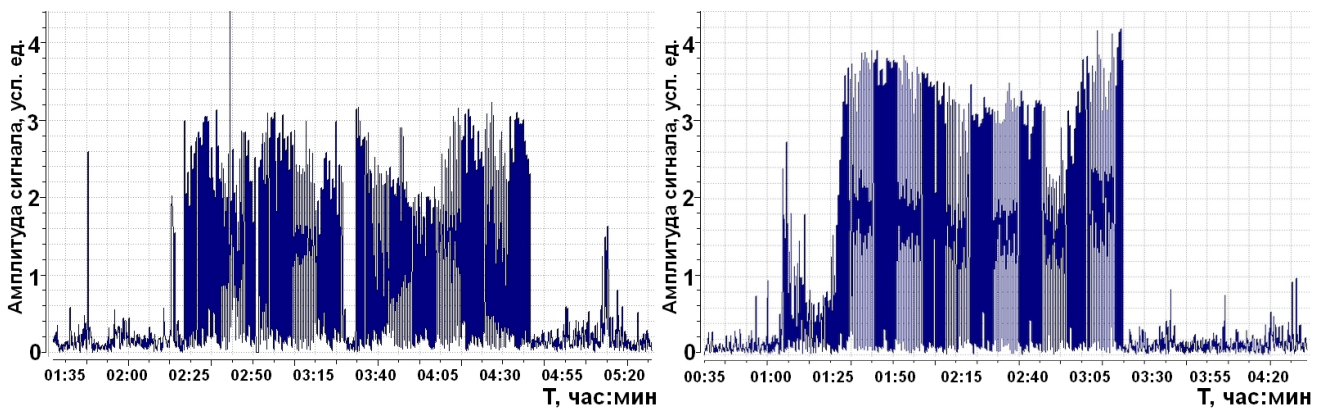


Рис. 10. Изменения амплитуды спектра сейсмического сигнала в период проведения электроразведки на частоте 25.06 Гц 25.04.2022 г. (слева) и на частоте 24.51 Гц 10.11.2022 г. (справа).
 Fig. 10. Changes in the amplitude of the seismic signal spectrum during the period of the electrical sounding at a frequency of 25.06 Hz on 25.04.2022 (left) and at a frequency of 24.51 Hz on 10.11.2022 (right).

ности, а также времени начала сеансов электрозондирования, для того чтобы был выполнен принцип рандомизации эксперимента. Согласно этому принципу, новые физические эффекты могут считаться полностью достоверными, если они устойчивы к некоторым изменениям параметров постановки эксперимента [28]. Элемент случайности вводят в планирование эксперимента в тех случаях, пока еще неизвестна или недостаточно разработана математическая модель. К таким случаям можно отнести наше исследование обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода в разломной зоне.

Обобщая вышеизложенные результаты, можно заключить, что импульсы тока в приповерхностном слое коры при электрозондированиях в зоне Центрально-Сахалинского разлома оказывают влияние на источники сейсмических и сейсмоакустических волн, из-за чего возрастает амплитуда шумов.

Обсуждение результатов

Прежде чем обсуждать, как полученные результаты укладываются в представления о сейсмических и сейсмоакустических откликах среды на воздействие импульсов тока, проведем оценку плотности тока, возбуждаемого электрическим диполем. Для этого удобно воспользоваться формулой из [29] для плотности тока j на достаточном удалении от центра диполя:

$$j(r) = IL / (2\pi r^3), \quad (1)$$

где I – сила тока, определяемая источником и сопротивлением нагрузки, L – расстояние между электродами (длина диполя), r – расстояние от центра диполя до точки в среде, $r \gg L$. Формула (1) дает приближенный результат и для расстояний $r \geq L$, что подтверждается совпадением $j(r)$ при $r = L$ с выражением для плотности тока при симметричном растекании с полюса в полусферическую зону. Распределение проводимости среды считается квазиоднородным.

При электрозондированиях, проведенных на полигоне «Петропавловское», значения параметров были следующие: $I = 5\text{--}13$ А, $L = 408$ м. Источники сейсмоакустических шумов, которые может регистрировать наш гидрофон, находятся на удалении не более нескольких сотен метров от приемника и, следо-

вательно, от электрода 2 (см. рис. 1). Поэтому для оценки плотности тока по месту расположения источников можно в (1) положить $r = L$, и тогда из этого выражения получается $j \sim (0.5\text{--}1) \cdot 10^{-5}$ А/м². Плотность тока быстро убывает с ростом r . Так, на километровом расстоянии при максимальном токе зондирования 13 А $j(r_{1000}) \sim 10^{-6}$ А/м², а при удалении от диполя на 5 км (например, вглубь до слоя, куда могут попадать гипоцентры землетрясений) $j(r_{5000}) \sim 10^{-8}$ А/м². Полученные оценки показывают, что при проведенных электрозондированиях плотность тока в среде на расстояниях до 1 км от центра возбуждающего диполя была выше, чем характерные значения $j(r)$ при практических применениях сейсмоэлектрического эффекта II рода для оконтуривания месторождений углеводородов [30, 31]. Действительно, при таких применениях длина диполя обычно порядка 100 м, напряжение источника (автомобильного аккумулятора) 12 или 24 В, а кажущееся сопротивление нагрузки ≥ 100 Ом. Значения $j \sim 10^{-6}$ А/м² для вышеописанных электрозондирований (на расстояниях $r \sim 1$ км от источника) соответствуют расчетным оценкам плотности тока, который может возбуждаться в проводящем слое литосферы при возмущениях ионосферы глобального масштаба – последствиях солнечных вспышек класса X [32, 33]. В ряде работ (библиография в [34]) было отмечено, что после геоэффективных солнечных вспышек, вызывающих сильные магнитные бури, повышается уровень сейсмического шума. Возможный механизм этого эффекта связывают с микропульсациями магнитного поля Земли и наведенными теллурическими токами. С учетом этих обстоятельств можно говорить о некотором сходстве наших результатов с общей картиной реакции геологической среды на возбуждение в ней электрического тока.

Используя выражение (1), можно оценить значения плотности тока для других экспериментов, чтобы сравнить с нашим случаем электрозондирований ($j \sim 10^{-6} - 10^{-5}$ А/м²). Примем расстояние $r = 400$ м как референтное значение для численных оценок и рассмотрим несколько примеров.

1. В период 22–26 октября 2018 г. нами совместно с сотрудниками ИКИР ДВО РАН были проведены электрозондирования, аналогич-

ные описанным выше. Местом экспериментов была площадка стационара ИКИР ДВО РАН «Карымшина», Камчатский край, которая расположена в зоне разноранговых разломов. При электроразведках ток в импульсах был $I = 0.9$ А, а длина диполя $L = 18$ м. Отсюда следует, что на референтном расстоянии 400 м плотность тока $j \sim 0.4 \cdot 10^{-7}$ А/м², и только на расстояниях до 140 м плотность тока может достигать значений 10^{-6} А/м². Сейсмоакустические сигналы регистрировались гидрофонами разных типов, установленными в небольшом искусственном водоеме, а также высокочастотным сейсмоприемником (геофоном А1638, производство ЗАО «Геоакустика»²). Расстояние от гидрофонов (центра водоема) до ближайшего полюса диполя (обсадной трубы, заглубленной на 5 м) было около 20 м. Геофон был жестко закреплен на металлической балке, приваренной к конструкции другого полюса (такой же обсадной трубе). Каких-либо изменений в сейсмоакустических шумах в ходе сеансов электроразведки не было обнаружено.

2. В 2019 г., 29 и 30 августа, электроразведки по нашей методике проводились также на территории геофизической обсерватории Института динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН «Михнево», Московская обл. В этом случае ток в импульсах был $I = 3.1$ А, а длина диполя $L = 180$ м. Следовательно, плотность тока на референтном расстоянии 400 м составляла $j \sim 1.4 \cdot 10^{-6}$ А/м². В ГФО «Михнево» установлена малоапертурная сейсмическая антенна, МСА³, включающая центральный сейсмометр, который расположен в штольне на глубине 20 м, и 11 периферийных приборов. Благодаря этому МСА (другими словами, локальная сейсмическая сеть) обладает высокой чувствительностью к сейсмическим волнам и способна регистрировать региональные сейсмические события с малыми магнитудами ($M < 2$). В нашем эксперименте центр возбуждающего диполя находился на расстоянии около 350 м от штольни с центральным сейсмометром. По техническим причинам не было возможности использовать гидрофоны или геофоны.

По данным локальной сейсмической сети «Михнево», значимых изменений сейсмического шума в дни зондирования не было обнаружено (предположительно, из-за недостаточного накопления данных при малом количестве и продолжительности сеансов электроразведки).

3. Согласно [28], при зондированиях земной коры Северного Тянь-Шаня знакопеременными импульсами тока с амплитудой 600 А и длительностью 5 с (источник – электроимпульсная установка ЭРГУ-600-2) были зарегистрированы отклики сейсмоакустической эмиссии (САЭ) на расстоянии около 8 км от центра возбуждающего диполя. Регистрация сигналов проводилась при помощи геофона А1638, установленного в скважине на глубине около 80 м. По приведенным в [28] данным о длине диполя ($L = 4.2$ км) и расстояниях до приемника можно оценить плотность тока в зоне, где регистрировались сигналы САЭ, величиной $j \sim 0.8 \cdot 10^{-6}$ А/м².

Сопоставляя эти примеры с результатами электроразведки на полигоне «Петропавловское», можно резюмировать, что в сейсмоактивных регионах (где имеются избыточные напряжения в земной коре) при возбуждении в среде электрического тока с плотностью 10^{-6} А/м² или выше наступает реакция среды, проявляющаяся в сейсмоакустике. При этом могут регистрироваться разные формы реакции среды (так называемые отклики) при разных способах обработки первичных данных. Примерами откликов является как увеличение уровня сейсмоакустических шумов (см. выше), так и прирост числа событий САЭ, определяемых по превышению уровня дискриминации в шумовых записях [27]. Возможно, есть и другие формы откликов.

Помимо электроразведки, на уровень сейсмоакустических и сейсмических шумов могут воздействовать и другие факторы. Известно, что наиболее сильное влияние на сейсмический шум могут оказывать барические вариации в атмосфере, вызываемые циклонами [35]. При этом короткопериодные барические вариации длительностью

² Geoaoustics. 2009. URL: <http://geophone.narod.ru/TTX/ttx.html> (дата обращения: 23.04.2023).

³ Малоапертурная сейсмическая антенна, МСА [Small aperture antenna, SAA]. 2004. URL: http://idg.chph.ras.ru/ru/watch/s_a_s_antenna (дата обращения: 16.04.2023)

от 5 до 30 мин приводят к росту сейсмического шума в диапазоне 4–8 Гц [35]. Но крайне маловероятно, что во всех случаях сеансы электроразведки наложились на такие краткочастотные барические вариации. Кроме того, перепады давления, как и ветровые нагрузки, при циклонах не нарастают столь резко, как подача тока на диполь. Так что барические вариации, связанные с циклонами, не могут объяснить резкого (как на рис. 5) прироста уровня сейсмоакустических шумов. Тем не менее приведем информацию о прохождении циклонов над южной частью о. Сахалин в дни эксперимента (по материалам гидрометеорологических бюллетеней Дальневосточного регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института). Согласно этим бюллетеням⁴, в дни проведения электроразведки в 2021–2022 гг. прохождение циклонов отмечено 18.11.2021 (последний день второго этапа эксперимента) и 26–27.04.2022 (на втором этапе). Даже если считать, что в статистике случаев прироста сейсмоакустических шумов под влиянием именно электроразведки положительный вклад дают только 9 дней без циклонов, а для 3 дней результат испытаний не определен, то «процент успеха», когда гипотеза о реакции среды на импульсы тока подтверждена, будет 75 %.

Завершая обсуждение результатов, остановимся на требованиях к источнику электроразведки для сейсмоэлектрического мониторинга разломных зон. Для этого необходимо расширить пределы зоны около источника, где при зондировании возбуждается ток с плотностью выше 10^{-6} А/м², как минимум до 5 км (характерная ширина зоны влияния разлома). С помощью выражения (1) легко получить, что это обеспечивается при производстве тока в диполе на его длину $I \cdot L = 8 \cdot 10^5$ А·м. Такие значения достижимы при применении наиболее мощных, но очень дорогих источников импульсов тока.

Целью дальнейших экспериментов может стать исследование обратного сейсмоэлектри-

ческого эффекта II рода при меньшей плотности тока, $j \sim 10^{-7}$ А/м² (т.е. вдали от источника).

Заключение

По результатам четырехэтапного эксперимента по электроразведке, проведенного в зоне влияния Центрально-Сахалинского разлома, установлен эффект возрастания уровня сейсмоакустических шумов в приповерхностных слоях вблизи источника – возбуждающего электрического диполя.

В качестве источника использовалось разработанное в ИМГиГ ДВО РАН генераторное устройство ИЭИГ-7-400 с мощностью 3 кВт, выше, чем у обычных источников для электроразведки методами сопротивлений. Регистрация сейсмических и сейсмоакустических шумов в фоновом режиме и во время зондирования велась с помощью молекулярно-электронных приборов: скважинного гидрофона и сейсмометра СМЕ-6111. По записям этих приборов были обнаружены корреляции между периодами подачи импульсов тока в среду через диполь и возрастанием сейсмоакустических шумов. Обнаруженная реакция среды на пропускание импульсов тока представляет собой разновидность обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода, которая реализуется при достаточно высоких плотностях тока. Полученные результаты согласуются с результатами о вариациях сейсмоакустической эмиссии, которые регистрировались скважинными приборами при электроразведке в Северном Тянь-Шане. Отличие сейсмоакустических проявлений реакции среды от откликов сейсмичности (изменений параметров потока сейсмических событий после зондирования с применением геофизических МГД-генераторов и электроимпульсных установок) заключается в практическом отсутствии задержки после начала воздействия. Разработка и применение более мощных, но экономически приемлемых генераторных устройств может дать дополнительную информацию по этому вопросу.

⁴ Мезенцева Л.И., Каптыуг В.А. 2021. Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень ДВНИГМИ. Владивосток: ДВНИГМИ, 11: 21 с. [Mezentseva L.I., Kaptyug V.A. 2021. Monthly hydrometeorological bulletin of the FERHMI. Vladivostok: FERHMI, 11: 21 p.] URL: http://www.ferhri.ru/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2021/11/2021.11_ch1_meteo.pdf; То же. 2022, 4: 20 с. URL: http://www.ferhri.ru/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2022/4/2022.04_ch1_meteo.pdf; То же. 2022, 11: 21 с. URL: http://www.ferhri.ru/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2022/11/2022.11_ch1_meteo.pdf (дата обращения: 16.02.2023).

Список литературы

1. Чердынцев С.Н. **2022**. Сейсмоэлектрический эффект – основа нового геофизического метода исследований нефтяных скважин – сейсмоэлектрического каротажа. *Успехи современного естествознания*, 11: 143–150. <https://doi.org/10.17513/use.37942>
2. Иванов А.Г. **1940**. Сейсмоэлектрический эффект первого рода в приэлектродных областях. *Доклады АН СССР*, 68: 53–56.
3. Иванов А.Г. **1940**. Сейсмоэлектрический эффект 2 рода. *Известия АН СССР. Серия географическая и геофизическая*, 5: 699–727.
4. Френкель Я.И. **1944**. К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве. *Известия АН СССР. Серия географическая и геофизическая*, 8(4): 134–149.
5. Biot M.A. **1956**. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28(2): 168–178. <https://doi.org/10.1121/1.1908239>
6. Pride S.R. **1994**. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media. *Physical Review B*, 50(21): 15678–15696. <https://doi.org/10.1103/physrevb.50.15678>
7. Naartsen M.W., Pride S.R. **1996**. Electrostatic waves from point sources in layered media. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B11): 24745–24769. <https://doi.org/10.1029/97jb02936>
8. Светов Б.С. **2008**. *Основы геоэлектрики*. Л.: Изд-во ЛКИ, 656 с.
9. Адушкин В.В., Спивак А.А. **2014**. *Физические поля в приповерхностной геофизике*. М.: ГЕОС, 360 с.
10. Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Ризниченко О.Ю. **2016**. «Михнево»: от сейсмостанции № 1 до современной геофизической обсерватории. *Физика Земли*, 1: 108–120.
11. Спивак А.А., Кишкина С.Б. **2004**. Исследование микросейсмического фона с целью определения активных тектонических структур и геодинамических характеристик среды. *Физика Земли*, 7: 35–49.
12. Тарасов Н.Т. **1997**. Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии. *Доклады АН*, 353(4): 542–545.
13. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. **1999**. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана. *Вулканология и сейсмология*, 4-5: 152–160.
14. Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Файнберг Э.Б. **2005**. О пространственно-временной структуре сейсмичности, вызванной электромагнитным воздействием. *Физика Земли*, 6: 55–65.
15. Смирнов В.Б., Завьялов А.Д. **2012**. К вопросу о сейсмическом отклике на электромагнитное зондирование литосферы Земли. *Физика Земли*, 7: 63–88.
16. Сычев В.Н., Богомолов Л.М., Рыбин А.К., Сычева Н.А. **2010**. Влияние электромагнитных зондирований земной коры на сейсмический режим территории Бишкекского геодинамического полигона. В кн.: Адушкин В.В., Кочарян Г.Г. (ред.) *Триггерные эффекты в геосистемах: материалы всерос. семинара-совещ.* М.: ГЕОС, с. 316–325.
17. Соболев Г.А., Пономарев А.В. **2003**. *Физика землетрясений и предвестники*. М.: Наука, 270 с.
18. Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Sychev V.N., Zakupin A.S., Novikov V.A., Okunev V.I. **2004**. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation. *Annals of Geophysics*, 47(1): 65–72. <https://doi.org/10.4401/ag-3259>
19. Светов Б.С. **2000**. К теоретическому обоснованию сейсмоэлектрического метода геофизической разведки. *Геофизика*, 1: 28–39.
20. Кормильцев В.В. **1980**. *Переходные процессы при вызванной поляризации*. М.: Наука, 112 с.
21. Светов Б.С., Агеев В.В., Каринский С.Д., Агеева О.А. **2013**. Самосогласованная задача вызванной поляризации электрокинетического происхождения. *Физика Земли*, 6: 91–98.
22. Дудченко И.П., Костылев Д.В., Гуляков С.А., Стовбун Н.С. **2021**. Геофизический генератор импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр. *Геосистемы переходных зон*, 5(1): 46–54. doi:10.30730/gtr.2021.5.1.046-054
23. Kostylev D.V., Bogomolov L.M., Boginskaya N.V. **2019**. About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 012009. doi:10.1088/1755-1315/324/1/012009
24. Костылев Д.В., Богинская Н.В. **2020**. Сейсмоакустические наблюдения с применением молекулярно-электронных гидрофонов на Сахалине и южных Курильских островах (о. Кунашир). *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 486–499. doi:10.30730/gtr.2020.4.4.486-499
25. Рождественский В.С., Сапрыгин С.М. **1999**. Структурные взаимоотношения неогеновых и четвертичных образований, активные разломы и сейсмичность на Южном Сахалине. *Тихоокеанская геология*, 6: 59–70.
26. RU 2021666241. **2021**. *SpectrumSeism*: Свид-во о государственной регистрации программы для ЭВМ. Авторы: Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Севостьянов Д.Б., Брыксин А.А. № 2021665611; заявл. 11.10.2021, опубл. 11.10.2021.
27. Закупин А.С., Богомолов Л.М., Мубассарова В.А., Ильичев П.В. **2014**. Сейсмоакустические проявления воздействий мощных импульсов тока по данным скважинных измерений на Бишкекском геодинамическом полигоне. *Физика Земли*, 5: 105–120. doi:10.7868/S000233371404019X
28. Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф. **1982**. *Планирование эксперимента*. Минск: Изд-во БГУ. 302 с.
29. Колесников В.П. **1984**. *Основы интерпретации электрических зондирований*. М.: Наука, 400 с.
30. Russell R.D., Butler K.E., Kercic A.W., Maxwell M. **1997**. Seismoelectric exploration. *The Leading Edge*, 16(11): 1611–1615. <https://doi.org/10.1190/1.1437536>
31. Potlyltsyn V., Kudinov D., Alekseev D., Kokhonkova E., Kurkov S., Egorov I., Pliss A. **2021**. Study of

the seismoelectric effect of the second kind using molecular sensors. *Sensors*, 21: 2301–2316. <https://doi.org/10.3390/s21072301>

32. Sorokin V., Yaschenko A., Mushkarev G., Novikov V. **2023**. Telluric currents generated by solar flare radiation: Physical model and numerical estimations. *Atmosphere*, 14: 458–477. <https://doi.org/10.3390/atmos14030458>
33. 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*, 15(1): 23–44. doi:10.26006/29490995_2023_15_1_23
34. Сычева Н.А. **2022**. Солнечные вспышки, сильные магнитные бури и вариации уровня сейсмического шума на территории Северного Тянь-Шаня. *Геофизические процессы и биосфера*, 21(4): 93–109. doi:10.21455/GPB2022.4-7
35. Адушкин В.В., Локтев Д.Н., Спивак А.А. **2008**. Влияние барических возмущений атмосферы на микросейсмические процессы в земной коре. *Физика Земли*, 6: 77–85.

References

1. Cherdynceev S.N. **2022**. The seismoelectric effect is the basis of a new geophysical method of oil well research – seismoelectric logging. *Advances in Current Natural Sciences*, 11: 143–150. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37942>
2. Ivanov A.G. **1940**. Seismoelectric effect of the 1st kind in near-electrode regions. *Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences*, 68: 53–56. (In Russ.).
3. Ivanov A.G. **1940**. Seismoelectric effect of the 2nd kind. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geograficheskaya i geofizicheskaya*, 5: 699–727. (In Russ.).
4. Frenkel' Ya.I. **1944**. On the theory of seismic and seismoelectric phenomena in moist soil. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geograficheskaya i geofizicheskaya*, 8(4): 134–149. (In Russ.).
5. Biot M.A. **1956**. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28(2): 168–178. <https://doi.org/10.1121/1.1908239>
6. Pride S.R. **1994**. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media. *Physical Review B*, 50(21): 15678–15696. <https://doi.org/10.1103/physrevb.50.15678>
7. Haartsen M.W., Pride S.R. **1996**. Electrostatic waves from point sources in layered media. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B11): 24745–24769. <https://doi.org/10.1029/97jb02936>
8. Svetov B.S. **2008**. *Fundamentals of geoelectrics*. Leningrad: Izdatel'stvo LKI, 656 p. (In Russ.).
9. Adushkin V.V., Spivak A.A. **2014**. *Physical fields in near-surface geophysics*. Moscow: GEOS, 360 p. (In Russ.).
10. Adushkin V.V., Ovchinnikov V.M., Sanina I.A., Riznichenko O.Yu. **2016**. Mikhnevo: from seismic station no. 1 to a modern geophysical observatory. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 52(1): 105–116. <https://doi.org/10.1134/s1069351315060014>
11. Spivak A.A., Kishkina S.B. **2004**. The use of microseismic background for the identification of active geotectonic structures and determination of geodynamic characteristics. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 40(7): 573–586.
12. Tarasov N.T. **1997**. Variation of seismicity of the Earth crust by electric impact. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk [Transactions (Doklady) of the Russian Academy of Sciences. Earth Science Sections]*, 353(4): 542–545. (In Russ.).
13. Tarasov N.T., Tarasova N.V., Avagimov A.A., Zeigarnik V.A. **2000**. The effect of high energy electromagnetic pulses on seismicity in Central Asia and Kazakhstan. *Volcanology and Seismology*, 21(4-5): 627–639.
14. Avagimov A.A., Zeigarnik V.A., Fajnbreg E.B. **2005**. Electromagnetically induced spatial-temporal structure of seismicity. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 41(6): 475–484.
15. Smirnov V.B., Zavyalov A.D. **2012**. Seismic response to electromagnetic sounding of the Earth's lithosphere. *Izv., Physics Solid Earth*, 48: 615–639. <https://doi.org/10.1134/S1069351312070075>
16. Sychev V.N., Bogomolov L.M., Rybin A.K., Sycheva N.A. **2010**. Influence of electromagnetic sounding of the Earth's crust on the seismic regime of the territory of the Bishkek geodynamic test site. In: Adushkin V.V., Kocharyan G.G. (eds) *Trigger effects in geosystems: Proceedings of the All-Russian seminar-meeting*. Moscow: GEOS, p. 316–325. (In Russ.).
17. Sobolev G.A., Ponomarev A.V. **2003**. *Earthquake physics and precursors*. Moscow: Nauka, 270 p. (In Russ.).
18. Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Sychev V.N., Zakupin A.S., Novikov V.A., Okunev V.I. **2004**. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation. *Annals of Geophysics*, 47(1): 65–72. <https://doi.org/10.4401/ag-3259>
19. Svetov B.S. **2000**. On the theoretical substantiation of the seismoelectric method of geophysical exploration. *Geofizika*, 1: 28–39. (In Russ.).
20. Kormil'cev V.V. **1980**. *Transients under induced polarization*. Moscow: Nauka, 112 p. (In Russ.).
21. Svetov B.S., Ageev V.V., Karinskij S.D., Ageeva O.A. **2013**. Self-consistent problem of induced polarization of electrokinetic origin. *Izv., Physics Solid Earth*, 49(6): 836–843. <https://doi.org/10.1134/s1069351313060141>
22. Dudchenko I.P., Kostylev D.V., Gulyakov S.A., Stovbun N.S. **2021**. A geophysical pulse voltage generator for seismic and electric exploration of the subsurface. *Geosystems of Transition Zones*, 5(1): 46–54. DOI 10.30730/gtr.2021.5.1.046-054 (In Russ.).
23. Kostylev D.V., Bogomolov L.M., Boginskaya N.V. **2019**. About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 012009. doi:10.1088/1755-1315/324/1/012009
24. Kostylev D.V., Boginskaya N.V. **2020**. Seismoacoustic observations using molecular-electronic hydrophones

- on Sakhalin and the South Kuril Islands (Kunashir Island). *Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 486–499. doi:10.30730/gtr.2020.4.4.486-499 (In Russ.).
25. Rozhdestvenskij V.S., Saprygin S.M. 1999. Structural relationships between Neogene and Quaternary deposits, active faults and seismicity in South Sakhalin. *Geology of the Pacific Ocean*, 6: 59–70. (In Russ.).
 26. RU 2021666241. 2021. *SpectrumSeism*: Certificate of state registration of the computer program. Authors: Seleznev V.S., Lisejkin A.V., Sevost'yanov D.B., Bryksin A.A. No. 2021665611, application 11.10.2021; publ. 11.10.2021. (In Russ.).
 27. Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Mubassarova V.A., П'ичев P.V. 2014. Seismoacoustic responses to high-power electric pulses from well logging data at the Bishkek geodynamical test area. *Izv., Physics Solid Earth*, 50(5): 692–706. https://doi.org/10.1134/s1069351314040193
 28. Krasovskii G.I., Filaretov G.F. 1982. *Experimental design*. Minsk: Izd-vo BSU. 302 p. (In Russ.).
 29. Kolesnikov V.P. 1984. *Fundamentals of interpretation of electrical soundings*. Moscow: Nauka, 400 p. (In Russ.).
 30. Russell R.D., Butler K.E., Kopic A.W., Maxwell M. 1997. Seismoelectric exploration. *The Leading Edge*, 16(11): 1611–1615. https://doi.org/10.1190/1.1437536
 31. Potylitsyn V., Kudinov D., Alekseev D., Kokhonkova E., Kurkov S., Egorov I., Pliss A. 2021. Study of the seismoelectric effect of the second kind using molecular sensors. *Sensors*, 21: 2301–2316. https://doi.org/10.3390/s21072301
 32. Sorokin V., Yaschenko A., Mushkarev G., Novikov V. 2023. Telluric currents generated by solar flare radiation: Physical model and numerical estimations. *Atmosphere*, 14: 458–477. https://doi.org/10.3390/atmos14030458
 33. Novikov V.A., Sorokin V.M., Yashchenko A.K., Pushkarev G.Yu. 2023. Physical model and numerical estimates of telluric currents generated by X-ray radiation of a solar flare. *Dynamic Processes in Geospheres*, 15(1): 23–44. (In Russ.). doi:10.26006/29490995_2023_15_1_23
 34. Sycheva N.A. 2022. Solar flares, strong magnetic storms and variations in the level of seismic noise in the Northern Tien Shan. *Geophysical Processes and the Biosphere*, 21(4): 93–109. (In Russ.). doi:10.21455/GPB2022.4-7
 35. Adushkin V.V., Loktev D.N., Spivak A.A. 2008. The effect of baric disturbances in the atmosphere on microseismic processes in the crust. *Izv., Physics Solid Earth*, 44(6): 510–517. https://doi.org/10.1134/s1069351308060086

Об авторах

Богомолов Леонид Михайлович (https://orcid.org/0000-0002-9124-9797), доктор физико-математических наук, директор, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, bleom@mail.ru

Костылев Дмитрий Викторович (https://orcid.org/0000-0002-8150-9575), директор, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск; научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, d.kostylev@imgg.ru

Костылева Наталья Владимировна (https://orcid.org/0000-0002-3126-5138), научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, n.kostyleva@imgg.ru

Гуляков Сергей Александрович (https://orcid.org/0009-0001-7924-6972), младший научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, gulyakov_97@mail.ru

Дудченко Илья Павлович (https://orcid.org/0000-0002-4967-7405), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, руководитель отдела исследования геофизических полей и физических свойств геоматериалов ЦКП, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, ilpadu@mail.ru

Каменев Павел Александрович (https://orcid.org/0000-0002-9934-5855), кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии и региональной геологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, kamepav@mail.ru

Стовбун Николай Сергеевич (https://orcid.org/0009-0004-1927-798X), младший научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, nikolay19972016@gmail.com

Поступила 27.04.2023

Принята к публикации 21.05.2023

About the Authors

Bogomolov, Leonid M. (https://orcid.org/0000-0002-9124-9797), Doctor of Physics and Mathematics, Director, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, bleom@mail.ru

Kostylev, Dmitry V. (https://orcid.org/0000-0002-8150-9575), Director, Sakhalin Branch of the Federal Research Center “United Geophysical Survey of RAS”, Yuzhno-Sakhalinsk; Researcher, Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, d.kostylev@imgg.ru

Kostyleva, Natalya V. (https://orcid.org/0000-0002-3126-5138), Researcher, Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, n.kostyleva@imgg.ru

Gulyakov, Sergey A. (https://orcid.org/0009-0001-7924-6972), Junior Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, gulyakov_97@mail.ru

Dudchenko, Ilya P. (https://orcid.org/0000-0002-4967-7405), Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Center for Collective Use, Head of the Department, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, ilpadu@mail.ru

Kamenev, Pavel A. (https://orcid.org/0000-0002-9934-5855), Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Laboratory of geochemistry and regional geology, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, kamepav@mail.ru

Stovbun, Nikolai S. (https://orcid.org/0009-0004-1927-798X), Junior Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, nikolay19972016@gmail.com

Received 27 April 2023

Accepted 21 May 2023

© Авторы 2023 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2023. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.34

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.132-148>
<https://www.elibrary.ru/crpost>

Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2022 году

Д. А. Сафонов*¹, Е. П. Семенова²

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

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

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

Резюме. В работе представлен обзор сейсмичности южной части Дальнего Востока России в 2022 г., основанный на данных каталога регионального обрабатывающего центра «Южно-Сахалинск» Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН». Рассчитаны основные параметры сейсмичности: статистическая оценка уровня сейсмичности СОУС'09, графики Бенъофа, карты плотности условной упругой деформации в 2022 г. в сравнении с предыдущим более длительным временным интервалом. Дан краткий анализ наиболее значимых и интересных для детального изучения землетрясений. Сейсмичность Курило-Охотского, Сахалинского регионов и региона Приамурья и Приморья в 2022 г. оставалась в пределах фоновых значений. При этом в Сахалинском регионе отмечена сейсмическая активизация, проявившаяся умеренно-сильными событиями на северо-восточном шельфе, в Углегорском районе, к северу от п-ова Шмидта, а также сильным глубокофокусным событием в прол. Лаперуза с $M_w = 5.9$. Наиболее сильное землетрясение Курило-Охотского региона с $M_w = 6.0$ произошло в южной части Курильской островной дуги. Рассмотрена продолжительная серия умеренно-сильных событий на Средних Курилах с M_w до 5.6. Отмечена проблема оперативной обработки землетрясений Приамурья и Приморья в связи с уменьшающимся количеством сейсмических станций в этом регионе, а также систематическая недооценка энергетических характеристик глубокофокусных землетрясений.

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

Seismicity of the South Far East of Russia in 2022

Dmitry A. Safonov*¹, Elena P. Semenova²

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

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

²Sakhalin Branch, FRC "United Geophysical Survey of RAS", Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. The paper presents a review of the seismicity of the southern part of the Russian Far East in 2022 based on the data from the catalog of the "Yuzhno-Sakhalinsk" Regional Information Processing Center of the Sakhalin Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences". The main parameters of the seismicity, such as the statistical estimation of seismicity level SESL'09, Benioff diagrams, density maps of conditional elastic deformation in 2022 compared to the previous longer time interval, are estimated. A brief analysis of the most significant and interesting earthquakes for detailed study is given. The seismicity of the Kuril-Okhotsk, Sakhalin and the Amur and Primorye regions in 2022 remained within the background values. At the same time, seismic activation was noted in the Sakhalin region, manifested in a number of moderately strong events on the northeastern shelf, in the Uglegorsky district, north of the Schmidt Peninsula, as well as a strong mantle event in the La Perouse Strait with $M_w = 5.9$. The strongest earthquake of the Kuril-Okhotsk region with $M_w = 6.0$ occurred in the southern part of the Kuril Island arc. A long series of moderately strong events in the Middle Kurils with M_w up to 5.6 attracts attention. The problem of operational processing of earthquakes in the Amur region and Primorye due to the decreasing number of seismic stations in this region is noted, as well as the systematic underestimation of the energy characteristics of deep-focus earthquakes.

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

Для цитирования: Сафонов Д.А., Семёнова Е.П. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2022 году. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 2, с. 132–148. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.2.132-148>; <https://www.elibrary.ru/crpost>

Финансирование и благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного финансирования Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121022000085-9) 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/>). Авторы признательны рецензентам за конструктивные замечания.

Введение

Статья продолжает ежегодные обзоры [1] сейсмичности территории юга Дальнего Востока России на основе оперативного каталога землетрясений регионального информационно-обрабатывающего центра (РИОЦ) «Южно-Сахалинск» Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН).

Одной из основных задач РИОЦ «Южно-Сахалинск» является мониторинг сейсмичности зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН, которая включает в себя регионы Приамурье и Приморье, Сахалинский, Курило-Охотский.

Каталог РИОЦ «Южно-Сахалинск» содержит основные параметры зарегистрированных землетрясений, обработанных в оперативном режиме. В качестве основной энергетической характеристики принимается региональная магнитуда M_{wa} , для сильных событий ($M > 5.5$) базовой считается региональная моментная магнитуда $M_{w_{рег}}$, если такая определялась. К моменту написания статьи для отдельных сильных и умеренно-сильных землетрясений был определен механизм очага [2, 3].

Цель работы – оценить сейсмичность южной части Дальнего Востока РФ по оперативным данным. Основной акцент в статье сосредоточен на наиболее сильных по магнитуде и макросейсмическому эффекту землетрясениях, более детальные данные по которым станут доступны после окончательной обработки в течение следующего года.

Обзор сейсмичности приведен с использованием основных характеристик: статистиче-

For citation: Safonov D.A., Semenova E.P. Seismicity of the South Far East of Russia in 2022. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 2, pp. 132–148. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.2.132-148>; <https://www.elibrary.ru/crpost>

Funding and acknowledgements

The study was carried out within the framework of state funding of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme no. 12102200002000085-9) using the data obtained from a unique research facility “Seismic infrasound monitoring array for monitoring Arctic cryolithozone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, neighbouring territories and the world” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

The Authors are grateful to the Reviewers for the constructive suggestions.

ской оценки уровня сейсмичности СОУС’09, графиков Бенъофа. Для демонстрации пространственного распределения сейсмичности приведены карты эпицентров и плотности условной упругой деформации.

Исходные данные

Сеть сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2022 г. по сравнению с предыдущими годами [1, 4] несколько уменьшилась (рис. 1, 2). 30 сентября 2022 г. была закрыта сейсмическая станция «Горнотаежное» (GRTR). К концу 2022 г. сеть официально состояла из 47 пунктов непрерывных наблюдений: 37 стационарных и 10 автономных полевых локальной сети на юге о. Сахалин. С части стационарных сейсмических станций, включая «Вал» (VAL), «Головнино» (GLVR), «Новиково» (NOV), «Плато» (SK2), данные в течение года по техническим причинам фактически не поступали, со станции «Экимчан» (ЕКМР) данные поступали лишь первую треть года. Станции локальной сети южного Сахалина, а также Приамурья: «Бомнак» (BMKR), «Кировский» (KROS), «Октябрьский» (ОКТВ) и расположенная севернее станция «Охотск» (ОКНТ) работают без передачи данных в режиме реального времени, а потому не используются при составлении оперативного каталога. Кроме того, из числа доступных для обработки была часть станций, обслуживаемых другими организациями: «Чегдомын» (CHMN), «Ванино» (VNN), «Мыс Шульца» (MSH), «Ходутка» (KDT). Таким образом, наиболее слабая обеспеченность сейсмическими станциями для

целей оперативного каталога сложилась в регионе Приамурье и Приморье. По этим причинам, а также в связи с относительно слабой сейсмической активностью в оперативном каталоге 2022 г. в пределах данного региона присутствуют лишь 5 коровых и 3 глубокофокусных события. На полноту оперативного каталога остальной части зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН описанные изменения не оказали существенного влияния.

По данным каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» за 2022 год в обзор вошло (рис. 1): 2172 землетрясения Курило-Охотского региона, 443 – Сахалинского региона, 8 – Приамурья и Приморья.

Для 45 землетрясений определен тензор сейсмического момента центраида и моментная магнитуда [2, 3].

На территории юга Дальнего Востока России в 2022 г. зарегистрировано 63 ощутимых

землетрясения: 1 – в Приморье, 19 – в Сахалинском, 41 – в Курило-Охотском регионе и 2 с эпицентрами за пределами зоны ответственности филиала, но ощущавшиеся в населенных пунктах рассматриваемых регионов. Эпицентры ощутимых землетрясений показаны на рис. 2.

Основные характеристики сейсмичности

Одной из базовых характеристик для обобщенного описания сейсмичности является выделяющаяся в изучаемый период сейсмическая энергия, оцениваемая по магнитуде зарегистрированных землетрясений. Для расчета энергии в наших работах применяется формула Рихтера–Гуттенберга [5] для магнитуды по поверхностным волнам M_S или, в случае Дальнего Востока РФ, – M_{LN} . Поскольку в оперативном каталоге основной энергетической

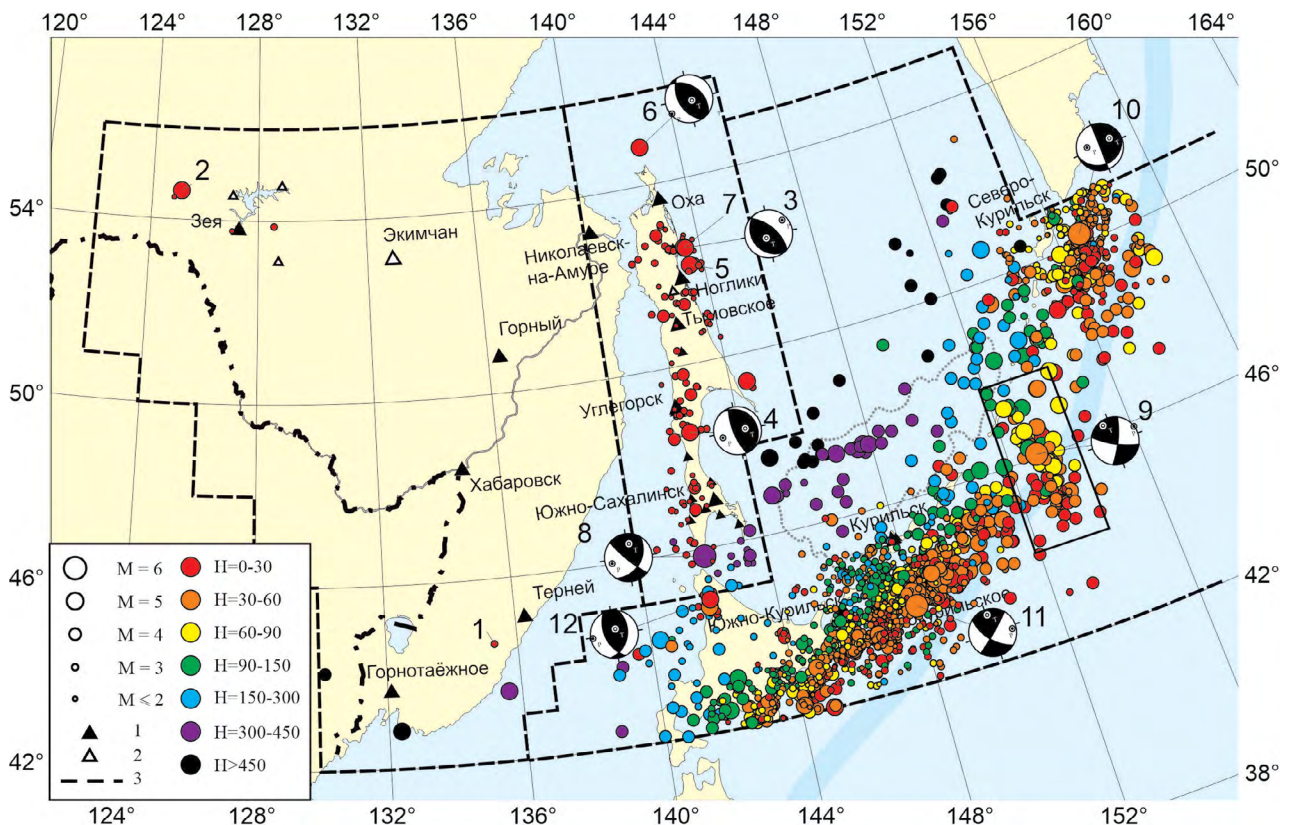


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2021 г. M – магнитуда; H – глубина гипоцентра, км; 1 – сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН, используемые в оперативной обработке; 2 – не используемые в оперативной обработке; 3 – границы регионов. Номера эпицентров землетрясений согласно таблице. Приведены механизмы очагов наиболее сильных землетрясений. Выделенный прямоугольником район показан на рис. 9.

Fig. 1. Earthquake epicenters map in the SB FRC UGS RAS responsibility zone in 2021. M – magnitude; H – hypocenter depth, km; 1 – seismic stations of the SB FRC UGS RAS used in operational processing; 2 – not used in operational processing; 3 – region borders. Numbers of the earthquake epicenters are given in accordance with Table. Focal mechanisms of the strongest earthquakes are given. The marked area is shown in Fig. 9.

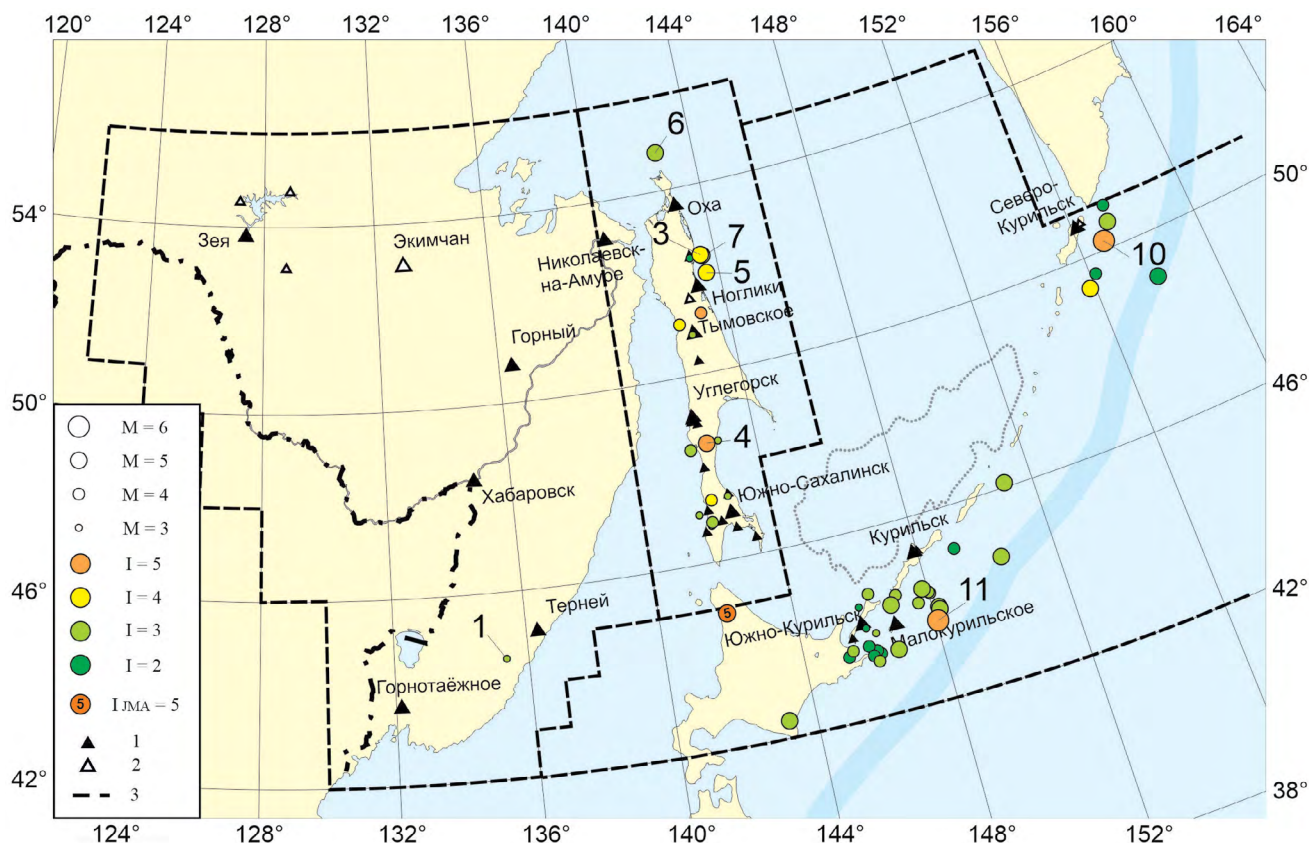


Рис. 2. Карта эпицентров ощутимых землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2022 г. M – магнитуда; I – максимальная интенсивность сотрясений, балл; 1 – сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН, используемые в оперативной обработке; 2 – не используемые в оперативной обработке; 3 – границы регионов. Номера эпицентров землетрясений согласно таблице.

Fig. 2. Appreciable earthquake epicenters map in the SB FRC UGS RAS responsibility zone in 2022. M – magnitude; I – maximum shaking intensity, point; 1 – seismic stations used in operational processing; 2 – not used in operational processing; 3 – region borders. Numbers of the epicenters are given in accordance with Table.

характеристикой является региональная магнитуда M_{wa} , в предыдущем годовом обзоре была предложена [1] формула для перехода к расчетной магнитуде $M^P(M_{LN})$. При этом для наиболее сильных землетрясений с $M \geq 5.5$ используются значения моментной магнитуды Mw_{per} , а в случае их отсутствия заимствовались значения Mw^* из соображений, что для сильных землетрясений ($M = 6.0-8.0$), как показано в работе [6], магнитуды M_s (она же M_{LN}) и Mw близки.

На рис. 3 б приводится график ежегодной суммарной сейсмической энергии изучаемых регионов за 10 лет с учетом 2022 г. Такое представление позволяет сделать вывод о росте суммарной сейсмической энергии в Приамурье и Приморье и Сахалинском регионе. Однако статистически более обоснованные выводы позволяют построить графики функции распределения годовой сейсмической энергии

по методике СОУС'09 [7] (рис. 4, 5) согласно следующей градации уровней сейсмичности (K – квантиль распределения):

- экстремально высокий – $K(0.995) < \lg \Sigma E$,
- высокий – $K(0.975) < \lg \Sigma E < K(0.995)$,
- фоновый пониженный – $K(0.025) < \lg \Sigma E < K(0.15)$,
- фоновый средний – $K(0.15) < \lg \Sigma E < K(0.85)$,
- фоновый повышенный – $K(0.85) < \lg \Sigma E < K(0.975)$,
- низкий – $K(0.005) < \lg \Sigma E < K(0.025)$,
- экстремально низкий – $\lg \Sigma E < K(0.005)$.

Основой для графиков функции распределения послужили региональные каталоги Приамурья и Приморья 1975–2022 гг., Сахалинского региона 1962–2022, Курило-

* GCMT. The Global Centroid-Moment-Tensor Project. – <https://www.globalcmt.org/> (accessed 31.03.2023)

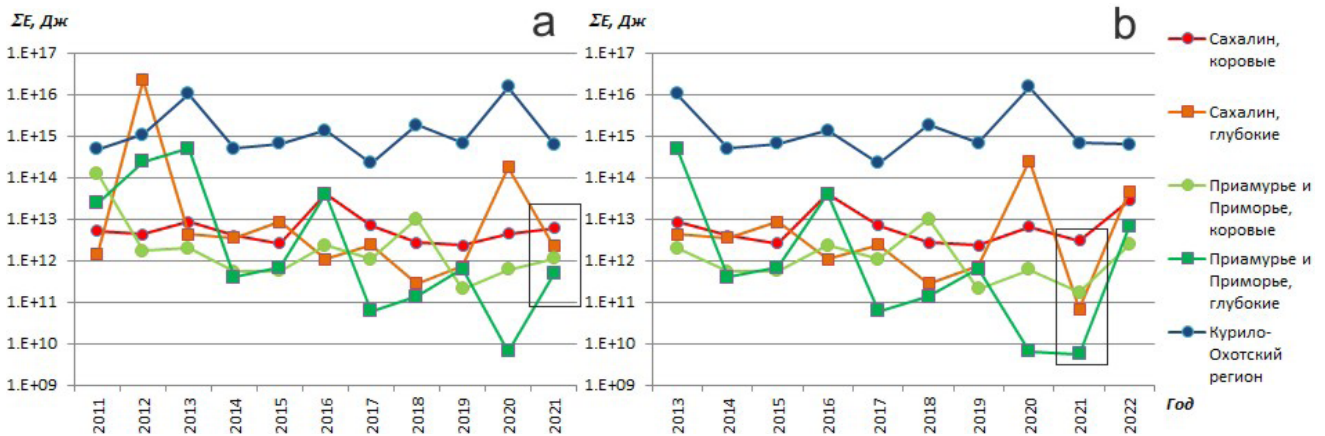


Рис. 3. Суммарная сейсмическая энергия землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН: (а) в 2011–2021 гг. из [1]; (б) в 2013–2022 г. по каталогу, составленному для данной работы.

Fig. 3. Total seismic energy of the earthquakes in the SB FRC UGS RAS responsibility zone: (a) in 2011–2021 from [1]; (b) in 2013–2022 according to the catalog compiled for this work.

Охотского региона 1920–2022 гг. [8–10], дополненные данными Сахалинского филиала СФ ФИЦ ЕГС РАН с учетом оперативного каталога за 2022 г. При этом данные 2021 г. в каталогах, использовавшихся в прошлом обзоре, заменены на окончательные параметры землетрясений Сахалинского филиала, подготовленные к публикации.

В регионе Приамурье и Приморье (рис. 4 а) уровень коровой и глубоководной сейсмичности 2022 г. оценивается как фоновый средний. В Сахалинском регионе (рис. 4 б) уровень коровой сейсмичности фоновый средний, но вблизи верхней границы этого диапазона, глубоководная сейсмичность

находится на повышенном фоновом уровне. В Курило-Охотском регионе (рис. 5) уровень сейсмичности вблизи границы среднего и пониженного фонового, примерно соответствует уровню прошлого года.

При сравнении графиков СОУС'09, полученных в данной статье, с предыдущим вариантом из обзора сейсмичности 2021 г. [1] выяснилось, что суммарный уровень сейсмической энергии Сахалинского региона 2021 г. на графиках годовой давности (рис. 3 а) находится существенно выше, чем на графике для обзора 2022 г. (рис. 3 б). Это относится и к глубоководной, и к коровой сейсмичности. Причина состоит в использовании окончательного ка-

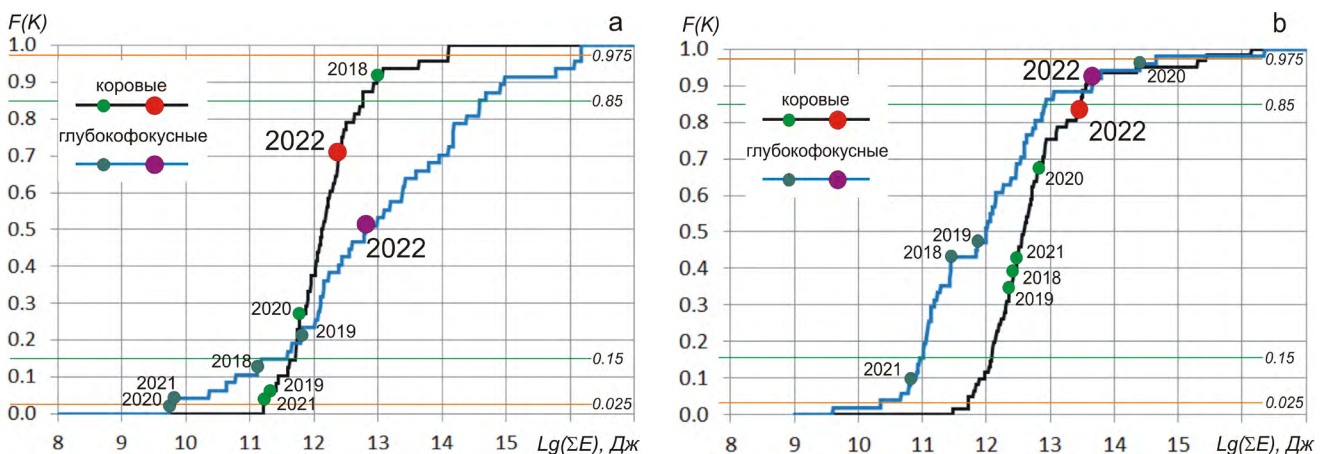


Рис. 4. Эмпирическая функция распределения годовой сейсмической энергии для коровых (черный цвет линии) и мантийных (синий цвет) землетрясений региона Приамурье и Приморье (а) и Сахалинского региона (б). Отмечены точки, соответствующие каждому году периода 2018–2022.

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 in the Sakhalin region (b). The points corresponding to each year of the period of 2018–2022 are marked.

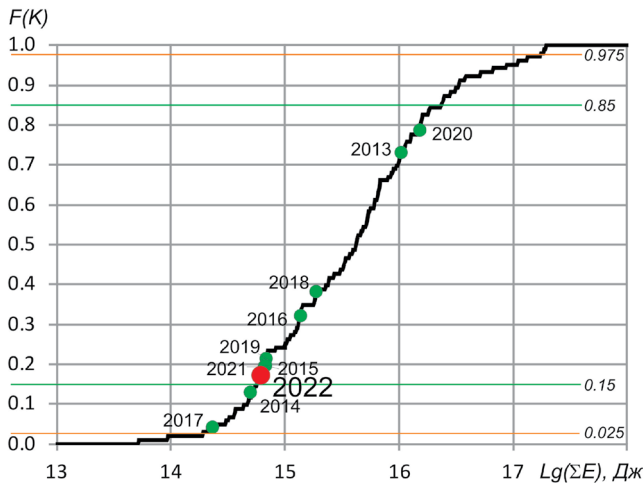


Рис. 5. Эмпирическая функция распределения годовой сейсмической энергии землетрясений Курило-Охотского региона. Отмечены точки, соответствующие каждому году периода 2013–2022.

Fig. 5. Empirical distribution function of the annual seismic energy of the earthquakes in the Kuril-Okhotsk region. The points corresponding to each year of the period of 2013–2022 are marked.

талога землетрясений Сахалинского филиала вместо оперативного. В результате переопределения энергетических характеристик оценка суммарной энергии сахалинских коровых землетрясений в 2021 г. уменьшилась вдвое, а глубокофокусных – на порядок. Также существенно уменьшились показатели суммарной сейсмической энергии 2021 г. в регионе Приамурье и Приморье: для коровых землетрясений – примерно в 7 раз, а для глубокофокусных – почти на два порядка.

Как показывает сравнение оперативного и окончательного каталогов, магнитуда умеренно-сильных и слабых коровых землетрясений, которые в основном были зарегистрированы в этих регионах в 2021 г., получена преимущественно пересчетом из энергетического класса K_C в $M^P(M_{LH})$, по формуле [11]:

$$M^P = (K_C - 1.2)/2. \quad (1)$$

При этом значение M^P действительно оказывается на 0.2–0.4 магнитудных единицы (м.е.) меньше, чем при пересчете из M_{wa} по формуле, приведенной в [1], что и дает разницу в суммарной энергии коровых событий. Кроме того, три относительно сильных коро-

вых землетрясения Приамурья с эпицентрами в пределах региона по оперативным данным не вошли в итоговый каталог, так как по окончательным данным оказались за пределами региона, что является следствием недостаточного развития сети сейсмических станций для целей оперативного определения параметров землетрясений.

Для глубокофокусных землетрясений ситуация несколько иная. Здесь в окончательном каталоге для слабых ($M < 4.5$) событий наиболее распространенными являются магнитуды M_{SHa} и M_{Pva} . Пересчет в M^P производится по формулам [12]:

$$M^P = (M_{SHa} - 1.71) / 0.75, \quad (2)$$

$$M^P = (M_{Pva} - 2.5) / 0.65. \quad (3)$$

При этом расчетные величины на 1–2 м.е. ниже собственных значений M_{SHa} и M_{Pva} , а также M_{wa} (РИОЦ «Южно-Сахалинск»), M_J^* и M_w^{**} . Последние три величины применяются для землетрясений с любой глубиной очага и довольно неплохо сходятся в диапазоне слабых и умеренно-сильных землетрясений, о чем мы сообщали в [13]. То есть применяемые в Сахалинском филиале для пересчета энергетических характеристик формулы дают значительно заниженные оценки магнитуды и нуждаются в пересмотре.

В Курило-Охотском регионе по причине более высокого уровня сейсмичности основной магнитудой, влияющей на суммарную энергию, является M_w , что обеспечивает более или менее однозначную оценку среднегодовой энергии землетрясений. Кроме того, указанные выше формулы для более сильных событий дают лучшее соответствие пересчетных значений. В регионах Приамурье и Приморье и на Сахалине ввиду меньшего количества сильных событий систематическая недооценка магнитуды землетрясений при пересчете прослеживалась и в предыдущие годы, хотя ранее это не было так очевидно, так как магнитуда M_{wa} не использовалась и сопоставления не проводились.

* JMA. Japan Meteorological Agency. – <https://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/earthquake.html> (accessed 31.03.2023).

** NIED. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan. – <http://www.fnet.bosai.go.jp> (accessed 31.03.2023).

Таким образом, необходим пересмотр как методов, применяемых для определения энергетических характеристик, так и переходных соотношений между уже определенными магнитудами и энергетическими классами для каталогов разных лет. В результате это должно привести к пересмотру уровней сейсмичности СОУС'09 и получению более корректных оценок, особенно для мантийной сейсмичности. В настоящий момент сопоставление сейсмической энергии землетрясений регионов Приамурья и Приморья и Сахалинского 2022 г. с предыдущими годами для глубокофокусных землетрясений лишено смысла.

В ходе исследования различных моделей деформирования горных пород в условиях тектонических напряжений Х. Беньоф [14] предположил, что упругая деформация вдоль разломной зоны пропорциональна сумме квадратных корней энергии произошедших здесь землетрясений:

$$E = pW = \frac{1}{2} \mu r \epsilon^2 V \text{ (эрг)}, \quad (4)$$

где W – накопленная упругая энергия, реализуемая в «быстром» землетрясении, E – сейсмическая часть этой энергии, p – доля сейсмической энергии в полной, реализованной при землетрясении, μ – модуль упругости, ϵ – деформация, V – объем среды.

То есть в некоторой системе разломов, если упругая деформация объема среды полностью реализуется в ходе «быстрого» землетрясения, корень излучаемой энергии землетрясения пропорционален упругой деформации (предшествующей землетрясению) этого объема.

$$E^{1/2} = k\epsilon \text{ (эрг}^{1/2}\text{)}. \quad (5)$$

Следовательно, в серии землетрясений для одного объема среды кумулятивная сумма параметра $E^{1/2}$ отдельных событий представляет собой суммарное приращение деформации, и график накопленной суммы этих приращений во времени отражает примерный процесс деформирования среды [14], а усредненный коэффициент наклона графика k отражает скорость накопления упругой энергии.

Подход Беньофа к настоящему времени считается несколько упрощенным, поэтому введенный им параметр $E^{1/2}$ принято называть

«условной» упругой деформацией. Отмечено, что, несмотря на разные магнитуду и временной интервал между сильными землетрясениями, верхняя огибающая получаемого графика остается близка к прямой линии. Причем это верно для рассматриваемых участков деформируемой среды различного масштаба при достаточно большом временном интервале. Наклон графика Беньофа на коротких временных интервалах отражает сейсмическую активизацию либо сейсмическое затишье, предвещающее сильное землетрясение. Наряду с суммарной энергией, оцениваемый по магнитуде землетрясений, параметр Беньофа позволяет отслеживать сейсмический процесс, выделяя стадии затишья, активизации и фонового уровня сейсмичности между сильными событиями.

В отличие от суммарной сейсмической энергии ΣE , использование параметра $\Sigma E^{1/2}$ позволяет уменьшить влияние пиковых значений от наиболее сильных землетрясений; уменьшается влияние погрешности оценки магнитуды отдельных сильных событий, а роль сейсмических активизаций роевого характера возрастает. При этом необходимо помнить, что рассчитываемый параметр не имеет строгого физического смысла, в отличие от суммарной сейсмической энергии или сейсмического момента.

Как и в предыдущих ежегодных обзорах, получен график Беньофа для Курило-Охотского региона. Представлен также график Беньофа для коровых землетрясений Сахалинского региона за год и 10 лет (рис. 6).

Как видно из рис. 6 а, в 2022 г. наклон графика для Курило-Охотского региона остается постоянным, примерно соответствующим значению предыдущего года и других «спокойных» лет. В течение года (рис. 6 б) выделяется сейсмическая активизация, связанная с землетрясением 24 апреля, причем ступень на графике существенно больше, чем можно ожидать от события с $M_w = 5.6$. Рой землетрясений на Средних Курилах, частью которого является это землетрясение, а также связанные с ним события, образовавшие небольшую ступень на графике в начале марта, будут рассмотрены ниже.

На графике Беньофа для коровых землетрясений Сахалинского региона за десятилетний период (рис. 6 с) значительной активи-

зацией выделяются 2022 год, сопоставимый с 2016 г., когда произошло сильное Онорское землетрясение $M_w = 5.8$ в средней части острова, а также 2013 год, когда, как и в 2022, произошло несколько умеренно-сильных событий в северной и южной частях региона.

На годовом графике (рис. 6 d) наблюдаются ступени наиболее сильных событий ($M_{wa} = 4.6-5.4$), описанных ниже. По сравнению с Курило-Охотским регионом, в Сахалинском даже относительно слабые землетрясения образуют заметную ступень на графике Беньофа, что обусловлено меньшей сейсмичностью и относительно небольшими размерами региона.

Представленные на рис. 6 графики в применении к большой сейсмоактивной зоне ма-

лопригодны для прогностических целей, за исключением событий максимальной магнитуды, которые при подготовке способны вызвать значительный долговременный спад уровня сейсмичности во всем регионе. Поэтому помимо общих региональных графиков логичнее построить их районные варианты, более полезные на длительных временных промежутках, либо перейти к распределению параметра Беньофа по площади, что и было сделано.

Величина плотности условной упругой деформации в единицу времени рассчитывалась по формуле

$$e = 1000 \cdot \Sigma E^{1/2} / (S \cdot T), \quad (6)$$

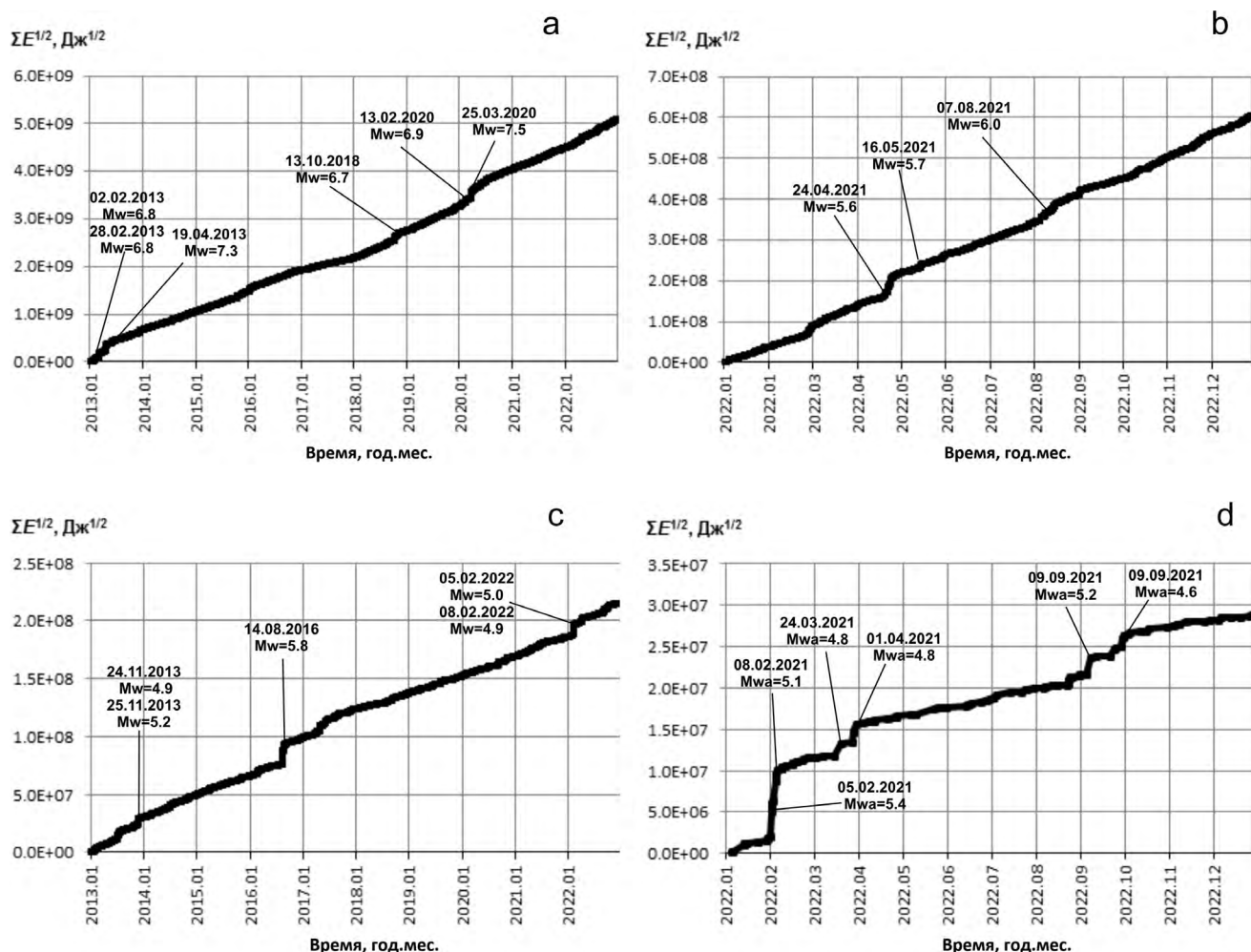


Рис. 6. График Беньофа для Курило-Охотского региона по данным СФ ФИЦ ЕГС РАН за 2013–2022 гг. (а) и РИОЦ «Южно-Сахалинск» за 2022 г. (b); для коровых землетрясений Сахалинского региона по данным СФ ФИЦ ЕГС РАН за 2013–2022 гг. (с) и РИОЦ «Южно-Сахалинск» за 2022 г. (d).

Fig. 6. Benioff diagrams for the Kuril-Okhotsk region by the data of the SB FRC UGS RAS catalogs for 2013–2022 (a) and the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC catalog for 2022 (b); Benioff diagrams for the crustal earthquakes of the Sakhalin region by the data of the SB FRC UGS RAS catalogs for 2013–2022 (c) and the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC catalog for 2022 (d).

где E – энергия землетрясения, Дж; S – площадь поверхности, содержащей эпицентр землетрясения, км²; T – длительность временного отрезка, год. Условная деформация усреднялась на площадке размером $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ скользящим окном с шагом 0.1° и приводилась к площади в 1000 км² (для годовой карты масштаб усреднения по каждой координате удваивался из-за меньшего числа событий). Для сильных ($M \geq 7.5$) землетрясений величина e перераспределялась на примерную площадь их очаговых зон, расположенных в соответствии с расчетными моделями finite fault (USGS. United States Geological Survey. – <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (accessed 31.03.2023)). В отличие от предыдущего обзора [1], в данной статье мы используем более длительные каталоги, потому ввели в расчетную формулу время (31 год). В случае многолетней карты получаемый параметр имеет смысл не плотности условной упругой деформации в пересчете на 1000 км², а средней скорости накопления этого параметра. При построении изолинии дополнительно сглаживались средствами ПО Surfer. На рис. 7 а показана карта распределения величины e в 2022 г., на рис. 7 б – за предшествующий период с 1981 по 2021 г.

Для построения карты распределения e в период с 1981 по 2021 г. на территории Курило-Охотского и Сахалинского регионов использовались каталоги из фондов Геофизической службы, опубликованные в ежегодниках «Землетрясения в СССР», «Землетрясения Северной Евразии», и окончательные варианты каталогов, готовящихся к публикации (2018–2021 гг.). Для региона Северных Курил, входящего в зону ответственности за составление окончательного каталога Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН, использованы материалы с официального сайта этой организации (<http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (accessed 31.03.2023)) [15].

Картина распределения параметра e за 30-летний период хорошо согласуется с картиной распределения этого параметра за предыдущие 10 лет [1] и общими представлениями о характере деформирования земной коры и верхней мантии в Курило-Охотском и Сахалинском регионах. Максимальные зна-

чения средней годовой величины условной упругой деформации, составляющие примерно $e = 1-5 \cdot 10^6$ Дж^{1/2}/год на 1000 км², протягиваются полосой между Курильской островной дугой и глубоководным желобом, в основном это результат землетрясений в зоне контакта литосферных плит, в том числе наиболее сильного – Симуширского 2006 г. с $M_w = 8.3$. При этом очаговая зона этого сильнейшего события в районе Средних Курил почти не выделяется на фоне других участков с пиковыми значениями параметра Беньюфа, что при условии прямого толкования этого параметра могло бы говорить в пользу относительно равномерного деформирования зоны контакта плит на 30-летнем интервале. Наибольшие значения $e = 8-12 \cdot 10^6$ Дж^{1/2}/год на 1000 км² находятся на южном фланге Курильской гряды вблизи очаговой зоны Шикотанского землетрясения 1994 г. с $M_w = 8.2$, причем максимальные значения обеспечиваются не столько этим сильнейшим землетрясением, сколько обилием менее сильных событий. По крайней мере на 30-летнем временном отрезке Южные Курилы более сейсмически активны, чем другие участки региона. Минимальные значения e вдоль дуги, которые могут свидетельствовать об областях сейсмического затишья и подготовки сильных землетрясений, расположены в районе о. Симушир юго-западнее очага одноименных землетрясений, северо-восточнее этой очаговой зоны, где особенно выделяется участок ближе к желобу, и в районе среднего Хоккайдо. На охотоморской стороне островной дуги в основном располагаются эпицентры глубоководных землетрясений, так как коровая сейсмичность Охотской плиты довольно слабая. Поле параметра Беньюфа здесь фрагментировано из-за меньшей плотности эпицентров. Максимумы параметра e выделяются очаговые зоны Охотоморских землетрясений 2012 г. с $M_w = 7.7$ и 2013 г. с $M_w = 8.3$ с предшествовавшим ему событием 2008 г. $M_w = 7.7$.

В Сахалинском регионе максимальные значения параметра e связаны с крупнейшими землетрясениями в рассматриваемый 30-летний период: Нефтегорским 1995 г. с $M_w = 7.0$, Углегорским 2000 г. с $M_w = 6.8$ и Невельским 2008 г. с $M_w = 6.2$. Остальные землетрясения несколько теряются на данном фоне, не образуя

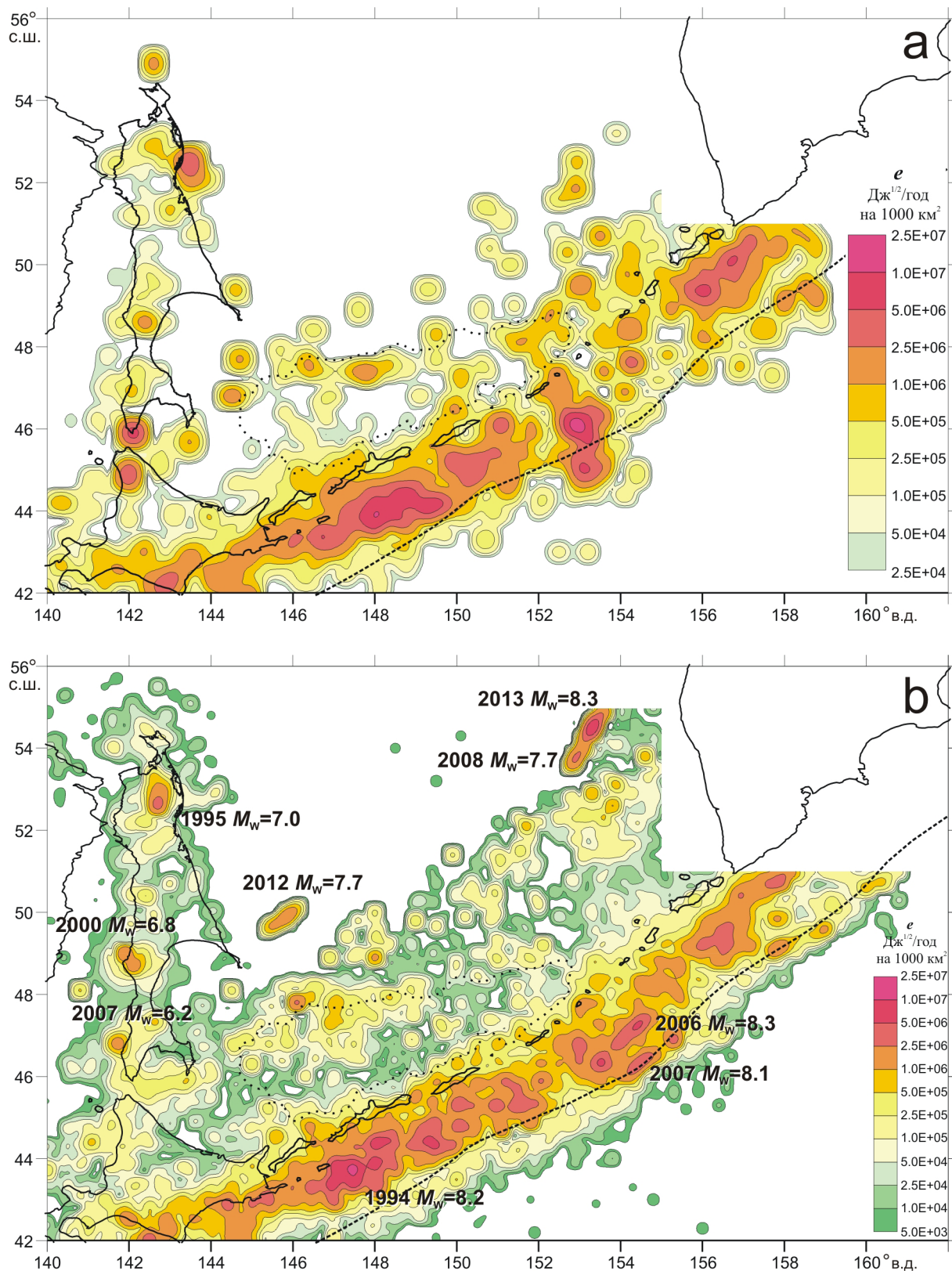


Рис. 7. Плотность условной упругой деформации Сахалинского и Курило-Охотского регионов по данным каталогов РИОЦ «Южно-Сахалинск» 2022 г. (а) и СФ ФИЦ ЕГС РАН 1981–2022 гг. (б). Обозначены наиболее значимые региональные землетрясения. Пунктиром показано положение Курильского глубоководного желоба и Курильской глубоководной котловины.

Fig. 7. Density of conditional elastic deformation of the Sakhalin and Kuril-Okhotsk regions by the data of the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC earthquake catalogs in 2022 (a) and the earthquake catalogs of the SB FRC UGS RAS in 1981–2021 (b). The most significant regional earthquakes are marked. The position of the Kuril deep-sea trench and the Kuril deep-sea depression is shown by the dotted line.

общей полосы повышенных значений e , протянувшейся вдоль острова, как это было по данным за более спокойные годы 2012–2021 [1], что является следствием более долгих периодов подготовки сильнейших землетрясений региона, чем в районе Курильской гряды.

В 2022 г. (рис. 7 а) в Курило-Охотском регионе области пиковых значений параметра e , сопоставимых с максимумами средних значений за 31 год, образуют три группы в южной, центральной и северной части гряды, соответствующие положению эпицентров трех сильнейших землетрясений 2022 г. При этом центральная область вытянута вкрест дуге в меридиональном направлении, причина такой ориентации рассмотрена ниже.

Максимальные значения плотности условной упругой деформации, распределенной на площади обоих регионов, близки к ее средним ежегодным величинам. Так как сильное характеристическое землетрясение готовится значительно дольше одного года, все произошедшие в 2022 г. события следует отнести к фоновой сейсмичности.

Обзор сильных землетрясений Приамурья, Приморья, Курило-Охотского и Сахалинского регионов

Как отмечалось выше, в 2022 г. по оперативным данным РИОЦ «Южно-Сахалинск» в регионе *Приамурье и Приморье* зарегистрировано пять коровых землетрясений. Единственное ощутимое (3 балла) событие отмечено 23 мая в 10:38 UTC ($M_{wa} = 3.2$, $H = 10$ км; № 1 в таблице и на рис. 1, 2), колебания почувствовали жители г. Дальнегорск Приморского края. На верхних этажах зданий звенела посуда, падали картины со стен и цветы с подоконников. На нижних этажах событие практически не ощущалось. Согласно оперативному каталогу, эпицентр землетрясения расположен в 20 км от Дальнегорска.

Наиболее сильное землетрясение с гипоцентром в земной коре произошло 28 января в 04:40 ($M_{wa} = 4.8$, $H = 29$ км; № 2 в таблице и на рис. 1) в районе горного хребта Тукурингра западнее Зейского водохранилища в сейсмически активном районе Верхнего Приаму-

рья, где ранее неоднократно регистрировались события магнитудой до $M = 5.0–5.5$, связанные с сейсмичностью Южно- и Северо-Тукурингского разломов.

Эпицентры двух глубокофокусных землетрясений отмечены вблизи побережья Приморья, еще одно – в приграничном районе Китая.

К *Сахалинскому региону* в оперативном каталоге 2022 г. относятся 440 землетрясений, из них 17 мантийных на продолжении Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны (рис. 1). По 15 событиям поступили данные об ошущимости жителями Сахалинской области (рис. 2).

Наиболее сильное по магнитуде коровое землетрясение Сахалинского региона произошло 5 февраля в 21:18 UTC ($M_{wa} = 5.3$, $Mw_{per} = 5.0$, $H = 22$ км; № 3 в таблице и на рис. 1, 2). Эпицентр события расположен на шельфе у северо-восточного побережья о. Сахалин примерно на широте с. Чайво. Моментная магнитуда события по данным GСMT $Mw_{GСMT} = 5.3$, что, вероятно, ближе к реальной величине события. Землетрясение ощущалось в северной части острова, сильные сотрясения отмечены на побережье в поселках и на предприятиях, связанных с добычей углеводородов, а также на расположенных на шельфе буровых платформах. По данным СФ ФИЦ ЕГС РАН, механизм очага землетрясения взбросового типа, событие произошло в условиях диагонального СВ-ЮЗ сжатия, nodальные плоскости падают соответственно на северо-восток под углом $DP = 63^\circ$ и на юго-запад более полого $DP = 27^\circ$. Детальному изучению данного события посвящена статья [16], в которой приведен эпицентр землетрясения по данным локальной сети станций, а также показано облако афтершоков. Землетрясение связано с ранее слабо активным Пильтун-Чайвинским разломом. Показаны параметры реальной и расчетной интенсивности сотрясений и пиковых грунтовых ускорений. Сделан вывод о естественной тектонической природе события, а также дана оценка максимальной магнитуды и периода повторяемости сильных землетрясений для северо-восточного шельфа о. Сахалин.

Интересно также, что на основании изучения афтершоковых процессов других землетрясений Сахалина и отсутствия сильно-

го афтершока первых суток у землетрясения 5 февраля 2022 г. в статье [16] (поступила в редакцию в июне 2022 г.) делается предположение о вероятном повторном землетрясении в том же районе в следующие несколько месяцев. Повторное умеренно-сильное землетрясение с эпицентром примерно в том же районе произошло 1 октября в 04:08 UTC ($M_{wa} = 4.6$, $H = 22$ км; № 7 в таблице и на рис. 1, 2). Событие ощущалось на побережье; в пос. Ноглики и Чайво интенсивность сотрясений оценивается в 3-4 балла.

24 марта в 21:52 UTC в 40 км к югу от эпицентра февральского землетрясения произошло еще одно умеренно-сильное событие ($M_{wa} = 4.8$, $M_{w_{GCMТ}} = 4.7$, $H = 5$ км; № 5 в таблице и на рис. 1, 2). Согласно GCMТ, в очаге землетрясения реализовался взброс примерно с теми же параметрами, что и в феврале. В статье [16] это землетрясение также связывается с подвижкой по Пильгун-Чайвинскому разлому и считается спровоцированным перераспределением Кулоновских напряжений после более сильного февральского события. Интенсивность сотрясений, вызванных землетрясением 24 марта, по данным Сахалинского филиала, достигала 3-4 баллов в ближайших поселках.

8 февраля в 22:29 UTC произошло землетрясение в южной половине острова на стыке Углегорского и Макаровского районов ($M_{wa} = 5.1$, $M_{w_{per}} = 4.9$, $H = 14$ км; № 4 в таблице и на рис. 1, 2). Механизм очага надвигового типа с субширотным простиранием нодальных плоскостей: крутой плоскости западного падения ($DP = 74^\circ$) и пологой восточного ($DP = 17^\circ$). Возможно, землетрясение произошло в зоне Западно-Сахалинского разлома, чей сегмент находится в двух десятках километров западнее эпицентра. Вместе с тем, по имеющимся данным, с большей интенсивностью землетрясение ощущалось в поселках восточного побережья острова: в Восточном до 5 баллов, Макарове и Красногорске – 4 балла; на западном побережье – до 3-4 баллов. Поэтому эпицентр землетрясения может оказаться ближе к восточному побережью и являться следствием подвижки по одному из второстепенных разломов, секущих Западно-Сахалинские горы.

9 сентября в 09:01 UTC отмечено землетрясение в Охотском море севернее п-ова Шмидта ($M_{wa} = 5.0$, $M_{w_{per}} = 4.5$, $H = 5$ км; № 5 в таблице и на рис. 1, 2). Этот район интересен тем, что здесь заканчивается Сахалинский пояс сейсмичности, связываемый с границей Амурской и Охотской литосферных плит, о дальнейшем положении этой границы устойчивого мнения пока не сформировано, каждое сильное землетрясение с известным механизмом очага вносит вклад в понимание тектонической обстановки. Согласно данным СФ ФИЦ ЕГС РАН, землетрясение произошло в условиях ВСВ-ЗЮЗ горизонтального сжатия с незначительной сдвиговой компонентой, что близко к представлениям о поле напряжений северо-восточной части Сахалина. Несмотря на удаленность эпицентра, событие ощутили в населенных пунктах севера острова с интенсивностью в 2 балла.

Наиболее сильное по магнитуде землетрясение Сахалинского региона в 2022 г. произошло в мантии с эпицентром в прол. Лаперуза 2 июля в 01:59 UTC ($M_{wa} = 5.9$, $M_{w_{per}} = 6.1$, $H = 323$ км; № 8 в таблице и на рис. 1). Механизм очага взбросо-сдвигового типа с субвертикальной плоскостью юго-восточного простирания и наклоненной на юго-восток под углом $DP = 64^\circ$ плоскостью северо-восточного простирания. Такая ориентация нодальных плоскостей в системе отсчета, связанной с погружающейся Тихоокеанской плитой, соответствует чистому сдвигу и наиболее распространена среди мантийных землетрясений южной части Сахалинского региона [17], при этом одна из возможных плоскостей подвижки совпадает с направлением движения плиты, а вторая ему ортогональна. Возможно, причиной мантийных землетрясений в этой части субдуцирующей плиты являются подвижки по одному или нескольким трансформным разломам.

В *Курило-Охотском регионе* в 2022 г. зарегистрировано 2172 землетрясения, 50 из них вызвали ощутимые колебания на территории Сахалинской области (рис. 2).

Согласно графику Беньофа (рис. 6 б), наиболее значительная сейсмическая активизация в Курило-Охотском регионе в 2022 г. связана с роением землетрясений в районе глубоководно-

го желоба вблизи о. Симушир в средней части Курильской гряды. В течение весны–лета 2022 г. в двух смежных очаговых зонах зарегистрировано семь землетрясений магнитудой $M_{wa} > 5.0$, еще 40 событий с $M_{wa} > 4.0$ и около 50 более слабых (рис. 1, 8). Наиболее сильное землетрясение серии произошло 24 апреля в 01:35 UTC ($M_{w_{per}} = 5.6$, $M_{wa} = 6.0$, $H = 41$ км; № 9 в таблице и на рис. 1). Ощутимых проявлений событий серии в населенных пунктах островов отмечено не было.

Редкая сейсмическая сеть Геофизической службы в районе Курильских островов приводит к значительной погрешности в определении координат гипоцентров землетрясений Средних Курил, потому события серии вытянулись меридионально на расстояние около 200 км (рис. 8). Однако совместное рассмотрение положения эпицентров и механизмов очага позволяет установить, что активизация происходила примерно в одно время в двух, вероятно относительно небольших очаговых зонах: рой умеренно-сильных землетрясений за Курило-Камчатским глубоководным желобом в пределах Тихоокеанской литосферной плиты и серия более сильных землетрясений севернее, с эпицентрами между желобом и островами.

Для наиболее сильного события из первой группы, произошедшего 11 марта в 07:07 UTC ($M_{w_{per}} = 5.0$, $M_{wa} = 5.1$, $H = 42$ км), был определен механизм очага – сбросовый, с нодальными плоскостями, ориентированными вдоль желоба (рис. 8). Такие землетрясения реализуются в условиях растяжения верхней части Тихоокеанской плиты, возникающего из-за ее изгиба.

С 21 апреля началась активизация во втором очаге умеренно-сильным землетрясением в 2:38 UTC ($M_{w_{per}} = 5.0$, $M_{wa} = 5.4$, $H = 22$ км). Затем произошло землетрясение 24 апреля с $M_{wa} = 6.0$ и примерно в том же районе 25 апреля в 05:35 UTC ($M_{w_{per}} = 5.2$, $M_{wa} = 5.5$, $H = 12$ км), а также еще несколько событий. Механизмы очага трех названных землетрясений (рис. 8) классифицированы как сдвиговые с небольшой взбросовой или сбросовой компонентой, при этом одна из нодальных плоскостей ориентирована вкост островной дуге, как и облако эпицентров наиболее круп-

ных землетрясений роя. Небольшая глубина некоторых из зарегистрированных событий позволяет предположить, что землетрясения стали следствием левосторонней сдвиговой сейсмодислокации в аккреционной призме, составляющей фронтальную часть Охотской литосферной плиты. Повышенная сейсмическая активность продолжилась в смежных очаговых зонах в течение весенних-летних месяцев.

Наибольший макросейсмический эффект в 2022 г. вызвало землетрясение, произошедшее в северной части Курильской гряды 16 мая в 05:25 UTC ($M_{wa} = 5.8$, $M_{w_{GCMT}} = 5.6$, $H = 48$ км; № 10 в таблице и на рис. 1, 2). В г. Северо-Курильск интенсивность сотрясений оценивается

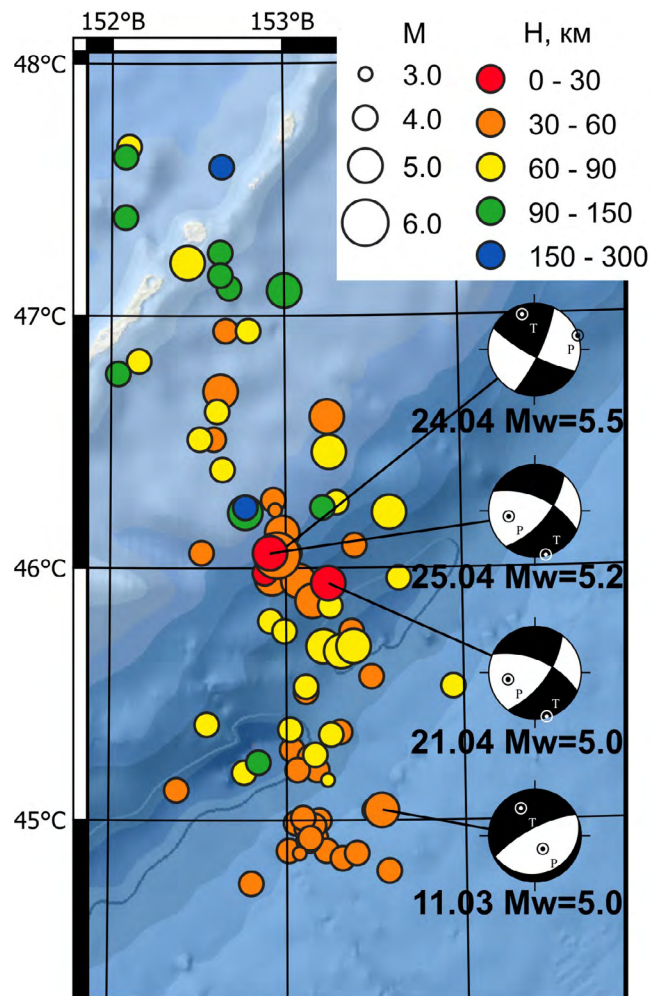


Рис. 8. Землетрясения Средних Курильских островов 2022 г. M – магнитуда; H – глубина гипоцентра. Приведены механизмы очагов, дата и магнитуда землетрясений, упомянутых в тексте.

Fig. 8. Earthquakes of the Middle Kuril Islands in 2022. M – magnitude; H – hypocenter depth, km. Focal mechanisms, date and magnitude of the earthquakes mentioned in the text are given.

в 5 баллов. На рис. 1 показан механизм очага землетрясения (по данным Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН [15]), который интерпретируется как взрез с вертикальной плоскостью меридионального простирания и субгоризонтальной широтного простирания. Такой механизм очага не является обычным для субдукционной системы и требует отдельного изучения, например, по окончательным данным Камчатского филиала, в чьей зоне ответственности за каталог землетрясений это событие произошло.

В южной части Курильской островной дуги наиболее сильным событием в 2022 г. оказалось землетрясение 7 августа в 13:40

UTC ($M_{w\text{рег}} = 6.0$, $M_{\text{wa}} = 6.0$, $H = 59$ км; № 11 в таблице и на рис. 1, 2). Событие ощущалось во всех населенных пунктах юго-западного фланга дуги, интенсивность сотрясений достигала 4-5 баллов. Механизм очага землетрясения классифицируется как сдвиг с левосторонней подвижкой вкост дуги либо правосторонней вдоль дуги. Землетрясение не имело значительной афтершоковой последовательности, потому выделить наиболее вероятную плоскость подвижки на этой основе по оперативным данным нет возможности. Сильные сдвиговые события в пределах субдукционной системы являются более редкими, чем

Таблица. Параметры наиболее значимых землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН 2022 г. (по оперативным данным РИОЦ «Южно-Сахалинск»)

Table. Parameters of the most significant earthquakes in the SB FRC UGS RAS responsibility zone in 2022 (according to the operational data of the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC)

№ П/П	Дата / Date	Время / Time t_0	ϕ N	λ E	h , км	$M_{\text{wa}} M_w$	Интенсивность сотрясений (населенный пункт, балл / Shaking intensity (settlement, points))
	day.mth.year	h:min:sec					
Приамурье и Приморье / Amur-Primorye region							
1	23.05.2022	10:38:42	44.6	135.3	2	3.2 –	г. Дальнегорск (Приморский край), 3
2	28.05.2022	04:40:58	54.62	125.16	29	4.8 –	Нет данных об ощутимости
Сахалинский регион / Sakhalin region							
3	05.02.2022	21:18:52	52.47	143.53	22	5.3 5.0	пос. Ноглики, с. Вал, 4; г. Оха, 3; пос. Тунгор, Эхаби, Восточный, 2-3; пос. Некрасовка, Москальво, 2
4	08.02.2022	22:29:02	48.52	142.42	14	5.1 4.9	с. Восточное, 5; пос. Макаров, Красногорск, 4; г. Углегорск, пос. Поречье, Томари, Ильинское, Краснополье, 3-4; Шахтерск, 3
5	24.03.2022	21:52:29	52.09	143.56	5	4.8 –	с. Горячие Ключи, 4; г. Ноглики, 3; с. Вал, 2-3; с. Ныш, 2
6	09.09.2022	09:01:51	54.81	142.63	10	5.0 4.5	г. Оха, пос. Некрасовка, Москальво, 2
7	01.10.2022	04:08:21	52.49	143.48	10	4.6 –	пос. Ноглики, Чайво, 3-4; с. Вал, 2-3; г. Александровск-Сахалинский, 2
8	02.07.2022	01:59:45	45.81	142.12	323	6.1 5.9	Нет данных об ощутимости
Курило-Охотский регион / Kuril-Okhotsk region							
9	24.04.2022	01:35:02	46.05	152.95	41	6.0 5.6	Нет данных об ощутимости
10	16.05.2022	05:25:52	50.18	156.85	48	5.8 -	г. Северо-Курильск, 5 (Сахалинская обл.)
11	07.08.2022	13:40:42	43.69	148.08	59	6.0 6.0	пос. Южно-Курильск, Лагунное, Горячий Пляж, Головнино, Малокурильское, Крабовозовское, Горячие Ключи, Горный, 4-5; г. Курильск, с. Рейдово, 4 (Сахалинская обл.)
12	10.08.2022	15:53:00	44.86	142.04	11	5.2 5.2	о. Хоккайдо, Япония, до 5+ по шкале JMA*

* <https://earthquake.tenki.jp/bousai/earthquake/detail/2022/08/11/2022-08-11-00-53-02.html>

взбросовые, и могут пролить свет на вопросы фрагментации зоны субдукции и размеров возможных очаговых зон катастрофических землетрясений, а потому важны для изучения.

Еще одно интересное умеренно-сильное событие 2022 г. произошло в земной коре в северной части о. Хоккайдо, Япония, 10 августа в 15:53 UTC ($M_{w\text{ per}} = 5.2$, $M_{wa} = 5.2$, $H = 11$ км; № 12 в таблице и на рис. 1). Землетрясение ощущалось на о. Хоккайдо; по данным ЖМА, интенсивность сотрясений достигала 5 баллов шкалы ЖМА. Землетрясение явилось следствием взброса с небольшой сдвиговой компонентой в условиях субширотного сжатия с примерно одинаковым наклоном нодальных плоскостей к востоку-юго-востоку и западу-юго-западу, однако ориентация афтершокового облака, вытянутого примерено в ЮЗ-СВ направлении, позволяет предположить, что подвижка произошла вдоль плоскости ВЮВ падения. Земная кора севера о. Хоккайдо составляет с южной частью о. Сахалин единую складчатую систему, потому изучение землетрясений в земной коре этого региона представляет интерес для исследователей общей тектоники островов.

Заключение

В оперативный каталог 2022 г., составленный по данным РИОЦ «Южно-Сахалинск», вошло 2172 землетрясения Курило-Охотского региона, 443 – Сахалинского региона, 8 землетрясений Приамурья и Приморья.

Малое количество землетрясений Приамурья и Приморья объясняется относительно слабой сейсмичностью региона, а также уменьшающимися возможностями сети СФ ФИЦ ЕГС РАН по регистрации здесь землетрясений в оперативном режиме. Количество станций филиала в этом регионе, передающих данные в РИОЦ в режиме реального времени, а потому доступных для составления оперативного каталога, к концу 2022 г. сократилось до четырех. С учетом уменьшения числа доступных станций других организаций в регионе, регистрация слабых событий здесь становится затруднительной, что приводит к значительной погрешности при определении параметров землетрясений.

По формальному признаку СОУС'09 в 2022 г. сейсмичность всех трех регионов остается в пределах фонового уровня. Для Сахалинского региона уровень коровой сейсмичности фоновый средний, но вблизи верхней границы этого диапазона глубоководная сейсмичность находится на повышенном фоновом уровне. В Курило-Охотском регионе уровень сейсмичности вблизи границы среднего и пониженного фонового, примерно соответствует уровню прошлого года.

Отмечено несоответствие статистической оценки СОУС'09 за 2021 г., сделанной в предыдущем обзоре по оперативным данным [1] и в нынешнем обзоре по окончательному каталогу СФ ФИЦ ЕГС РАН для Сахалинского региона и региона Приамурья и Приморья. Основная причина расхождений – в используемых пересчетных формулах для перехода от магнитуд M_{SHA} и M_{PVA} к расчетной магнитуде M^P . Используемые формулы 1978 г. дают сильно заниженные оценки для слабых и умеренно-сильных событий и нуждаются в пересмотре.

Получена карта распределения условной упругой деформации e (по Беньофу) по площади Сахалинского и Курило-Охотского регионов для 2022 г. Для сравнения приводится карта средней скорости накопления этого параметра в 1981–2021 гг. В 2022 г. в Курило-Охотском регионе пиковые значения параметра e расположены в южной, центральной и северной частях гряды тремя группами, соответствующими положению эпицентров трех сильнейших сейсмических активизаций 2022 г. При этом центральная область вытянута вкрест дуге в меридиональном направлении, так как в этом районе весной–летом 2022 г. происходили параллельно два роя землетрясений. Предполагается, что первый из них, с M_w до 5.6, связан со сбросовыми событиями на изгибе Тихоокеанской плиты в районе глубоководного желоба, а второй, с M_w до 5.0, – с левосторонней сдвиговой сейсмодислокацией во фронтальной части Охотской литосферной плиты. Наиболее сильное землетрясение Курило-Охотского региона с $M_w = 6.0$ произошло в южной части Курильской островной дуги. Отмечены также землетрясения с $M_{wa} = 5.8$ на севере Курил с максимальной для 2022 г. зарегистриро-

ванной интенсивностью в 5 баллов и коровое событие с $M_w = 5.2$ на Хоккайдо.

В Сахалинском регионе отмечена сейсмическая активизация на северо-восточном шельфе, проявившаяся в ряде умеренно-сильных (M_w до 5.0) событий. Несколько более слабые, но также заметные для региона землетрясения зарегистрированы к северу от п-ова Шмидта, к востоку от п-ова Терпения и в Углегорском районе. Наиболее сильным в 2022 г. стало мантийное событие с эпицентром в прол. Лаперуза с $M_w = 5.9$.

Список литературы

- Сафонов Д.А., Семенова Е.П. **2022**. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2021 году. *Геосистемы переходных зон*, 6(2): 85–99. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.085-099>
- 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
- Костылев Д.В. **2021**. Формирование единой системы сбора сейсмологической информации в Сахалинском филиале ФИЦ ЕГС РАН. *Российский сейсмологический журнал*, 3(1): 41–53. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.03>
- Richter C.F. **1958**. *Elementary seismology*. New York: Freeman and Co., 768 p.
- Гусев А.А., Мельникова В.Н. **1990**. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки. *Вулканология и сейсмология*, 6: 55–63.
- Салтыков В.А. **2011**. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки. *Вулканология и сейсмология*, 2: 53–59.
- 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.
- Соловьев С.Л., Соловьева О.Н. **1967**. Соотношение между энергетическим классом и магнитудой Курильских землетрясений. *Физика Земли*, 2: 13–23.
- Соловьева О.Н. **1978**. Определение магнитуды глубокофокусных землетрясений. *Физика Земли*, 1: 25–35.
- Safonov D.A., Semenova E.P. **2022**. Regional magnitude M_w in the Russian Far East. *Seismic Instruments*, 58(Suppl 1): S42–S57. <https://doi.org/10.3103/S074792392207009X>
- Benioff H. **1951**. Earthquakes and rock creep: (Part I: Creep characteristics of rocks and the origin of aftershocks). *Bull. of the Seismological Society of America*, 41(1): 31–62. <https://doi.org/10.1785/bssa0410010031>
- Chebrova A.Yu., Chemarev A.S., Matveenko E.A., Chebrov D.V. **2020**. Seismological data information system in Kamchatka branch of GS RAS: organization principles, main elements and key functions. *Geophysical Research*, 21(3): 66–91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>
- Коновалов А.В., Степнова Ю.А., Степнов А.А. **2023**. Сильное землетрясение 05.02.2022 (ML 5.5) вблизи нефтегазового месторождения на северо-восточном шельфе о. Сахалин. *Тихоокеанская геология*, 20(1): 60–75. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-1-60-75>
- 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. doi:10.5800/GT-2020-11-4-0504

References

- Safonov D.A., Semenova E.P. **2022**. Seismicity of the South Far East of Russia in 2021. *Geosistemy perednykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 6(2): 85–99. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.085-099>
- 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. *Tikhookeanskaya geologiya*, 36(3): 102–112. (In Russ.). URL: http://itig.as.khb.ru/POG/2017/n_3/PDF_3_17/102-112.pdf
- Kostylev D.V. **2021**. Formation of a unified system for collecting seismological information in the Sakhalin Division GS RAS. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal = Russian J. of Seismology*, 3(2): 41–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.03>
- Richter C.F. **1958**. *Elementary seismology*. New York: Freeman and Co., 768 p.
- Gusev A.A., Mel'nikova V.N. **1990**. Relations between magnitudes: global and Kamchatka data. *Volcanology and Seismology*, 6: 55–63. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Saltykov V.A. **2011**. A statistical estimate of seismicity level: The method and results of application to Kam-

- chatka. *J. of Volcanology and Seismology*, 5: 123–128. <https://doi.org/10.1134/S0742046311020060>
8. Poplavskaya L.N. (ed.) **2006**. [*Regional catalog of Sakhalin Island earthquakes, 1905–2005*]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 103 p. (In Russ.).
 9. 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.).
 10. Safonov D.A., Nagornyh T.V., Kovalenko N.S. **2019**. *Seismicity of the Amur and Primorye regions*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG FEB RAS, 104 p. (In Russ., abstr. in Engl.).
 11. Solov'eva O.N., Solov'ev S.L. **1967**. Relationship connecting energy class and magnitude for the Kuril Is. earthquakes. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*, 2: 13–23. (In Russ.).
 12. Solov'eva O.N. **1978**. Determining the magnitudes of deep-focus earthquakes. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*, 1: 25–35. (In Russ.).
 13. Safonov D.A., Semenova E.P. **2022**. Regional magnitude M_{wa} in the Russian Far East. *Seismic Instruments*, 58(Suppl 1): S42–S57. <https://doi.org/10.3103/S074792392207009X>
 14. Benioff H. **1951**. Earthquakes and rock creep: (Part I: Creep characteristics of rocks and the origin of aftershocks). *Bull. of the Seismological Society of America*, 41(1): 31–62. <https://doi.org/10.1785/bssa0410010031>
 15. Chebrova A.Yu., Chemarev A.S., Matveenko E.A., Chebrov D.V. **2020**. Seismological data information system in Kamchatka branch of GS RAS: organization principles, main elements and key functions. *Geophysical Research*, 21(3): 66–91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>
 16. Konovalov A.V., Stepnova Yu.A., Stepnov A.A. **2023**. A strong earthquake on February 5, 2022 (ML 5.5) near a petroleum deposit on the northeastern shelf of Sakhalin Island. *Russian J. of Pacific Geology*, 17(1): 54–67. <https://doi.org/10.1134/s1819714023010049>
 17. 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>

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, d.safonov@imgg.ru

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

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, 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 “United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences”, Yuzhno-Sakhalinsk, semenova@seismo.sakhalin.ru

Поступила 16.04.2023

Принята к публикации 12.07.2023

Received 16 April 2023

Accepted 12 June 2023

© Автор 2023 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author 2023. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.344.4

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.149-159>
<https://www.elibrary.ru/ejvxse>

Проблема оценки точности параметров цунамиактивности*

В. М. Кайстренко

E-mail: vict-k@mail.ru

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

Резюме. Целью статьи является теоретическое развитие вероятностной модели для последовательности цунами пуассоновского типа, согласующейся с данными о проявлениях исторических событий, с целью получения оценок точности параметров цунамиактивности. На базе теоретического очерка построен пример функции повторяемости цунами, важнейшей количественной характеристики цунамиактивности, для порта Малокурильское (Южные Курильские острова), одного из мест с надежным рядом данных регистрации цунами. На основе графиков функций плотности вероятности ранжированных высот цунами дано объяснение слабой статистической устойчивости больших значений высот цунами, особенно наибольшего в ряду наблюдений. В частности, это означает, например, что максимальное значение высоты цунами, зарегистрированное в некотором месте в течение 30-летнего периода наблюдений, следует соотносить с широким диапазоном возможных периодов повторяемости примерно от 10 до 100 лет. Синтетические каталоги высот цунами, построенные для порта Малокурильское, показали, что для получения параметров цунамиактивности с приемлемой точностью 10 или 5 % нужны полные (без пропусков) ряды высот цунами в заданном месте длительностью не менее 250 или 500 лет. Самым важным результатом является получение аналитических формул для дисперсий оценок параметров цунамиактивности, характеризующих точность этих оценок, в зависимости от априори неизвестных значений параметров цунамиактивности и количества используемых данных.

Ключевые слова: цунами, заплеск, повторяемость, цунамиактивность, цунамиопасность, вероятностная модель, статистика

The problem of estimating the accuracy of the tsunami activity parameters*

Victor M. Kaistrenko

E-mail: vict-k@mail.ru

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

Abstract. The subject of the article is the theoretical development of the probabilistic model for a Poisson-type tsunami sequence that is consistent with data on the manifestations of historical events, in order to obtain estimates of the accuracy of the tsunami activity parameters. An example of a tsunami recurrence function, which is the most important quantitative characteristic of tsunami activity for the Port of Malokurilskoye, one of the places in the South Kuril Islands region with the most reliable tsunami height dataset, was created on the basis of a theoretical essay. An explanation for the weak statistical stability of all large values of the tsunami heights, especially for the largest one in the series of observations, was given based on the probability density functions of the ranked tsunami heights. In particular, it means, for example, that the maximum tsunami height recorded at a certain location during a 30-year observation period should be correlated with a wide range of possible recurrence periods of about 10 to 100 years. Synthetic catalogs of the tsunami heights, built for the Port of Malokurilskoye, showed that the tsunami height datasets with a duration of at least 250 or 500 years without gaps are needed to obtain the tsunami activity parameters with an acceptable accuracy of 10 or 5 %.

The most important results are the analytical equations for the variances of estimates of the tsunami activity parameters, which characterize the accuracy of these estimates, depending on a priori unknown values of the tsunami activity parameters and the amount of data used.

Keywords: tsunami, run-up height, recurrence, tsunami activity, tsunami hazard, probabilistic model, statistics

* Полный текст данной статьи на английском языке размещен на сайте журнала [The full text of this article in English can be found on the website of the «Geosystems of Transition Zones» journal]: <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2023-2-3.pdf>

Для цитирования: Кайстренко В.М. Проблема оценки точности параметров цунамиактивности. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 2, с. 149–159. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.2.149-159>; <https://www.elibrary.ru/ejvxse>

For citation: Kaistrenko V.M. The problem of estimating the accuracy of the tsunami activity parameters. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 2, pp. 149–159. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.2.149-159>; <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2023-2-3.pdf>

Финансирование и благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН «Мониторинг и моделирование океанологических процессов, прогнозирование катастрофических явлений на шельфе и в прибрежной зоне» (№ 121021000268-9). Приношу благодарность уважаемым рецензентам за полезные замечания и советы, улучшившие изложение материала статьи.

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 Far Eastern Branch of RAS «Monitoring and modeling of oceanological processes, prediction of catastrophic events on the shelf and in the coastal zone» (no. 121021000268-9). I would like to thank the respected Reviewers for the helpful comments and advices that improved the presentation of the article.

Введение

Цунами – опасное природное явление, представляющее собой волновой процесс в океане, вызываемый, как правило, сильным подводным землетрясением, реже извержением вулкана, расположенного в акватории, или сходом гигантского оползня [1]. Значительная часть дальневосточного побережья России в различной степени подвержена воздействию цунами. Самое катастрофическое по своим последствиям цунами в ноябре 1952 г. привело к гибели нескольких тысяч человек и практически уничтожило все населенные пункты на побережье Северных Курильских островов и юга Камчатки (рис. 1) [2].

Сравнительно недавнее цунами 15 ноября 2006 г. сопровождалось заплесками высотой до 20 м на центральных Курильских островах. Это цунами не вызвало серьезных негативных последствий лишь по причине отсутствия постоянного населения и инфраструктуры на этих островах [3]. Цунами 11 марта 2011 г., вызвавшее катастрофические последствия на побережье Японии, подошло к Южным Курильским островам достаточно ослабленным и, тем не менее, оказало серьезное негативное воздействие на островное портовое хозяйство, поскольку сопровождалось подвижками тяжелых прибрежных льдов [4].

Наличие в прибрежной зоне Дальнего Востока России населенных пунктов, портов



Рис. 1. Вид центральной части г. Северо-Курильск, уничтоженного цунами 1952 г. Фото Л. Бондаренко

Fig. 1. View of the central part of the Severo-Kurilsk city, destroyed by the 1952 tsunami. Photo by L. Bondarenko

и производства, а также планы дальнейшего освоения этого региона делают задачу оценки цунамиопасности чрезвычайно актуальной. И, что особенно важно, такие оценки должны быть количественными и сопровождаться объективными оценками их точности и/или возможной неопределенности: недооценка опасности может привести к неоправданному ущербу и жертвам, а переоценка повлечет за собой излишне дорогие меры инженерной защиты и/или неадекватные мероприятия по предупреждению и эвакуации населения.

После катастрофических цунами в Индийском океане в 2004 г. и у северо-восточного побережья Хонсю (Япония) в 2011 г. развитие и использование различных вариантов технологии вероятностного подхода к оценке опасности цунами (РТНА, Probabilistic Tsunami Hazard Assessment) для разных побережий стало общепринятым. Именно в рамках вероятностного подхода создано большинство современных карт цунамирайонирования [5–10]. В технологии РТНА недостаточность надежной информации о проявлениях исторических цунами компенсируется данными о сейсмичности. Действительно, именно сильные землетрясения в океане являются причиной большинства известных цунами. Однако модель, снабженная дополнительной сейсмической информацией, становится многопараметрической и сложной. Кроме того, использование сейсмических данных автоматически вовлекает в рассмотрение некоторые проблемные сейсмологические закономерности, как, например, использование закона Гутенберга–Рихтера для сильнейших землетрясений [11]. Такковы некоторые причины, делающие получение надежных оценок точности параметров цунамиопасности достаточно проблематичным.

Следует отметить, что недавние обзоры [12–14] подтвердили наличие серьезных проблем, связанных с оценкой точности и возможных неопределенностей, касающихся количественных оценок цунамиопасности, получаемых в рамках таких вероятностных моделей.

Данная статья развивает вероятностную модель проявлений цунами, базирующуюся на использовании на-

дежных данных о заплесках исторических цунами в конкретном месте – порту Малокурильское (Южные Курильские острова) (рис. 2). Модель позволяет оценить физические параметры, определяющие характер цунамиактивности и, соответственно, цунамиопасности. Такой подход позволяет также продвинуться в теоретическом описании функции повторяемости цунами и, главное – получить аналитические формулы для дисперсий параметров цунамиактивности, характеризующих их точность, в зависимости от количества используемых данных.

Функция повторяемости высот цунами

Характер проявлений цунами на берегу определяется многими факторами – это особенности генерации цунами различными источниками, размещенными в пространстве и времени, а также регулярные и нерегулярные особенности батиметрии на трассе распространения волны и в прибрежной зоне. Поэтому данные о высотах цунами, зарегистрированных в некотором конкретном пункте побережья в течение периода времени T , следует рассматривать как случайный ряд и для каждого пункта ранжировать в соответствии с величиной

$$h_1 \geq h_2 \geq h_3 \geq \dots \quad (1)$$

Функция повторяемости цунами (ФПЦ) – важнейшая количественная характеристика цунамиактивности. В соответствии с определением, ФПЦ – это средняя частота событий в заданном месте с высотой, равной или превышающей пороговое значение h :



Рис. 2. Южные Курильские острова.

Fig. 2. South Kuril Islands.

$$\varphi(h) = \frac{N(\text{высота цунами} \geq h)}{T}, \quad (2)$$

где N есть число таких событий, произошедших за период времени T .

Данный теоретический очерк содержит главным образом краткое изложение теории, связанной с ФПЦ [15–17]. Явно или неявно предполагается однородность цунами-процесса во времени, поскольку нам доступны лишь данные о проявлениях исторических цунами в течение нескольких последних столетий с пробелами, а также исключительно интересные и очень перспективные, но достаточно проблемные данные о палеоцунами [18, 19], относящиеся в основном к среднему–позднему голоцену. Иными словами, мы можем оперировать неполными наборами данных за очень короткий в геологическом масштабе отрезок времени.

Показано, что для высот цунами $h > 0.5$ м ФПЦ в (2) можно аппроксимировать экспонентой [16]:

$$\varphi(h) = f \cdot e^{-\frac{h}{H^*}}. \quad (3)$$

Параметры, появляющиеся в этой формуле, имеют прозрачный физический смысл: f – асимптотическая частота сильных цунами в регионе, которая медленно изменяется вдоль берега и может считаться региональной постоянной, а параметр H^* – характеристическая высота цунами, причем этот параметр является локальным и существенно изменяется вдоль берега. Вместе эти параметры характеризуют цунамиактивность в рассматриваемом пункте побережья, и их знание позволяет описывать динамику проявлений цунами.

Основная задача теперь может быть сформулирована следующим образом: требуется оценить параметры цунамиактивности f и H^* и их дисперсии для заданного места побережья на основе ряда исторических данных (1) о высотах цунами.

В полупологарифмическом масштабе зависимость (3) является линейной $\ln \varphi(h) = \ln f - \frac{1}{H^*}h$ по высоте цунами h . Для построения такой линейной регрессионной модели методом наименьших квадратов $\overline{\ln \varphi(h_k)} = \ln f -$

$-\frac{1}{H^*}h_k + e_k$, когда известен ряд высот цунами (1), необходимо уметь оценивать средние логарифмы частот $\overline{\ln \varphi(h_k)}$, соответствующие ранжированным высотам цунами h_k , а также их дисперсии $D(\ln \varphi(h_k))$ [20–22]. Здесь e_k – центрированные случайные отклонения. Такие статистические характеристики удается получить аналитически, используя тот факт, что последовательность сильных цунами близка к пуассоновской [23]. Поэтому вероятность того, что в некотором конкретном месте за период времени T произойдет n цунами с высотой заплеска, превышающей уровень h , дается формулой:

$$P_n(h) = e^{-\varphi(h)} \frac{[\varphi(h) \cdot T]^n}{n!}. \quad (4)$$

Рассмотрим кумулятивную функцию вероятности $F(h_k)$ для каждой ранжированной высоты цунами h_k . Ситуация $\{h_k \leq h\}$ реализуется, если число цунами с высотой, превышающей пороговое значение h , не будет превосходить $(k-1)$. Тогда искомая вероятность есть сумма:

$$F(h_k) = \sum_{s=0}^{k-1} P_s(h_k) = e^{-\varphi(h_k)T} \sum_{s=0}^{k-1} \frac{(\varphi(h_k)T)^s}{s!}. \quad (5)$$

Здесь пороговое значение высоты цунами с порядковым номером k сразу обозначено как h_k . Производная $F(h_k)$ по $\varphi(h_k)$ дает функцию плотности вероятности для $\varphi(h_k)$:

$$\rho_\varphi(\varphi(h_k)) = e^{-\varphi(h_k)T} \frac{[\varphi(h_k) \cdot T]^{k-1}}{(k-1)!} \cdot T. \quad (6)$$

Эта формула показывает, что случайные величины $\varphi(h_k)$ имеют гамма-распределение $\Gamma(k, T)$ [20, 22] и необходимые статистические характеристики, такие как средние и дисперсии, могут быть получены аналитически:

$$\varphi_k = \overline{\ln \varphi(h_k)} = \sum_{s=1}^{k-1} \frac{1}{s} - 0.577 \dots - \ln T, \quad (7)$$

$$D_k = D(\ln \varphi(h_k)) = \frac{\pi^2}{6} - \sum_{s=1}^{k-1} \frac{1}{s^2}, \quad (8)$$

$$\sigma_k = \sigma(\ln \varphi(h_k)) = \sqrt{\frac{\pi^2}{6} - \sum_{s=1}^{k-1} \frac{1}{s^2}}. \quad (9)$$

Поскольку значения дисперсий D_k различны при различных значениях номера k , следует использовать взвешенный метод наименьших квадратов [20, 22].

Функция повторяемости высот цунами для порта Малокурильское

Данные о проявлениях цунами собраны в каталоги разной детальности и за разные исторические периоды. Созданы электронные каталоги цунами, доступные в сети интернет [24, 25]. Значительную часть данных каталогов составляют заплески цунами (run-up heights) – замеренные в результате обследования максимальные высоты подъема уровня океана на границе зоны затопления. Несмотря на наличие таких каталогов, содержащих много информации о цунами в целом, недостаточность надежной количественной информации как о слабых, так и сильных событиях заметно сдерживает создание физически обоснованных моделей проявлений цунами на побережье и их тестирование. Слабые цунами происходят почти ежегодно, но вследствие незначительной величины этих волн они не всегда надежно выделяются на фоне других волновых процессов, особенно в прибрежной зоне, и, соответственно, информация о таких цунами недостаточна. Опасность представляют лишь сильные события, но в этом случае нехватка информации об этой группе событий связана с их редкостью.

Южные Курильские острова — одна из наиболее сейсмически активных частей периферии Тихого океана. Все землетрясения региона с магнитудой $M_w \geq 8$ и несколько землетрясений с магнитудой $M_w \geq 7.5$ сопровождалось разрушительными цунами. Регион также оказался под воздействием крупнейших цунами от удаленных источников в Тихом океане, таких как события в Чили 1960 г. и Тохоку 2011 г. и другие.

Тем не менее и для этого региона с высокой цунамиактивностью основной проблемой

является нехватка данных о высотах цунами. Измерения катастрофического цунами 5 ноября 1952 г. были подробно задокументированы только для побережья южной Камчатки и Северных Курильских островов. Для Южно-Курильского региона каталоги цунами содержат запись только об одном факте, относящемся к проявлению цунами 1952 г. на о. Итуруп, без указания конкретного места. Более ранние цунами для этого региона документированы фрагментарно. Поэтому 1953 год был выбран в качестве начального для статистического исследования.

В качестве примера мы можем построить функцию повторяемости высот цунами для порта Малокурильское, о. Шикотан, на базе ряда надежных данных о высотах исторических цунами [24, 25] (рис. 3). Для оценок параметров f и H^* функции повторяемости используем взвешенный метод наименьших квадратов [20–22], примененный к ряду данных (1) о заплесках цунами для порта Малокурильское, при котором минимизируется квадратичная невязка:

$$r = \sum_{k=1}^N \frac{((\ln \varphi(h_k)) - \ln f + \frac{h_k}{H^*})^2}{D_k}. \quad (10)$$

Естественно, значение параметра $\ln f$ задается точкой пересечения прямой линии регрессии и ординаты, а величина $-1/H^*$ характеризует наклон линии регрессии. Очевидно также, что точность оценок параметров цунамиактивности $f = (0.15 \pm 0.08)$ год⁻¹ и $H^* = (1.7 \pm 0.8)$ м оказалась ожидаемо невысокой, поскольку эти оценки получены на основе всего $N = 6$ данных о заплесках цунами с $h \geq 1.0$ м, зарегистрированных в течение 67 лет наблюдений (1953–2020 гг.).

Подстановка экспоненциальной аппроксимации (3) в выражение для кумулятивной функции вероятности (5) и последующее дифференцирование по h_k дает функцию плотности вероятности ρ_h для h_k

$$\rho_h(h_k) = e^{-p} \cdot \frac{p^{k-1}}{(k-1)!} \cdot \frac{p}{H^*},$$

$$p = f \cdot T \cdot \exp\left(-\frac{h_k}{H^*}\right), \quad (11)$$

которая, как и (3), справедлива только для $h_k > 0.5$ м (рис. 4). При этом наиболее вероятные значения для ранжированных высот цунами h_k соответствуют максимумам $\rho_h(h_k)$ для каждого k :

$$\widehat{h}_k = H^* \ln(Tf/k), \quad \widehat{h}_k \geq 0.5 \text{ м.} \quad (12)$$

Рис. 4 показывает, что наибольшие значения высот цунами, особенно h_1 , наименее устойчивы, график плотности вероятности для h_1 очень пологий, и частота повторяемости максимального значения h_1 характеризуется наибольшим значением стандартного отклонения, $\sigma_1 \approx 1.28$ (рис. 3). Поэтому σ -допустимый диапазон для периода повторяемости высоты h_1 сильнейшего события, соответствующий стандартному отклонению σ_1 , оказывается чрезвычайно большим ($T/3.6 - 3.6 \cdot T$), где T – реальный период наблюдений и $\exp(\sigma_1) \approx 3.6$. Это означает, например, что максимальное значение высоты цунами, зарегистрированное в некотором месте в течение 30-летнего периода наблюдений, следует соотносить с широким диапазоном возможных периодов повторяемости примерно от 10 до 100 лет, в соответствии со значением

стандартного отклонения $\sigma_1 = 1.28$. С ростом номера k значения стандартных отклонений σ_k медленно убывают и графики распределений $\rho_h(h_k)$ становятся все более острыми, что указывает на рост устойчивости значений высот цунами h_k с большими номерами k в ряду (1).

Синтетический каталог высот цунами и оценки точности параметров цунамиактивности

Можно рассмотреть обратную ситуацию: использовать параметры $f_0 = 0.15 \text{ год}^{-1}$ и $H_0^* = 1.7 \text{ м}$ для порта Малокурильское в качестве входных данных и построить по ним синтетические ряды наиболее вероятных значений высот цунами $\widehat{h}_k, \widehat{h}_k \geq 1.0 \text{ м}$ (12) на заданный период времени, например, $T = 250$ и 500 лет (рис. 5), а по ним оценить «выходные параметры» f и H^* и их дисперсии, как это было сделано для оценок параметров цунамиактивности на основе реальных данных (рис. 3).

В результате получены оценки: $f = (0.15 \pm 0.01) \text{ год}^{-1}$ и $H^* = (1.7 \pm 0.16) \text{ м}$ для $T = 250$ лет и $f = (0.15 \pm 0.006) \text{ год}^{-1}$

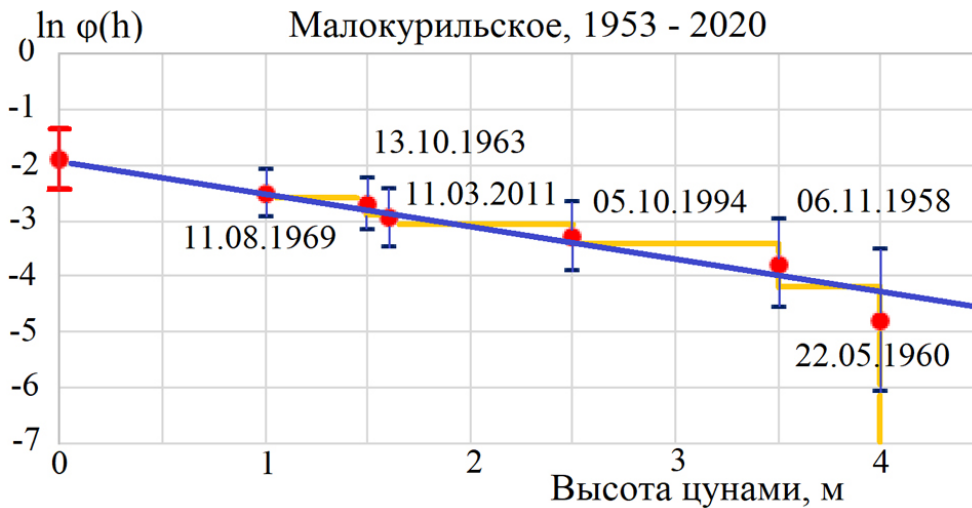


Рис. 3. Ступенчатая эмпирическая функция повторяемости для порта Малокурильское, построенная по высотам исторических цунами с $h \geq 1.0$ м за период времени 1953–2020 гг. (желтая линия), и аппроксимирующая ее прямая линия регрессии, полученная взвешенным методом наименьших квадратов (синяя линия). Всем величинам $\ln \varphi(h_k)$ (красные кружки) соотнесены диапазоны соответствующих стандартных отклонений σ_k (9). Асимптотическая частота больших цунами для порта Малокурильское $f = (0.15 \pm 0.08) \text{ год}^{-1}$ отмечена красным кружком на оси ординат. Характеристическая высота цунами в порту Малокурильское равна $H^* = (1.7 \pm 0.8) \text{ м}$ и $1/H^* = (0.6 \pm 0.3) \text{ м}^{-1}$.

Fig. 3. Empirical tsunami recurrence step function for the Port of Malokuril'skoye constructed using the historical tsunami heights with $h \geq 1.0$ m during the period of 1953–2020 (yellow stepped line), and its approximation by the regression straight line, obtained using the weighted least squares method (blue line). All the values $\ln \varphi(h_k)$ (marked by the red circles) are associated with the corresponding standard deviations σ_k (9). Asymptotic frequency of large tsunamis for the Port of Malokuril'skoye is $f = (0.15 \pm 0.08) \text{ yr}^{-1}$, and its position is marked by the red circle in the ordinate axis. The characteristic tsunami height in the Port of Malokuril'skoye is $H^* = (1.7 \pm 0.8) \text{ m}$ and $1/H^* = (0.6 \pm 0.3) \text{ m}^{-1}$.

и $H^* = (1.7 \pm 0.08)$ м для $T = 500$ лет. Таким образом, для расчета параметров цунамиактивности с приемлемой точностью 10 или 5 % нужны полные ряды высот цунами в заданном месте длительностью не менее 250 или 500 лет [17].

Гораздо более интересной является задача получения общего теоретического результата в рамках этой же технологии, поскольку такой подход позволяет проследить явную зависимость дисперсии параметров цунамиактивности f и H^* от длительности периода наблюдений T , количества используемых данных N , а также от реальных, но априори неизвестных параметров цунамиактивности f_0 и H_0^* .

Пусть некоторая точка некоторого побережья характеризуется параметрами цунамиактивности f_0 и H_0^* (без конкретизации их величин). Формально мы можем построить синтетический ряд высот цунами в данном месте, взяв в качестве ранжированных значений h_k высот цунами их наиболее вероятные значения $\widehat{h}_k = H_0^* \ln(Tf_0/k)$, которые явно зависят от заданных параметров цунамиактивности f_0 и H_0^* и периода наблюдений T . Соответственно, по формальному ряду $\{\widehat{h}_k\}$ ранжированных высот цунами мы можем оценить значения параметров цунамиактивности f и H^* и их дисперсий, минимизируя соответствующую квадратичную невязку

$$r = \sum_{k=1}^N (\varphi_k - \ln f + \frac{1}{H^*} H_0^* \ln(Tf_0/k))^2 / D_k. \quad (13)$$

Приравнивание к нулю производных невязки (13) по искомым параметрам f и H^* приводит к линейной системе уравнений 2×2 вида $AX = Y$ [20–22], где

$$A = \begin{pmatrix} \sum_1^N \frac{1}{D_k} & -\sum_1^N \frac{\widehat{h}_k}{D_k} \\ -\sum_1^N \frac{\widehat{h}_k}{D_k} & \sum_1^N \frac{\widehat{h}_k^2}{D_k} \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} \ln f \\ 1/H^* \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$$Y = \begin{pmatrix} \sum_1^N \frac{\varphi_k}{D_k} \\ \sum_1^N \frac{\varphi_k \cdot \widehat{h}_k}{D_k} \end{pmatrix}.$$

Определитель системы зависит только от числа данных N и пропорционален квадрату H_0^* :

$$\Delta = (H_0^*)^2 \left(\sum_{k=1}^N \frac{1}{D_k} \cdot \sum_{k=1}^N \frac{(\ln k)^2}{D_k} - \left(\sum_{k=1}^N \frac{\ln k}{D_k} \right)^2 \right) = (H_0^*)^2 \cdot \Delta_1(N). \quad (15)$$

Обратная матрица A^{-1} является матрицей ковариаций

$$A^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^N \frac{\widehat{h}_k^2}{D_k} & \sum_{k=1}^N \frac{\widehat{h}_k}{D_k} \\ \sum_{k=1}^N \frac{\widehat{h}_k}{D_k} & \sum_{k=1}^N \frac{1}{D_k} \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Соответственно, дисперсии оценок параметров цунамиактивности $\ln f$ и $1/H^*$ даются диагональными членами матрицы A^{-1} [20–22]:

$$D(\ln f) = \frac{1}{\Delta_1} \left[(\ln Tf_0)^2 \sum_1^N \frac{1}{D_k} - 2(\ln Tf_0) \sum_1^N \frac{\ln k}{D_k} + \sum_1^N \frac{(\ln k)^2}{D_k} \right], \quad (17)$$

$$D\left(\frac{1}{H^*}\right) = \frac{1}{H_0^{*2} \cdot \Delta_1(N)} \sum_1^N \frac{1}{D_k}. \quad (18)$$

Формулы (17, 18) являются универсальными в том смысле, что описывают зависимость дисперсий параметров цунамиактивности $D(\ln f)$ и $D(H^{*-1})$ от априори неизвестных значений параметров цунамиактивности f_0 и H_0^* и количества используемых данных N .

Конечные ряды, входящие в формулы (17) и (18), имеют удобное численное приближение для больших значений количества используемых данных, $N > 100$ (рис. 6):

$$F_0(N) = \frac{1}{\Delta_1} \sum_1^N \frac{1}{D_k} \approx 8.2 N^{-2}, \quad (19)$$

$$F_1(N) = \frac{1}{\Delta_1} \sum_1^N \frac{\ln k}{D_k} \approx 12.3 N^{-1.78}, \quad (20)$$

$$F_2(N) = \frac{1}{\Delta_1} \sum_1^N \frac{(\ln k)^2}{D_k} \approx 17.8 N^{-1.55}. \quad (21)$$

Согласно формулам (18, 19), дисперсия обратной величины характеристической вы-

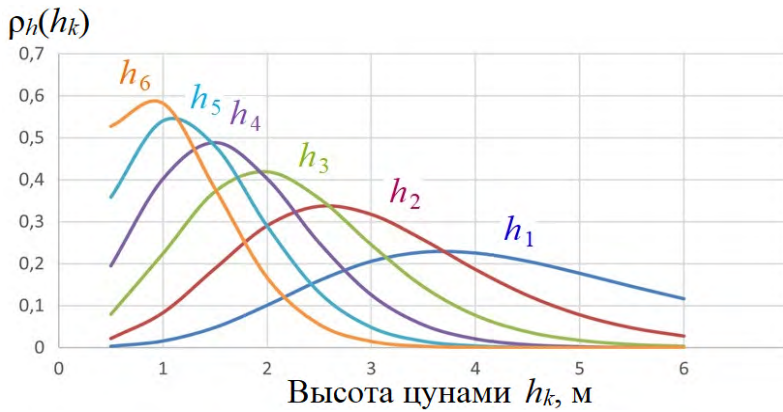


Рис. 4. Функции плотности вероятности ранжированных высот цунами h_k (11) для порта Малокурильское для периода наблюдений $T = 67$ лет и $k = 1, \dots, 6$.
Fig. 4. Probability density functions of the ranked tsunami heights h_k (11) for the Port of Malokuril'skoye for the observation period $T = 67$ years and $k = 1, \dots, 6$.

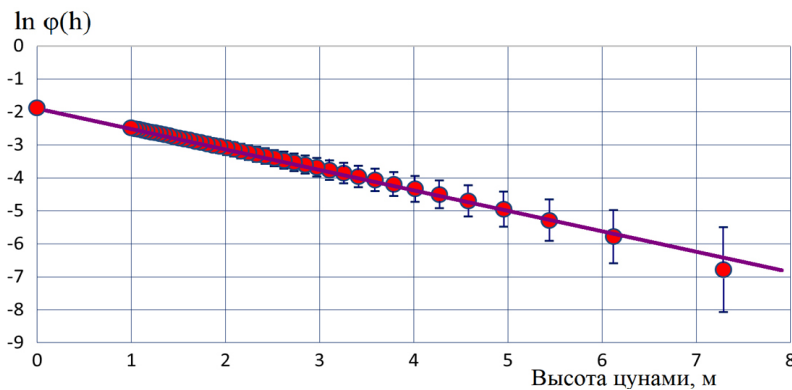


Рис. 5. Синтетическая функция повторяемости высот цунами для порта Малокурильское на период 500 лет, 42 события с $h \geq 1.0$ м. Всем наиболее вероятным значениям высот цунами (красные кружки) соотнесены диапазоны соответствующих стандартных отклонений σ_k (9).
Fig. 5. Synthetic recurrence function of tsunami heights for the Port of Malokuril'skoye for a period of 500 years, 42 events with $h \geq 1.0$ m. All the most probable values of tsunami heights (red circles) are accompanied by corresponding standard deviations σ_k (9).

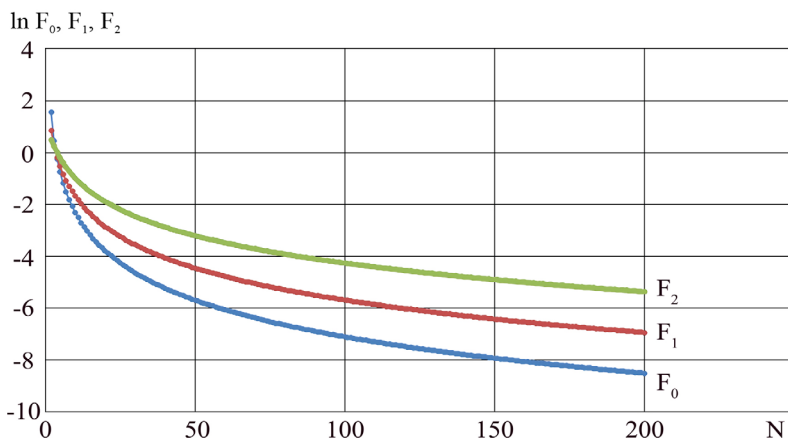


Рис. 6. Графики функций $F_0(N)$, $F_1(N)$ и $F_2(N)$ (19–21).
Fig. 6. Plots of functions $F_0(N)$, $F_1(N)$ and $F_2(N)$ (19–21).

соты $D(H^{*-1})$ зависит от количества используемых данных N через функцию $F_0(N)$ и от параметра H_0^{*-2} . Формула (17) для дисперсии логарифма частоты сильных цунами $D(\ln f)$ демонстрирует более сложную зависимость как от числа данных N , так и от параметра f_0 и от длительности периода наблюдений T . Однако, поскольку функция $F_2(N)$ убывает значительно медленнее функций $F_0(N)$ и $F_1(N)$ (рис. 6), это «обнуляет» зависимость дисперсии $D(\ln f)$ от параметров f_0 и T при больших значениях числа данных N .

Ограничение по высоте волны цунами $h > 0.5$ м для справедливости экспоненциальной аппроксимации (3) функции повторяемости цунами (2) приводит к ограничениям в количестве N данных, которые можно корректно использовать в статистических выводах, в зависимости от параметров цунамиактивности f и H^* и длительности наблюдений T :

$$\ln N \leq \ln Tf - 0.5 \text{ м} / H^*. \quad (22)$$

Заключение

Освоение побережий и развитие прибрежного градостроительства в цунамиопасных регионах стало стимулом развития как чисто научных работ по физике цунами, так и прикладных работ по созданию такого востребованного продукта, как карты цунамирайонирования. В свою очередь, при создании карт высвечивается проблема оценок точности параметров цунамиактивности и, соответственно, цунамиопасности, и эта проблема главным образом связана с недостаточностью надежной информации об особенностях проявлений цунами.

Например, синтетические каталоги высот цунами, построенные

для порта Малокурильское, показали, что для получения параметров цунамиактивности с приемлемой точностью 10 или 5 % нужны полные (без пропусков) ряды высот цунами в заданном месте длительностью не менее 250 или 500 лет. На самом деле в существующих каталогах имеются ряды данных о цунами, происходивших в течение нескольких столетий, для северо-восточного побережья Хонсю и тихоокеанского побережья Южной Америки, но приведенные описания содержат информацию только о сильнейших событиях с пропусками, так что и для этих побережий наборы данных (1) не являются полными.

Формально, при анализе данных о палеоцунами можно получить ряды данных продолжительностью в несколько тысячелетий, но фактическое использование таких данных для оценок цунамиактивности связано с рядом серьезных проблем, таких как идентификация отложений палеоцунами, их датировка, количественный учет сохранности и т.д.

На основе графиков функций плотности вероятности ранжированных высот цунами, построенных для порта Малокурильское, дано объяснение слабой статистической устойчивости больших значений высот цунами, особенно самого большого в ряду наблюдений. В частности, это означает, например, что максимальное значение высоты цунами, зарегистрированное в некотором месте в течение 30-летнего периода наблюдений, следует соотносить с широким диапазоном возможных периодов повторяемости примерно от 10 до 100 лет.

В целом, теоретическое развитие вероятностной модели, описывающей динамику последовательности цунами пуассоновского типа, дало возможность получить универсальные аналитические формулы для дисперсий параметров цунамиактивности, характеризующих их точность, в зависимости от количества используемых данных и длительности наблюдений. Эти аналитические формулы являются решением проблемы точности только для простейшего, идеального случая, когда имеется полный без пропусков ряд высот цунами, зарегистрированных в одном месте в течение длительного периода наблюдений. Неясно, возможно ли получить аналитическое решение (или только численное) для случая

группы точек регистрации цунами. Тем не менее полученные формулы следует рассматривать как продвижение в решении проблемы оценки точности параметров цунамиактивности, поскольку они позволяют эту проблему конкретизировать и количественно оценить недостаточность имеющейся в настоящее время информации о таком сложном явлении, как цунами.

Список литературы

1. Левин Б.В., Носов М.А. **2005**. *Физика цунами и родственных явлений в океане*. М.: Янус-К, 360 с.
2. Kaistrenko V., Sedaeva V. **2001**. 1952 North Kuril Tsunami: New data from archives. In: G.T. Hebenstreit (ed). *Tsunami research at the end of a critical decade*. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 91–102. (Advances in Natural and Technological Hazards Research; 18). https://doi.org/10.1007/978-94-017-3618-3_8
3. MacInnes B., Pinegina T., Bourgeois J., Razjigaeva N., Kaistrenko V., Kravchunovskaya E. **2009**. Field survey and geological effects of the 15 November 2006 Kuril tsunami in the middle Kuril Islands. *Pure and Applied Geophysics*, 166(1-2): 9–36. <https://doi.org/10.1007/s00024-008-0428-3>
4. Kaistrenko V., Razjigaeva N., Kharlamov A., Shishkin A. **2013**. Manifestation of the 2011 Great Tohoku Tsunami on the coast of the Kuril Islands: A tsunami with ice. *Pure and Applied Geophysics*, 170: 1103–1114. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0546-9>
5. González F.I., Geist E.L., Jaffe B.E., Kanoğlu U., Mofjeld H., Synolakis C.E., Titov V.V., Arcas D., Bellomo D., et al. **2009**. Probabilistic tsunami hazard assessment at Seaside, Oregon, for near- and far-field seismic sources. *J. of Geophysical Research*, 114: C11023. <https://doi.org/10.1029/2008JC005132>
6. Gusiakov V.K., Chubarov L.B., Beizel S.A. **2015**. Assessment of tsunami hazard due to regional and remote sources: The coast of the Sea of Okhotsk. *J. of Volcanology and Seismology*, 9(4): 276–288. <https://doi.org/10.1134/S0742046315040041>
7. Kulikov E., Rabinovich A., Thomson R. **2005**. Estimation of tsunami risk for the coasts of Peru and Northern Chile. *Natural Hazards*, 35: 185–209. [doi:10.1007/s11069-004-4809-3](https://doi.org/10.1007/s11069-004-4809-3)
8. Leonard L., Rogers G., Mazzotti S. **2014**. Tsunami hazard assessment of Canada. *Natural Hazards*, 70(1): 237–274. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0809-5>
9. Salah P., Sasaki J., Soltanpour M. **2021**. Comprehensive probabilistic tsunami hazard assessment in the Makran subduction zone. *Pure and Applied Geophysics*, 178: 5085–5107. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02725-y>
10. Шевченко Г.В., Лоскутов А.В., Кайстренко В.М. **2018**. Новая карта цунамирайонирования Южных

- Курильских островов. *Геосистемы переходных зон*, 2(3): 225–238. doi:10.30730/2541-8912.2018.2.3.225-238
11. Kagan Y.Y. **2010**. Earthquake size distribution: Power-law with exponent $\beta \equiv \frac{1}{2}$? *Tectonophysics*, 490 (1–2): 103–114. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.04.034>
 12. Grezio A., Babeyko A., Baptista M.A., Behrens J., Costa A., Davies G., Geist E.L., Glimsdal S., González F.I., et al. **2017**. Probabilistic tsunami hazard analysis: multiple sources and global applications. *Reviews of Geophysics*, 55: 1158–1198. <https://doi.org/10.1002/2017RG000579>
 13. Basili R., Brizuela B., Herrero A., Iqbal S., Lorito S., Maesano F.E., Murphy S., Perfetti P., Romano F., et al. **2021**. The making of the NEAM tsunami hazard model 2018 (NEAMTHM18). *Frontiers in Earth Science*, 8: 616594. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.616594>
 14. Behrens J., Lovholt F., Jalayer F., Lorito S., Salgado-Gálvez M.A., Sørensen M., Abadie S., Aguirre-Ayerbe I., Aniel-Quiroga I., et al. **2021**. Probabilistic tsunami hazard and risk analysis: A review of research gaps. *Frontiers in Earth Science*, 9: 628772. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.628772>
 15. Kaistrenko V. **2011**. Tsunami recurrence versus tsunami height distribution along the coast. *Pure and Applied Geophysics*, 168: 2065–2069. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0288-0>
 16. Kaistrenko V. **2014**. Tsunami recurrence function: structure, methods of creation, and application for tsunami hazard estimates. *Pure and Applied Geophysics*, 171: 3527–3538. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0791-1>
 17. Kaistrenko V. **2023**. Tsunami recurrence and hazard evaluation for the South Kuril Islands. *Pure and Applied Geophysics*. (In Print). <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03163-0>
 18. Dawson A.G., Stewart I. **2007**. Tsunami deposits in the geological record. *Sedimentary Geology*, 200: 166–183. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.01.002>
 19. Пинегина Т.К., Разжигаяева Н.Г. **2013**. Исследования палеоцунами на дальневосточном побережье России. В кн.: Лобковский Л.И. (ред.) *Мировой океан. Т. 1. Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане*. М.: Науч. мир, с. 488–498.
 20. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. **1983**. *Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных*. М.: Финансы и статистика, 471 с.
 21. Химмельблау Д. **1975**. *Анализ процессов статистическими методами*. М.: Мир, 957 с. (Перевод с англ.).
 22. Крамер Г. **1975**. *Математические методы статистики*. М.: Мир, 648 с.
 23. Geist E.L., Parsons T. Distribution of tsunami interest times. **2008**. *Geophysical Research Letters*, 35(2): 18 p. <https://doi.org/10.1029/2007GL032690>
 24. *Historical Tsunami Database for the Pacific (HTDB/PAC)*. URL: http://tsun.sccc.ru/On_line_Cat.htm (дата обращения 15.12.2022).
 25. *Tsunami Data and Information*. <https://doi.org/10.7289/V5PN93H7>

References

1. Levin B.W., Nosov M.A. **2016**. *Physics of Tsunamis*. Springer, 310 p.
2. Kaistrenko V., Sedaeva V. **2001**. 1952 North Kuril Tsunami: New data from archives. In: G.T. Hebenstreit (ed). *Tsunami research at the end of a critical decade*. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 91–102. (Advances in Natural and Technological Hazards Research; 18). https://doi.org/10.1007/978-94-017-3618-3_8
3. MacInnes B., Pinegina T., Bourgeois J., Razjigaeva N., Kaistrenko V., Kravchunovskaya E. **2009**. Field survey and geological effects of the 15 November 2006 Kuril tsunami in the middle Kuril Islands. *Pure and Applied Geophysics*, 166(1-2): 9–36. <https://doi.org/10.1007/s00024-008-0428-3>
4. Kaistrenko V., Razjigaeva N., Kharlamov A., Shishkin A. **2013**. Manifestation of the 2011 Great Tohoku Tsunami on the coast of the Kuril Islands: A tsunami with ice. *Pure and Applied Geophysics*, 170: 1103–1114. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0546-9>
5. González F.I., Geist E.L., Jaffe B.E., Kânoğlu U., Mofjeld H., Synolakis C.E., Titov V.V., Arcas D., Bellomo D., et al. **2009**. Probabilistic tsunami hazard assessment at Seaside, Oregon, for near- and far-field seismic sources. *J. of Geophysical Research*, 114: C11023. <https://doi.org/10.1029/2008JC005132>
6. Gusiakov V.K., Chubarov L.B., Beizel S.A. **2015**. Assessment of tsunami hazard due to regional and remote sources: The coast of the Sea of Okhotsk. *J. of Volcanology and Seismology*, 9(4): 276–288. <https://doi.org/10.1134/S0742046315040041>
7. Kulikov E., Rabinovich A., Thomson R. **2005**. Estimation of tsunami risk for the coasts of Peru and Northern Chile. *Natural Hazards*, 35: 185–209. doi:10.1007/s11069-004-4809-3
8. Leonard L., Rogers G., Mazzotti S. **2014**. Tsunami hazard assessment of Canada. *Natural Hazards*, 70(1): 237–274. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0809-5>
9. Salah P., Sasaki J., Soltanpour, M. **2021**. Comprehensive probabilistic tsunami hazard assessment in the Makran subduction zone. *Pure and Applied Geophysics*, 178: 5085–5107. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02725-y>
10. Shevchenko G.V., Loskutov A.V., Kaistrenko V.M. **2018**. A new map of tsunami hazard for the South Kuril Islands. *Geosystems of Transition Zones*, 2(3): 225–238. (In Russ., abstr. in Engl.). doi:10.30730/2541-8912.2018.2.3.225-238
11. Kagan Y.Y. **2010**. Earthquake size distribution: Power-law with exponent $\beta \equiv \frac{1}{2}$? *Tectonophysics*, 490 (1–2): 103–114. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.04.034>
12. Grezio A., Babeyko A., Baptista M.A., Behrens J., Costa A., Davies G., Geist E.L., Glimsdal S.,

- González F.I., et al. **2017**. Probabilistic tsunami hazard analysis: multiple sources and global applications. *Reviews of Geophysics*, 55: 1158–1198. <https://doi.org/10.1002/2017RG000579>
13. Basili R., Brizuela B., Herrero A., Iqbal S., Lorito S., Maesano F.E., Murphy S., Perfetti P., Romano F., et al. **2021**. The Making of the NEAM tsunami hazard model 2018 (NEAMTHM18). *Frontiers in Earth Science*, 8: 616594. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.616594>
 14. Behrens J., Lovholt F., Jalayer F., Lorito S., Salgado-Gálvez M.A., Sørensen M., Abadie S., Aguirre-Ayerbe I., Aniel-Quiroga I., et al. **2021**. Probabilistic tsunami hazard and risk analysis: A review of research gaps. *Frontiers in Earth Science*, 9: 628772. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.628772>
 15. Kaistrenko V. **2011**. Tsunami recurrence versus tsunami height distribution along the coast. *Pure and Applied Geophysics*, 168: 2065–2069. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0288-0>
 16. Kaistrenko V. **2014**. Tsunami recurrence function: structure, methods of creation, and application for tsunami hazard estimates. *Pure and Applied Geophysics*, 171: 3527–3538. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0791-1>
 17. Kaistrenko V. **2023**. Tsunami recurrence and hazard evaluation for the South Kuril Islands. *Pure and Applied Geophysics*. (In Print). <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03163-0>
 18. Dawson A.G., Stewart I. **2007**. Tsunami deposits in the geological record. *Sedimentary Geology*, 200: 166–183. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.01.002>
 19. Pinegina T.K., Razjigayeva N.G. **2013**. Paleotsunami studies on the Far East coast of Russia. In: Lobkovsky L.I. (ed.) *World Ocean*. Vol. 1. *Geology and tectonics of the ocean. Catastrophic phenomena in the ocean*. Moscow: Scientific World, p. 488–498. (In Russ.).
 20. Ayvasyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. **1983**. *Applied statistics: Basics of modeling and primary data processing*. Moscow: Finansy i statistika, 471 p. (In Russ.).
 21. Himmelblau D.M. **1970**. *Process analysis by statistical methods*. New York: John Wiley and Sons, 463 p.
 22. Cramer H. **2016**. *Mathematical methods of statistics*. Princeton Univers. Press, 575 p.
 23. Geist E.L., Parsons T. Distribution of tsunami interevent times. **2008**. *Geophysical Research Letters*, 35(2): 18 p. <https://doi.org/10.1029/2007GL032690>
 24. *Historical Tsunami Database for the Pacific (HTDB/PAC)*. http://tsun.sccc.ru/On_line_Cat.htm (accessed 15.12.2022).
 25. *Tsunami Data and Information*. <https://doi.org/10.7289/V5PN93H7>

Об авторе

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

Поступила 25.02.2023

Принята к публикации 19.03.2023

About the Author

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

Received 25 February 2023

Accepted 19 March 2023



Длинные волны на шельфе юго-западного побережья о. Сахалин

Д.П. Ковалев*, П.Д. Ковалев, В.С. Зарочинцев, К.В. Кириллов

*E-mail: d.kovalev@imgg.ru

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

Резюме. Рассматриваются результаты изучения длинноволновых движений с периодами более 20 ч на шельфе юго-западного побережья о. Сахалин с использованием полученных в натуральных экспериментах временных серий колебаний уровня моря с дискретностью 1 с и продолжительностью от 4 до 6 мес. Спектральный анализ временных серий колебаний уровня моря для диапазона периодов от 8 до 200 ч выявил наличие длинноволновых процессов с периодами от 26.1 до 46.7 ч, которые значительно превышают инерционный период 16.48 ч. Численное моделирование шельфовых волн для экспоненциально выпуклых профилей морского дна, проведенное с использованием дисперсионного соотношения В.Т. Бухвальда и Дж.К. Адамса для волн континентального шельфа, показало, что обнаруженные волновые процессы с периодами от 31.2 ч до 46.7 ч являются шельфовыми волнами. Их амплитуды увеличиваются во время штормов; показана возможность передачи энергии от атмосферных возмущений шельфовым волнам, которые вносят вклад в формирование уровня моря, что подтверждает ранее сделанное предположение. Путем расчета разности фаз шельфовых волн на расстоянии 12.4 км между Невельском и Горнозаводском, наблюдаемых и определенных по теоретической модели, установлено, что вторая мода шельфовой волны с частотой 0.152 цикл/ч близка к теоретической. Регистрируемая в Ильинском и Горнозаводске волна с периодом 26.1 ч при расстоянии между пунктами 173.6 км не может быть шельфовой, а является волной Кельвина. Это подтверждено рассчитанной дисперсионной диаграммой, согласно которой длина волны около 689 км хорошо соответствует разности фаз для расстояния Ильинский–Горнозаводск. Установлено, что шельфовые волны, одним из механизмов генерации которых является напряжение ветра вдоль берега, имеют разные амплитуды в летнее и зимнее время, что обусловлено сезонным направлением вдольберегового ветра. В летний период направления распространения шельфовых волн и ветра противоположны, что ослабляет шельфовые волны.

Ключевые слова: длинные и шельфовые волны, волна Кельвина, спектральный анализ, моделирование, дисперсионная диаграмма

Long waves on the shelf of the southwest coast of Sakhalin Island

Dmitry P. Kovalev*, Peter D. Kovalev, Vitalij S. Zarochintsev, Konstantin V. Kirillov

*E-mail: d.kovalev@imgg.ru

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

Abstract. The results of the study of long-wave motions with periods of more than 20 hours on the shelf of the southwest coast of Sakhalin Island using the time series of sea level fluctuations obtained in full-scale experiments with a discreteness of 1 s and a duration of 4 to 6 months are considered. Spectral analysis of the time series of sea level fluctuations for the period range from 8 to 200 hours revealed the presence of long-wave processes with periods from 26.1 to 46.7 hours, which significantly exceed the inertial period of 16.48 hours. Numerical modeling of shelf waves for exponentially convex profiles of the seabed, carried out using the dispersion relation of V.T. Buchwald and J. K. Adams for waves of the continental shelf, showed that the detected wave processes with periods from 31.2 h to 46.7 h are shelf waves. Their amplitudes increase during storms. The possibility of energy transferring from atmospheric disturbances to shelf waves, which contribute to the formation of sea level, is shown, that confirms the earlier made assumption. Using the calculation of the phase difference of the observed shelf waves at a distance of 12.4 km between Nevelsk and Gornozavodsk and determined by means of the theoretical model, it is shown that the second mode of the shelf wave with a frequency of 0.152 cycle/h is close to the theoretical one. It is shown for the wave with a period of 26.1 h recorded in Ilyinsky and Gornozavodsk for the distance between the points of 173.6 km, that this wave cannot be a shelf wave,

but it is a Kelvin wave. This is confirmed by the calculated dispersion diagram, according to which the wavelength of about 689 km corresponds well to the phase difference for the distance Ilyinsky – Gornozavodsk. It is found that shelf waves, one of the generation mechanisms of which is the wind tension along the coast, have the different amplitudes in summer and winter, that is due to the seasonal direction of the offshore wind. In summer, the directions of shelf wave propagation and wind are opposite, which weakens the shelf waves.

Keywords: long and shelf waves, Kelvin wave, spectral analysis, modeling, dispersion diagram

Для цитирования: Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Зарочинцев В.С., Кириллов К.В. Длинные волны на шельфе юго-западного побережья о. Сахалин. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 2, с. 160–174. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.2.160-174>; <https://www.elibrary.ru/evpvwr>

For citation: Kovalev D.P., Kovalev P.D., Zarochintsev V.S., Kirillov K.V. Long waves on the shelf of the southwest coast of Sakhalin Island. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 2, pp. 160–174. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.2.160-174>; <https://www.elibrary.ru/evpvwr>

Введение

Волны, результаты изучения которых рассматриваются здесь для конкретного шельфа, являются низкочастотными, длиннопериодными. Такие волны были обнаружены в некоторых районах континентального шельфа и склонов около 50 лет назад [1]. Сам термин «длинные волны» относится к волновым процессам, для которых горизонтальные масштабы значительно превышают глубину моря, и связан с приближением в гидростатике, согласно которому в уравнениях движения можно пренебречь вертикальными ускорениями [2]. При этом изменения глубины и влияние вращения Земли приводят к захвату в прибрежной (пограничной) зоне волновой энергии и образованию волновода, в котором волны распространяются на большие расстояния без существенной потери энергии.

При удалении от берега с изменением топографии и иных параметров среды происходит трансформация волнового поля с модификацией длинных волн, появляются такие пограничные волновые процессы, как поверхностные волны Кельвина, краевые и шельфовые волны и другие [3, 4]. Поэтому перечисленные волны относят к топографическим волнам.

Обычно считается, что эти прибрежные захваченные волны генерируются напряжением ветра вдоль берега [5], но, по мнению авторов статей [6, 7], возможны другие механизмы воздействия, такие как топографические неровности, приливы, устья рек. При этом наклонный шельф формирует волновод для этих субинерционных колебаний, и их фазы распространяются вдоль побережья справа

в Северном полушарии и слева в Южном полушарии [8], сохраняя таким образом потенциальную завихренность [9].

Одним из видов топографических волн, распространяющихся в зоне шельфа – континентального склона, являются континентальные шельфовые волны. Они вносят относительно слабый вклад в колебания уровня моря, но порождают сильные течения [10, 11]. Этот факт использован Д. Картрайтом [10] для объяснения значительных суточных приливных течений на шельфе Гебридских островов (Северная Атлантика), где при малых суточных колебаниях уровня фазовые соотношения суточных течений по измерениям на разных станциях хорошо соответствовали первой моде шельфовых волн. Следует отметить, что шельфовые волны вносят значительный вклад в формирование синоптических колебаний уровня океана и прибрежных течений, топографических вихрей, в перенос осадочного материала и др. [3, 12].

Экспериментальное изучение шельфовых волн представляет определенные трудности, связанные с большой длиной волны, значительно превышающей расстояние между пунктами наблюдения, и другими свойствами (например, периодом, скоростью фазы и т.д.), которые изменяются на относительно коротких расстояниях в результате изменения ширины шельфа, батиметрии, стратификации и трения дна [7]. Из-за этих трудностей первые теоретические попытки описать шельфовые волны аналитически, используя волновое уравнение первого порядка, завершились разработкой в 1970-х годах простейшей баротропной модели в длинноволновом приближении [5, 13], расширенной за счет включения стратификации [14], перемен-

ной батиметрии [15] и придонного трения [16].

Другой вид топографических волн – волна Кельвина. Это единственный вид пограничных волн, который существует на частотах выше и ниже инерционной. Амплитуда волны Кельвина экспоненциально затухает в сторону открытого океана. В области низких частот, ниже инерционной, вращение Земли является определяющим, а с увеличением частоты большее влияние оказывает топография шельфа и волна Кельвина переходит в нулевую моду краевых волн. Впервые эта волна была описана лордом Кельвином в работе [17]. Волна Кельвина играет важную роль в формировании океанских приливов [18, 19, 20].

Авторами настоящей работы при анализе временных рядов колебаний уровня моря, полученных в береговой зоне юго-западного побережья о. Сахалин, были обнаружены волновые процессы с периодами большими, чем инерционный период для акватории вблизи Горнозаводска, равный 16.48 ч. И поскольку, как показано в работе [21], шельфовые волны существуют на частотах ниже инерционной частоты, то обнаруженные волновые процессы могут быть отнесены к шельфовым волнам. К тому же западный шельф о. Сахалин достаточно протяженный – от южной оконечности

острова до прол. Невельского около 660 км, и здесь возможна генерация шельфовых волн. Поэтому представляет интерес провести анализ обнаруженных волновых процессов для конкретного района побережья, определить направление и скорость распространения и выяснить, коррелируют ли они с ветрами или приливными волнами, согласуются ли они со скоростями, рассчитанными по теории шельфовых волн.

Наблюдения

Результаты изучения топографических волн, описанные в настоящей статье, получены с использованием автономных измерителей уровня моря АРВ–К14, которые устанавливались на морское дно на срок от 4 до 6 мес. и осуществляли регистрацию волнения с секундной дискретностью. Приборы используют высокоточный кварцевый датчик давления с разрешающей способностью $\pm 0.0008\%$ от верхнего предела измерения с основной приведенной погрешностью $\pm 0.06\%$. Память прибора рассчитана на непрерывную запись данных длительностью до одного года. Приборы изготавливаются ООО «СКТБ ЭлПА» в г. Углич и успешно используются на протяжении более 10 лет.

На рис. 1 показана карта района исследования и населенные пункты, вблизи которых

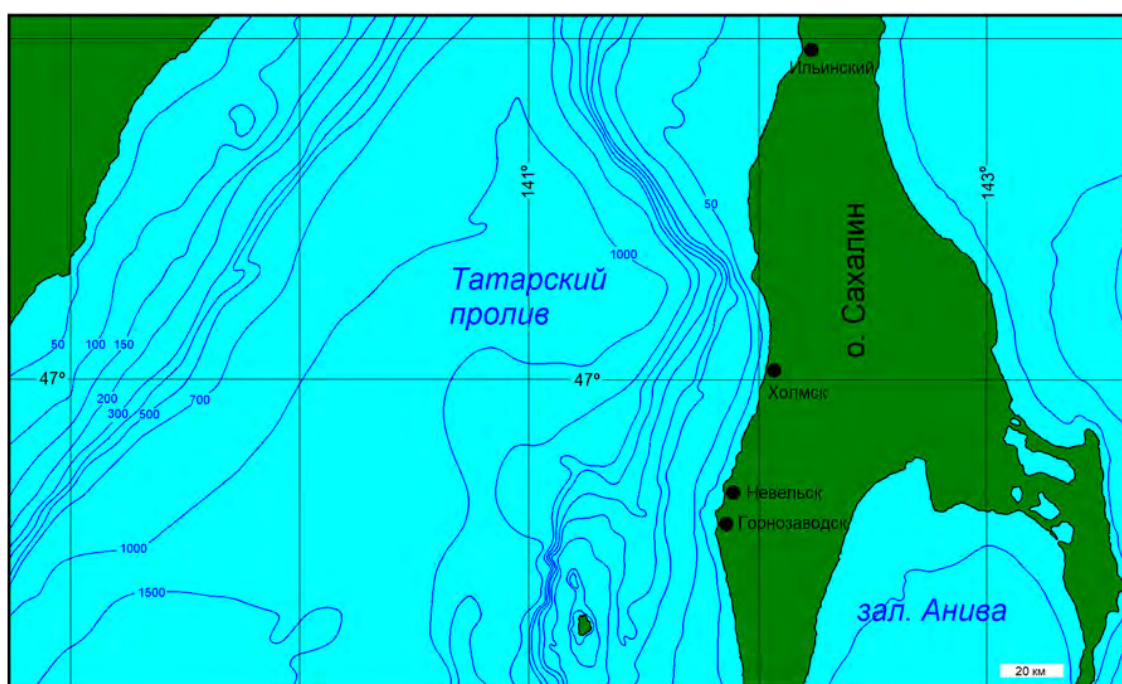


Рис. 1. Карта района исследований.

Fig. 1. Map of the research area.

в акваториях были установлены измерители волнения. Береговая линия о. Сахалин от Горнозаводска до Холмска достаточно прямая, но содержит устья небольших рек. От Холмска до Ильинского береговая линия имеет плавный изгиб с одним значительным выступом – мысом Слепиковского, выступающим в море примерно на 4 км. Батиметрическая картина Татарского пролива в районе исследований достаточно сложная. И если от Горнозаводска до мыса Слепиковского изобаты до 500 м глубины идут почти параллельно берегу, то севернее мыса они существенно отклоняются в море. Эта особенность акватории позволяет рассмотреть, как изменяются параметры длинных волн в исследуемом районе для разных пунктов наблюдения.

Континентальный склон в рассматриваемой акватории достаточно пологий, с экспоненциально выпуклым профилем дна, с уменьшением ширины шельфа в направлении от Горнозаводска к Холмску и последующим значительным расширением к пос. Ильинский. На рис. 2. приведены профили морского дна для акваторий около этих пунктов. Отметим, что максимальная глубина Татарского

пролива в рассматриваемой акватории около 1000 м.

На рис. 3 приведены графики временного хода колебаний уровня моря для акваторий пунктов наблюдения. Длительность временных серий составляла от 4 до 6 мес. при дискретности измерений 1 с. Из этих рядов с помощью алгоритма, предложенного А.Б. Рабиновичем в программе Кута [22, 23], вычтен предвычисленный прилив. Это сделано для устранения из временных рядов приливных гармоник, которые, обладая большой энергией, могут «закрывать» в графиках спектральных плотностей пики других длинных волн. Также отметим, что для анализа в настоящей работе использовались еще два временных ряда, зарегистрированные в тех же пунктах наблюдения, но полученные в другое время: в Горнозаводске с июня по сентябрь 2008 г. и в Невельске с ноября 2007 по апрель 2008 г.

Анализ временных серий

Полученные временные серии были подвергнуты спектральному анализу с использованием программы Кута [22, 23], разработанной специально для анализа временных рядов колебаний уровня моря и температуры воды большой длительности и объема. Для диапазона периодов 10–200 ч. были вычислены спектральные плотности колебаний уровня по временным сериям с вычтенным предвычисленным приливом (рис. 4).

На рис. 4 на кривых спектральных плотностей колебаний уровня моря, рассчитанных по всей длине временных рядов, хорошо выделяются пики на периодах более 20 ч. Эти пики не могут быть обусловлены приливными гармониками, поскольку приливные гармоники были вычтены. Также видно, что периоды пиков для различных пунктов наблюдения разные. Например, для Горнозавод-

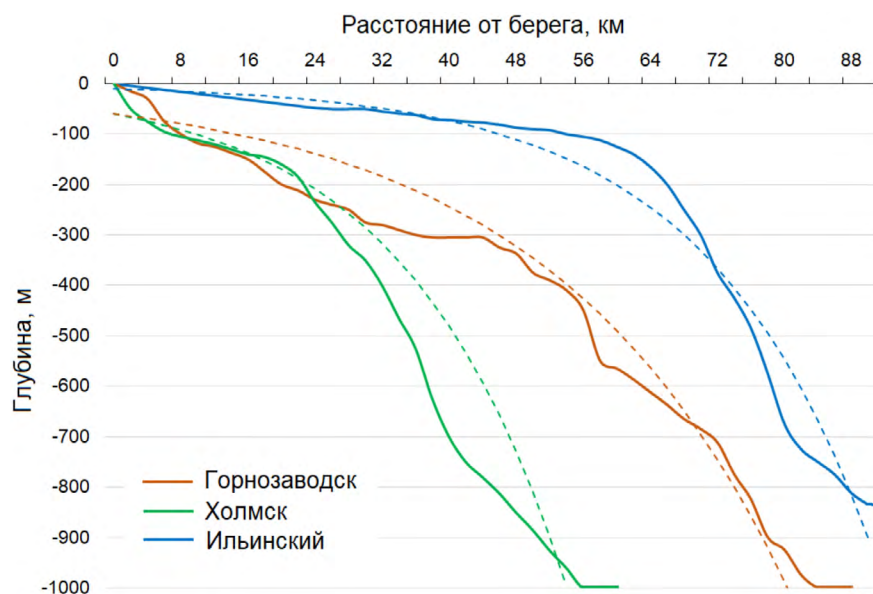


Рис. 2. Профили дна в районах населенных пунктов западного побережья о. Сахалин. Пунктирными линиями показаны аппроксимации профилей. Аппроксимации: для Ильинского $H = -10 \exp(0.05x)$, Горнозаводска $H = -60 \exp(0.035x)$, Холмска $H = -60 \exp(0.052x)$. Здесь H – глубина моря, x – расстояние от берега.

Fig. 2. Bottom profiles in the areas of settlements on the west coast of Sakhalin Island. The dotted lines show the approximations of the profiles. Approximations: for Ilyinsky $H = -10 \exp(0.05x)$, Gornozavodsk $H = -60 \exp(0.035x)$, Kholmok $H = -60 \exp(0.052x)$. Here H is the depth of the sea, x is the distance from the shore.

ска 2009 г. значимые пики находятся на периодах 31.2 ч ($\omega = 0.201$ цикл·ч⁻¹) и 41.3 ч ($\omega = 0.152$ цикл·ч⁻¹), а для Невельска 2009 г. на периодах 31.7 ч ($\omega = 0.198$ цикл·ч⁻¹) и 40.3 ч ($\omega = 0.156$ цикл·ч⁻¹). Для Холмска периоды пиков 32.1 ч ($\omega = 0.196$ цикл·ч⁻¹) и 44.1 ч ($\omega = 0.142$ цикл·ч⁻¹), т.е. разница по сравнению с Горнозаводском еще больше. В то же время еще один значимый пик в спектральных плотностях для Ильинского располагается на периоде 26.1 ч ($\omega = 0.240$ цикл·ч⁻¹). При этом, как показало сравнение этого периода с периодами возможных приливных гармоник [24], данный волновой процесс не является приливным.

Присутствие большого числа спектральных пиков побудило авторов провести анализ

волновых процессов в диапазоне периодов от инерционной частоты до 60 ч более подробно. С этой целью для разных пунктов наблюдения юго-западного побережья о. Сахалин по временным рядам с вычтенным предвычисленным приливом были рассчитаны спектрограммы, приведенные на рис. 5. При этом похожие спектрограммы для соседних пунктов не включены в рисунок.

Хорошо видно, что для периодов около 30 и 40 ч пики энергии присутствуют не в течение всего времени наблюдения. Так, в Орлово эти волны возбуждаются в августе, а в Ильинском, расположенном примерно на 100 км южнее, в августе–сентябре. Отметим, что, согласно спутниковым данным [25], в северной части

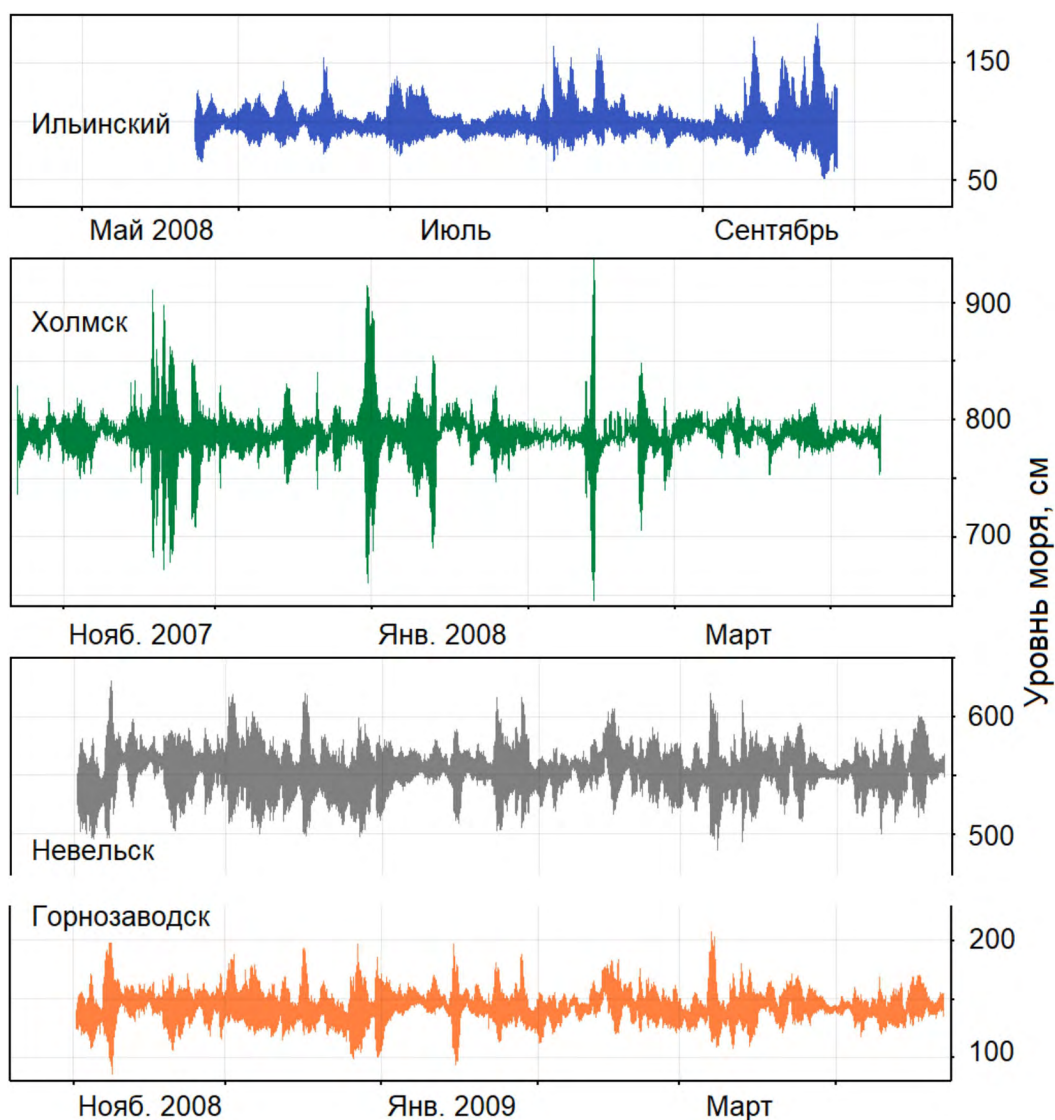


Рис. 3. Колебания уровня моря в акваториях пунктов наблюдений. Вычтен предвычисленный прилив.

Fig. 3. Sea level fluctuations in the observation points water areas. The precalculated tide is subtracted.

Японского моря в августе наблюдается максимальный прогрев морской воды.

К сожалению, длина временных рядов для первых двух пунктов наблюдения не позволяет проследить генерацию длинных волн с рассматриваемыми периодами в течение года, а для Горнозаводска такой анализ выполнен ниже. В то же время по полугодовой серии в порту Холмск, включающей зимний период времени, видно, что тенденция генерации волн непостоянна, а в определенные промежутки времени сохраняется продолжительное время. И при этом для некоторых ситуаций наблюдается плавный переход от одного периода к другому. Например, в порту Холмск волны с периодом около 47.5 ч начиная с 11.12.2007 изменяют период до 43 ч 19.12.2007 и далее еще более плавно до периода 40.6 ч. И уменьшение периода волн с декабря по первую декаду марта соответствует времени, когда в районе Холмска наблюдается самая высокая концентрация льда и понижение температуры морской воды [25]. Аналогичное плавное изменение периодов генерируемых волн наблюдается в Горнозаводске для периодов волн около 40 ч в августе.

Обнаруженные особенности генерации длинных волн позволяют заключить, что их возбуждение происходит не постоянно, а только в некоторые продолжительные периоды времени и в зависимости от температуры морской воды в конкретных районах наблюдения. При этом возможно медленное изменение периодов длинных волн. Данные особенности не проявляются на графиках спектральной плотности, приведенных на рис. 4, поскольку они рассчитаны по всей длине временных рядов.

Также, как следует из анализа спектрограмм (рис. 5), возможна одновременная генерация длинных волн с разными периодами в анализируемом диапазоне, в том числе и на близких периодах. Так, на рис. 5 видно, что в феврале в акватории вблизи Холмска наблюдались волны с периодами 30.0, 31.5, 33.7, 36.0 ч. В это же время, в феврале 2008 г., как следует из рис. 5, наблюдались суточные и полусуточные приливные гармоники M_1 и M_2 с повышенной энергией. А выполненный кросс-спектральный анализ синхронных колебаний температуры и уровня моря для временных рядов Холмска показал значение передаточной функции больше единицы для периодов около 31 и 34 ч

с середины января до первой декады февраля. И можно предположить, что приливные гармоники наряду с температурой воды способствуют возбуждению длинных волн. Заметим, что сделанные нами предположения и выводы согласуются с мнением авторов статей [6, 7] о возможном влиянии на механизмы генерации длинных волн таких факторов, как топографические неровности, приливы, устья рек.

Модель

Поскольку диапазон периодов длиннее инерционной частоты относится к диапазону шельфовых волн, был осуществлен анализ

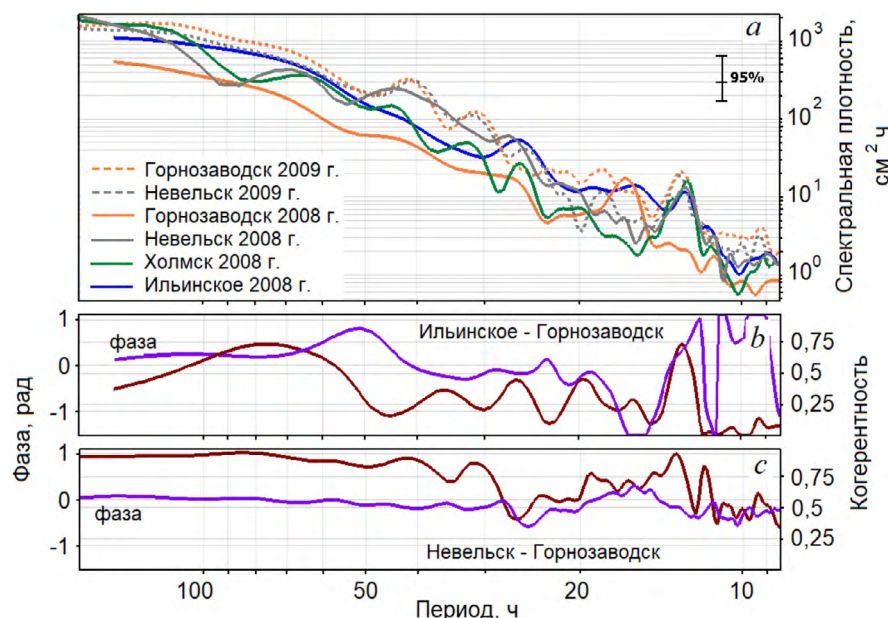


Рис. 4. Спектральные плотности колебаний уровня моря (а), рассчитанные по всей длине временных рядов с вычтенным предвычисленным приливом, когерентность и фаза для пунктов Ильинский – Горнозаводск (b) и Невельск – Горнозаводск (c).

Fig. 4. Spectral densities of sea level fluctuations (a) calculated over the entire length of time series with subtracted precalculated tide, coherence and phase for Ilyinsky – Gornozavodsk (b) and Nevelsk – Gornozavodsk (c).

возможности существования шельфовых волн, выполненный, как и в ранее опубликованных нами статьях [26 и др.], с использованием модели и дисперсионного соотношения для волн континентального шельфа [5]. При этом для Невельска и Горнозаводска, поскольку периоды волн в них различаются незначительно, в расчетах использовалась широта установки прибора в Горнозаводске (около 46.58°). Для Холмска учитывалась широта 47.11° , для

Ильинского – 47.99° . Инерционные частоты вычислены по известной формуле $f = 2\Omega \sin\varphi$, где φ – широта, $\Omega = 7.2921 \cdot 10^{-5}$ цикл/с – круговая частота вращения Земли. Значение функции $\sin\varphi$ равно 0.726, 0.733 и 0.743 для Горнозаводска, Холмска и Ильинского соответственно. Тогда инерционные частоты для пунктов наблюдений равны 0.381, 0.384 и 0.390 цикл/ч, а периоды инерционных колебаний 16.48, 16.35 и 16.09 ч соответственно. Исходя из того, что

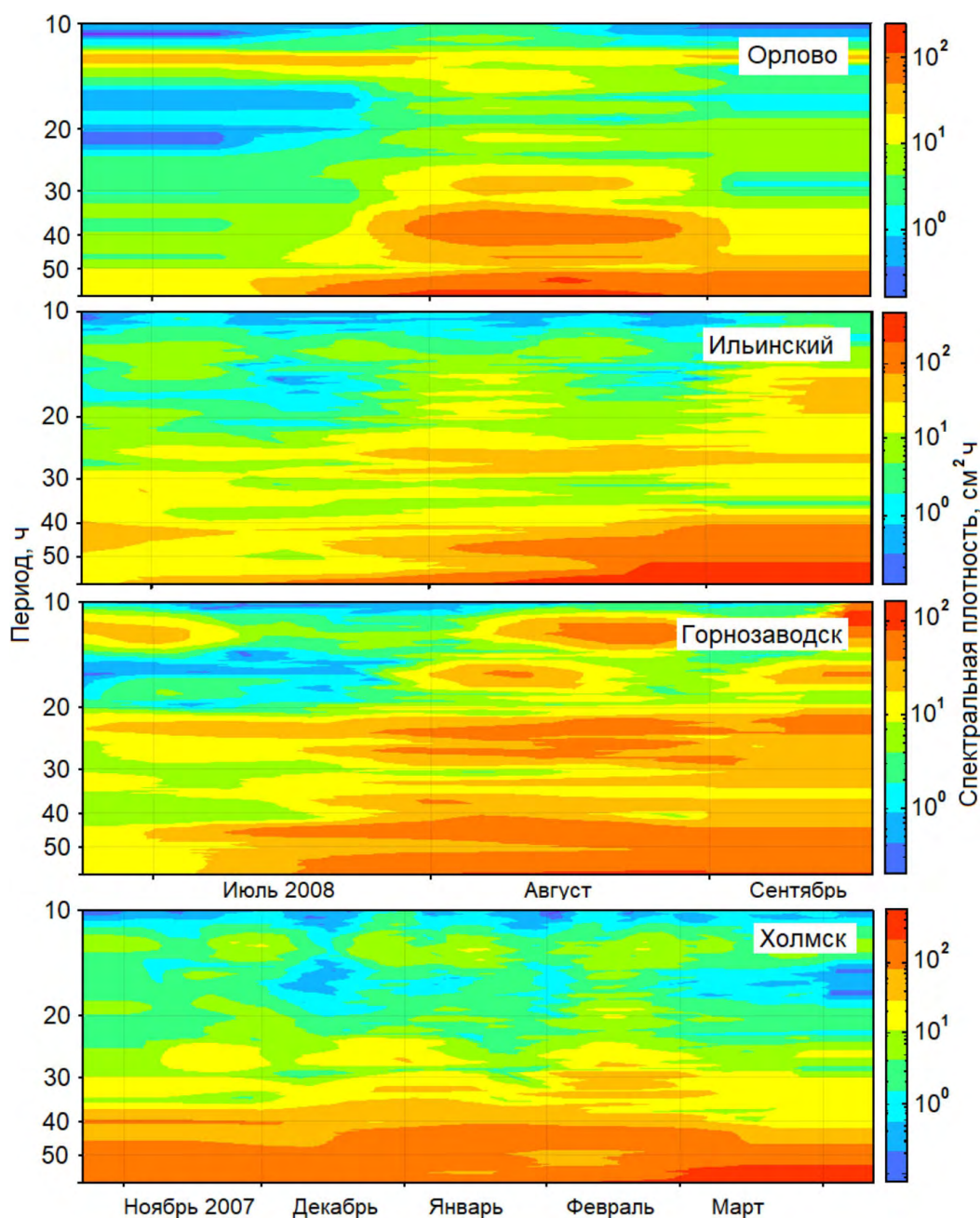


Рис.5. Спектрограммы для четырех пунктов наблюдения юго-западного побережья о. Сахалин.
Fig. 5. Spectrograms for four observation points of the southwest coast of Sakhalin Island.

шельфовые волны существуют на частотах ниже инерционной частоты $\omega < f$ [21], обнаруженные волновые процессы, видимо, можно отнести к шельфовым волнам.

С учетом вычисленных значений инерционных частот было проведено численное моделирование с использованием соответствующих пунктам наблюдений аппроксимаций профиля морского дна. Дисперсионное соотношение для волн континентального шельфа было получено В.Т. Бухвальдом и Дж.К. Адамсом [5] для экспоненциального профиля морского дна на шельфе:

$$H(x) = \begin{cases} H_1 e^{-2bx} & 0 \leq x < L \\ H_2 L & L \leq x < \infty \end{cases}, \quad (1)$$

где x – морская координата, и предполагается, что $H_1 e^{-2bL} = H_2$, так что $H(x)$ непрерывна при $x = L$.

Позднее П.Г. Лебломом и Л.А. Майском [4], а также А.Е. Гиллом [27] были сделаны обобщения теории. Ими рассматривается модель океана с жесткой верхней границей в предположении, что движения бездивергентны в горизонтальной плоскости, и вводится функция потока $\psi(x, y, t)$, которую можно представить через скорости u и v как $Hu = -\psi_x$ и $Hv = \psi_y$. Тогда, полагая, что $f = \text{const}$ и $H = H(x)$, уравнение для топографических планетарных волн ψ имеет вид [4, 5]

$$\psi(x, y, t) = \Phi(x) \exp[i(ky - \omega t)], \quad (2)$$

а уравнение баротропных движений при изменяющейся глубине будет иметь вид [4, 5]

$$\frac{d^2 \Phi}{dx^2} - 2b \frac{d\Phi}{dx} - \left(\frac{2bfk}{\omega} + k^2 \right) \Phi = 0. \quad (3)$$

Не приводя промежуточных преобразований, сделанных в указанных работах, запишем решение уравнения (3) для мелководного шельфа:

$$\Phi(x) = A e^{b(x-L)} \sin mx, \quad (4)$$

где A – произвольная константа. При этом дисперсионное соотношение $\omega = \omega(k)$ неявно задается двумя уравнениями [4]:

$$m^2 + k^2 + b^2 + 2bkf\omega^{-1} = 0 \quad (5a)$$

и

$$\text{tgm}L + \frac{m}{b + |k|} = 0. \quad (5b)$$

В уравнениях (5a и 5b) f – параметр Кориолиса, определенный как положительный в северном полушарии и отрицательный в южном, k – волновое число, ω – частота волны, $m \approx f/(gH)^{1/2}$ [28]. С использованием экспоненциальной аппроксимации профиля дна (1) и уравнений (5), связывающих величины ω ,

k и m , были рассчитаны дисперсионные диаграммы шельфовых волн $\omega/f = \omega(k/b)$ для четырех мод шельфовых волн и пунктов наблюдения Горнозаводск и Холмск (рис. 6).

Рассчитанные дисперсионные диаграммы (рис. 6) показывают, что для длинных волн, обнаруженных по натурным данным, для Горнозаводска с периодами 31.2 ч ($\omega = 0.201$ цикл·ч⁻¹) и 41.3 ч ($\omega = 0.152$ цикл·ч⁻¹) и для Холмска с периодами 32.1 ч ($\omega = 0.196$ цикл·ч⁻¹) и 44.1 ч ($\omega = 0.142$ цикл·ч⁻¹) возможно существование

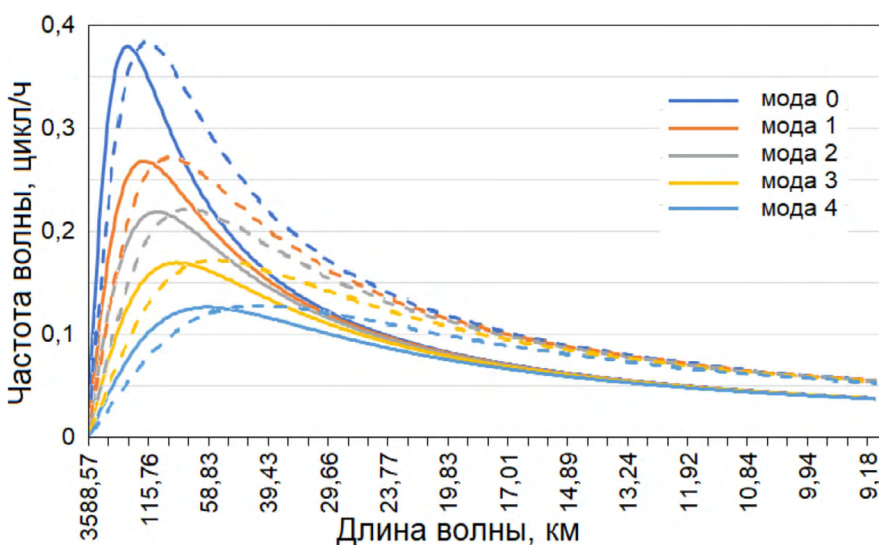


Рис. 6. Дисперсионные диаграммы для шельфовых волн в районе Горнозаводска (сплошные кривые) и Холмска (пунктирные кривые).

Fig. 6. Dispersion diagrams for shelf waves in the area of Gornozavodsk (solid curves) and Kholmok (dotted curves).

шельфовых волн. Для акватории вблизи Невельска также возможно существование шельфовых волн на периодах обнаруженных пиков (рис. 4), но рассчитанная для этого случая дисперсионная диаграмма мало отличается от диаграммы для Горнозаводска и поэтому на рис. 6 не приведена.

Как видно из рисунков 1 и 6, сужение шельфа в районе Холмска по сравнению с районом Горнозаводска обуславливает более короткую шельфовую волну. При этом большее влияние на длину шельфовой волны оказывает крутизна шельфа, представленная через показатель степени b в уравнении аппроксимации шельфа (1). Увеличение b в 1.48 раза (для шельфа Холмска по сравнению с шельфом Горнозаводска) уменьшает длину шельфовой волны в 1.44 раза. Проверить степень влияния изменения инерционной частоты на изменение длины шельфовой волны не представляется возможным, поскольку изменение инерционной частоты в Холмске по сравнению с Горнозаводском всего 0.7 %, а изменение длины волны в рамках погрешности ее определения.

Шельфовые волны, как считают в [4], захватываются вдоль шельфа и распространяются в виде последовательности горизонтальных вихрей с переменным знаком, и они могут быть как баротропными, так и бароклинными. Такие шельфовые волны, представленные в виде вихрей, в результате взаимодействия с островами, прибрежными течениями и благодаря бароклинической неустойчивости, рассмотренной в [29], могут порождать более коротковолновые процессы, которые обычно наблюдаются в графиках спектральной плотности.

Вопрос о разных периодах шельфовой волны в разных пунктах наблюдения пока остается открытым и требует дополнительных исследований. Причин для существования таких волн с разными периодами может быть несколько. Возможно, что сгенерированная где-то шельфовая волна, распространяясь вдоль побережья, регистрируется не всеми приборами. Некоторые из них могут располагаться в углублениях дна и, поскольку шельфовые волны проявляются больше в течениях, прибор не может зафиксировать очень малые изменения в уровне моря.

Обсуждение

В рамках проводимого исследования топографических волн была выполнена проверка предположения, сделанного Б.В. Хамоном [30], о том, что постоянно существующие на восточном побережье Австралии движущиеся континентальные шельфовые волны могут подпитываться колебаниями атмосферного давления и в свою очередь вносить вклад в формирование уровня моря. Сделать заключение по этому предположению Хамон не смог из-за, как он сам считал, коротких временных серий.

Нами оценивалось совпадение во времени зарегистрированных максимумов подъемов уровня моря с максимумами шельфовых волн при длине рядов около 6 мес. (на рис. 7 приведен укороченный ряд, которого в данном случае достаточно для интерпретации). В случае совпадения максимумов можно заключить о теоретической возможности шельфовых волн вносить вклад в подъемы уровня моря. С использованием зарегистрированной прибором около Горнозаводска временной серии и узкополосной цифровой фильтрации с шириной полосы пропускания $\pm 10\%$ от несущей были вычислены колебания уровня для периодов 31.2 ч (рис. 7 а) и 41.3 ч. Однако сравнивать совпадение максимумов периодов такого модельного ряда с максимумами уровня наблюдаемой временной серии (рис. 7 б), как видно из рисунка, затруднительно. Поэтому рис. 7 б снабжен вспомогательным графиком сгенерированного ряда синусоидальной волны с обнаруженным периодом 31.2 ч по формуле $x(t) = 2110 + 20 \sin((2\pi/T)t + \varphi_0)$, где T – период шельфовых волн, φ_0 – начальная фаза.

Сравнение синусоиды с периодом 31.2 ч и исходного ряда колебаний уровня моря в Горнозаводске с вычтенным предвычисленным приливом показывает синхронизацию почти всех пиков подъема уровня выше 148 см с максимумами шельфовых волн. Поэтому можно заключить, что движущиеся континентальные шельфовые волны могут, сами подпитываясь колебаниями атмосферного давления, вносить вклад в подъем уровня моря. Заметим, что максимумы волны с периодом 41.3 ч совпадали с максимумами уровня гораздо реже.

Из сравнения рассчитанной временной серии колебаний уровня с периодом 31.2 ч. (рис. 7 а) и исходной временной серии колебаний уровня моря в Горнозаводске (рис. 7 с) хорошо видно, что повышение энергии шельфовых волн по времени связано с наличием штормов, о чем можно судить по усилению ветрового волнения (рис. 7 с). Это подтверждает предположение Хамона о подпитке шельфовых волн колебаниями атмосферного давления, о чем можно судить по увеличению амплитуд ветровых волн.

Относительно волн, регистрируемых в Невельске и Горнозаводске, периоды пиков в спектральных плотностях колебаний уровня моря для длин шельфовых волн, определенных теоретически, соответствуют обнаруженным периодам пиков в спектральных плотностях, рассчитанных по натурным данным, с учетом разности фаз этих волн между этими

пунктами, равной -0.22 рад (рис. 4 с). Расстояние между этими пунктами наблюдения около 12.4 км. Для зимнего периода и второй моды шельфовой волны с частотой 0.152 цикл/ч длина волны составляет 475 км и разность фаз соответствует 16.6 км. Учитывая погрешности в определении периода, а также использование в расчетах простой модели шельфовых волн, можно заключить, что наблюдаемая волна близка к теоретической.

Аналогичный вышеприведенному расчет в предположении для волны, регистрируемой в Ильинском и Горнозаводске, с периодом 26.1 ч при расстоянии между пунктами наблюдения 173.6 км и разности фаз -0.17 рад (рис. 4 б), показал, что соответствующее этой разности фаз расстояние между пунктами наблюдения значительно отличается от реального расстояния между пунктами. Это означает, что наблюдаемая волна не является шельфо-

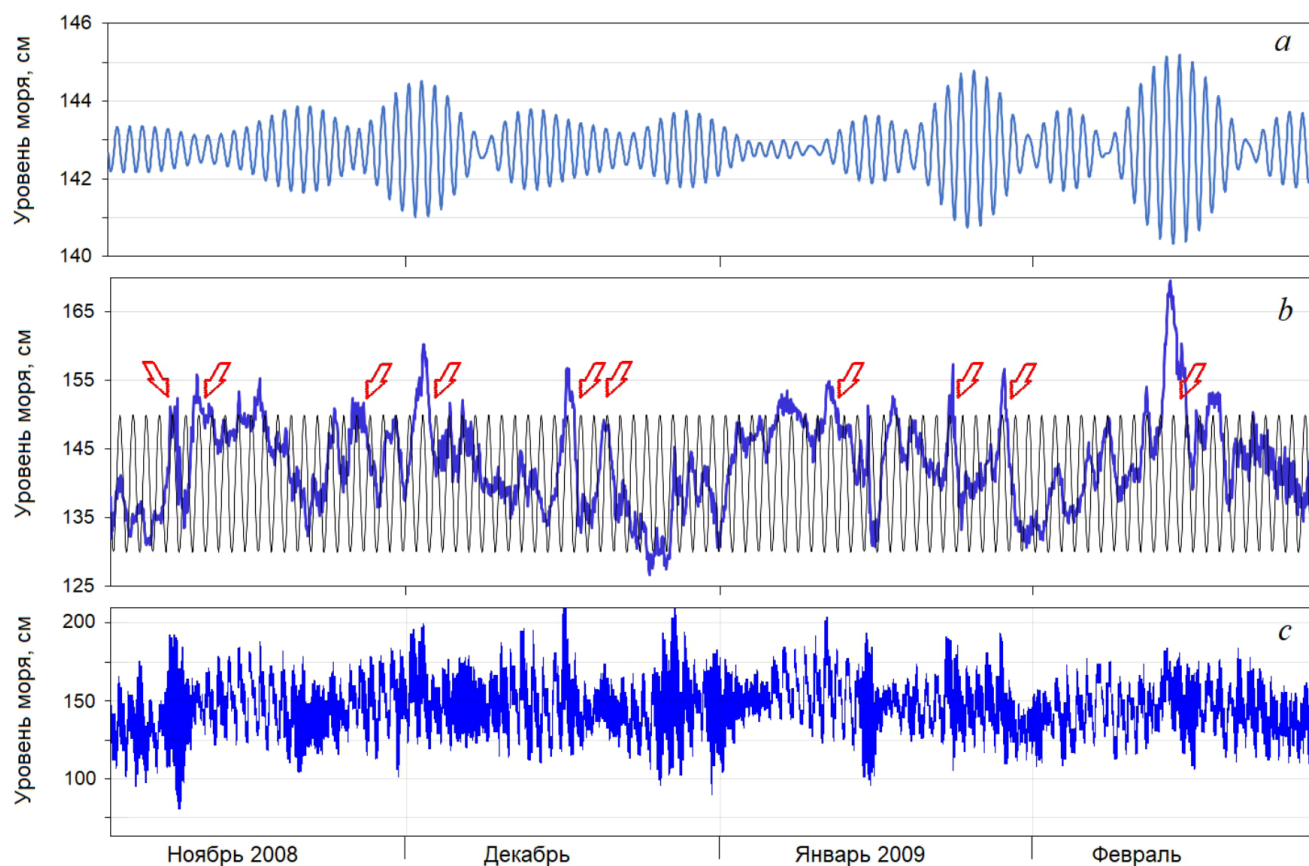


Рис. 7. Исходный временной ряд, зарегистрированный около Горнозаводска и подвергнутый узкополосной цифровой фильтрации с полосой пропускания $31.2 \text{ ч} \pm 10 \%$ (а); сгенерированная синусоида с периодом 31.2 ч, наложенная на исходный ряд колебаний уровня моря в Горнозаводске с вычтенным предвычисленным приливом (б); исходная временная серия с приливом (с).

Fig. 7. The initial time series registered near Gornozavodsk and subjected to narrow-band digital filtering with a bandwidth of $31.2 \text{ h} \pm 10 \%$ (a); the generated sinusoid with a period of 31.2 h superimposed on the initial series of sea level fluctuations in Gornozavodsk, with the precalculated tide subtracted (b); the initial time series with the tide (c).

вой. Поэтому предположили, что наблюдаемая волна является волной Кельвина. Расчет ее длины был выполнен с использованием дисперсионного соотношения, приведенного в работах [2, 31]:

$$\omega = k(gH)^{1/2}. \quad (6)$$

Вычисленная с использованием (6) длина волны равняется 689 км, и для разности фаз -0.16 рад соответствующее расстояние между пунктами наблюдения равно 175.4 км. Эта величина близка к реальному расстоянию между Ильинским и Горнозаводском, а значит, выделяющийся в спектральной плотности колебаний уровня моря пик с периодом 26.1 ч соответствует волне Кельвина. На рис. 6. дисперсионная кривая не показана, поскольку она для этого диапазона частот волн практически сливается с вертикальной осью.

Волна Кельвина, как показывают результаты исследований, представленных в работах [18, 19, 20, 32] и других, играет важную роль в формировании океанских приливов. Для рассматриваемого периода 26.1 ч волны Кельвина, как показывает сравнительный анализ, су-

ществуют ближайшие приливные гармоники [24] с периодами 25.8 ч (MK_1) и 26.7 ч (p_1). Период первой гармоники отличается от наблюдаемого периода волны Кельвина всего на 2 %, и, учитывая, что точность определения периода по данным наблюдений примерно такая же, можно предположить о вкладе волны Кельвина с периодом 26.1 ч в приливную мелководную гармонику MK_1 . Однако это исследование выходит за рамки настоящей статьи.

При анализе спектров плотности колебаний уровня моря (рис. 4) было замечено, что для одного и того же пункта наблюдения периоды пиков шельфовых волн разные для разных сезонов наблюдения. Так, в летний период в Невельске и Горнозаводске (рис. 4, штриховые линии) пики на спектральных плотностях имеют меньшую величину, чем для зимнего периода. Кроме того, значения периодов летом больше, чем зимой. Например, в Горнозаводске максимум для летнего сезона располагается на периоде 44.6 ч, а второй максимум вообще еле проявляется. Такая же ситуация – разные частоты волновых процессов летом и зимой – отмечена в работе [33].

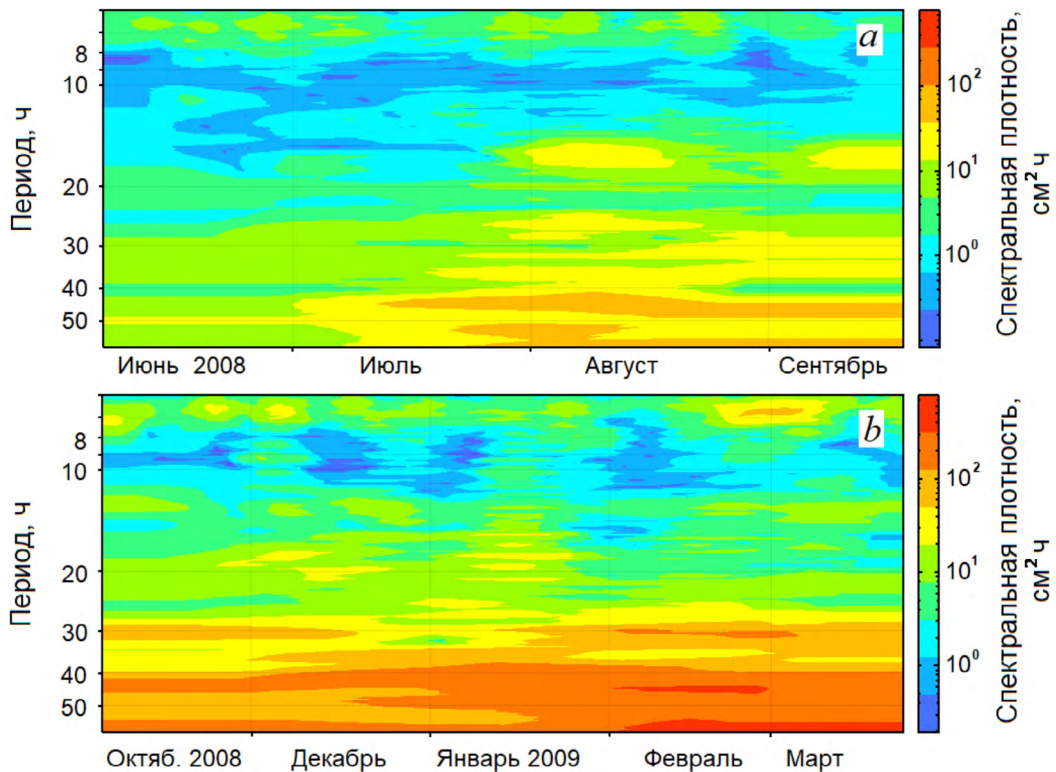


Рис. 8. Спектральные плотности колебаний уровня моря для Горнозаводска с июня по сентябрь (а) и с октября по март (б).
Fig. 8. Spectral densities of sea level fluctuations for Gornozavodsk from June to September (a) and from October to March (b).

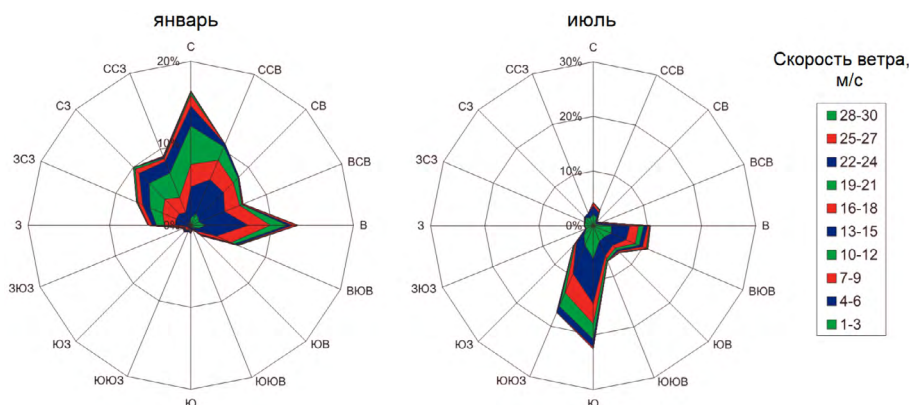


Рис. 9. Диаграммы повторяемости ветра по градациям скорости (в м/с) и направлениям в различные сезоны года для метеорологической станции Невельск, по данным наблюдений 1977–1984 гг. [34].

Fig. 9. Diagrams of wind repeatability by speed gradations (in m/s) and directions in different seasons of the year for the Nevelsk meteorological station, according to observations of 1977–1984 [34].

Для того чтобы проследить эти изменения в разные сезоны года, были рассчитаны текущие спектральные плотности (спектрограммы) для Горнозаводска (рис. 8). Хорошо видно, что период 44.6 ч волнового процесса в августе плавно удлиняется до 46.7 ч (рис. 8 а), а в декабре период максимума укорачивается до 40.8 ч (рис. 8 б). А пик на периоде около 30 ч летом выражен очень слабо.

Поскольку предполагается [5], что одним из механизмов генерации шельфовых волн является воздействие ветров, рассмотрим сезонное направление и величину ветров в районе Невельска, где имеется метеорологическая станция и проводятся длительные наблюдения. На рис. 9 из монографии [34] представлены некоторые результаты соответствующих вычислений для восьмилетних рядов скорости и направления ветра 10-минутного осреднения, полученные на станции Невельск.

Для метеостанций, расположенных на побережье Татарского пролива, и в Невельске в частности, в наблюдающейся двумодальной структуре ветров в зимнее время основные составляющие – северная и восточная, в летнее – южная и восточная. Для зимних ветров их направление совпадает с направлением распространения шельфовых волн. В летнее время направления ветров и шельфовых волн противоположны. Очевидно, что эти обстоятельства способствуют усилению шельфовых волн в зимний период, а в летний ослабляют, и спектральные пики в Горнозаводске и Невельске с периодами около 30 ч совсем исчезают.

Выводы

На основе данных натурных наблюдений за колебаниями уровня моря в прибрежной зоне юго-восточного побережья о. Сахалин проведено изучение длинноволновых движений с периодами более 20 ч. Длительность временных рядов наблюдений составляла от 4 до 6 мес. с дискретностью 1 с.

Построены профили глубин для экваторий пунктов наблюдения и проведена их аппроксимация с экспоненциальной функцией. Установлено, что ширина шельфа при перемещении от Горнозаводска к Ильинскому увеличивается, а крутизна склонов в этом же направлении понижается.

Проведен спектральный анализ временных серий колебаний уровня моря для диапазона периодов от 8 до 200 ч. В графиках спектральных плотностей обнаружены пики на периодах от 26.1 до 46.7 ч, которые значительно превышают инерционный период 16.48 ч для Горнозаводска. На основании этого и с учетом протяженного шельфа западного побережья о. Сахалин сделано предположение, что обнаруженные волновые процессы могут быть отнесены к шельфовым волнам.

Обнаружено, что для периодов около 30 и 40 ч пики энергии в спектральных плотностях колебаний уровня моря связаны с температурным режимом морской воды. Эти особенности позволяют заключить, что генерация длинных волн происходит не постоянно, а только в некоторые продолжительные периоды времени.

С использованием дисперсионного соотношения В.Т. Бухвальда и Дж.К. Адамса для волн континентального шельфа проведено численное моделирование шельфовых волн для экспоненциально выпуклых профилей морского дна и построены дисперсионные диаграммы для всех пунктов наблюдения, которые подтверждают, что обнаруженные волновые процессы с периодами от 31.2 ч до 46.7 ч являются шельфовыми волнами.

Амплитуды шельфовых волн увеличиваются во время штормов, и максимумы этих волн совпадают с максимумами колебаний уровня моря, что говорит о передаче энергии от атмосферных возмущений шельфовым волнам, а они, в свою очередь, вносят вклад в формирование уровня моря. Это подтверждает предположение Б.В. Хамона, который не смог сделать точное заключение из-за короткой длины временных серий в его экспериментах.

На основе проверки соответствия длин реально наблюдаемых шельфовых волн на расстоянии 12.4 км между Невельском и Горнозаводском и определенных по теоретической модели для обнаруженных периодов пиков установлено, что вторая мода наблюдаемой шельфовой волны с частотой 0.152 цикл/ч близка к теоретической.

Аналогичный анализ для регистрируемой в Ильинском и Горнозаводске волны с периодом 26.1 ч показал, что эта волна не может быть шельфовой. С помощью дисперсионной диаграммы, рассчитанной в предположении, что волна с этим периодом является волной Кельвина, получили длину волны около 689 км. И эта длина хорошо согласуется с расстоянием Ильинский – Горнозаводск по разности фаз между этими пунктами, полученной из взаимно-спектрального анализа натуральных данных.

Для шельфовых волн, одним из механизмов генерации которых является напряжение ветра вдоль берега, разница в амплитудах в летнее и зимнее время обусловлена сезонным изменением вдольберегового направления ветра в районе исследований. В зимний период направление ветров совпадает с направлением распространения шельфовых волн, а в летний их направления противоположны, что ослабляет шельфовые волны.

Список литературы

1. Hamon B.V. 1962. The spectrum of mean sea level at Sydney, Coff's Harbour, and Lord Howe Island. *Journal of Geophysical Research*, 67: 5147–5155. <https://doi.org/10.1029/jz067i013p05147>
2. Ефимов В.В., Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Файн И.В. 1985. Волны в пограничных областях океана. Л.: Гидрометеиздат, 280 с.
3. Mysak L.A. 1980. Recent advances in shelf wave dynamics. *Reviews of Geophysics*, 18(1): 211–241. <https://doi.org/10.1029/rg018i001p00211>
4. LeBlond P.H., Mysak L.A. 1981. *Waves in the Ocean*. Amsterdam: Elsevier, 602 p. (Elsevier Oceanography Series; 20).
5. Buchwald V.T., Adams J.K. 1968. The propagation of continental shelf waves. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 305(1481): 235–250.
6. Brink K.H. 1991. Coastal-trapped waves and wind-driven currents over the continental shelf. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23(1): 389–412. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.23.010191.002133>
7. Brunner K., Rivas D., Lwiza K.M.M. 2019. Application of classical coastal trapped wave theory to high-scattering regions. *Journal of Physical Oceanography*, 49(9): 2201–2216. <https://doi.org/10.1175/jpo-d-18-0112.1>
8. Huthnance J. 1975. On trapped waves over a continental shelf. *Journal of Fluid Mechanics*, 69: 689–704. <https://doi.org/10.1017/s0022112075001632>
9. Longuet-Higgins M. 1965. Some dynamical aspects of ocean currents. *Quarterly J. of the Royal Meteorological Society*, 91(390): 425–451. <https://doi.org/10.1002/qj.49709139005>
10. Cartwright D. 1969. Extraordinary tidal currents near St Kilda. *Nature*, 223: 928–932. <https://doi.org/10.1038/223928a0>
11. Cutchin D.L., Smith R.L. 1973. Continental shelf waves: low frequency variations in sea level and currents over Oregon continental shelf. *Journal of Physical Oceanography*, 3(3): 73–82. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1973\)003<0073:cswlfv>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1973)003<0073:cswlfv>2.0.co;2)
12. Рабинович А.Б. 1984. Топографические вихри в районе Курило-Камчатского желоба. *Доклады АН СССР*, 277(4): 976–979.
13. Gill A.E., Schumann E.H. 1974. The generation of long shelf waves by the wind. *Journal of Physical Oceanography*, 4: 83–90. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1974\)004<0083:tgolsw>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1974)004<0083:tgolsw>2.0.co;2)
14. Gill A.E., Clarke A.J. 1974. Wind-induced upwelling, coastal currents and sea-level changes. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 21: 325–345. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(74\)90038-2](https://doi.org/10.1016/0011-7471(74)90038-2)
15. Clarke A.J. 1977. Observational and numerical evidence for wind-forced coastal trapped long waves. *Journal of Physical Oceanography*, 7: 231–247. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1977\)007<0231:OA NEFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1977)007<0231:OA NEFW>2.0.CO;2)

16. Brink K.H. **1982**. The effect of bottom friction on low-frequency coastal trapped waves. *Journal of Physical Oceanography*, 12: 127–133. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1982\)012<0127:TEOBFO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1982)012<0127:TEOBFO>2.0.CO;2)
17. Thomson W. (Lord Kelvin). **1979**. On gravitational oscillations of rotating water. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh. Section A: Mathematical and Physical Sciences*, 10(1880): 92–100. <https://doi.org/10.1017/S0370164600043467>
18. Platzman G.W. **1971**. Ocean tides and related waves. In: *Mathematical problems in the geophysical sciences*, p. 239–291. (Lectures in Applied Mathematics; 14).
19. Некрасов А.В. **1975**. *Приливные волны в окраинных морях*. Л.: Гидрометеиздат, 247 с.
20. Марчук Г.И., Каган Б.А. **1983**. *Динамика океанских приливов*. Л.: Гидрометеиздат, 359 с.
21. Рабинович А.Б. **1993**. *Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение*. Л.: Гидрометеиздат, 240 с.
22. Плеханов Ф.А., Ковалев Д.П. **2016**. Программа комплексной обработки и анализа временных рядов данных уровня моря на основе авторских алгоритмов. *Геоинформатика*, 1: 44–53.
23. Ковалев Д.П. **2018**. *Кута*: патент RU 2018618773. № 2018612587, заявл. 20.03.2018; опубл. 19.07.2018.
24. Parker В.В. **2007**. *Tidal analysis and prediction*. Maryland: Silver Spring, 378 p. (NOAA Special Publication NOS CO-OPS 3). URI: <http://hdl.handle.net/11329/632>; <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-191>
25. Цхай Ж.Р. **2017**. *Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным*: дис. ... канд. геогр. наук. Южно-Сахалинск, 157 с.
26. 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: 104514. doi:10.1016/j.csr.2021.104514
27. Gill A.E. **1982**. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. London: Academic Press, 662 p. (International Geophysics Series; 30).
28. Drivdal M., Weber J.E.H., Debernard J.B. **2016**. Dispersion relation for continental shelf waves when the shallow shelf part has an arbitrary width: application to the shelf west of Norway. *Journal of Physical Oceanography*, 46(2): 537–549. doi:10.1175/JPO-D-15-0023.1
29. Darelius E., Smedsrud L.H., Osterhus S., Foldvik A., Gammelsrod T. **2009**. Structure and variability of the Filchner overflow plume. *Tellus*, 61A: 446–464. doi:10.1111/j.1600-0870.2009.00391.x
30. Hamon B.V. **1966**. Continental shelf waves and the effects of atmospheric pressure and wind stress on sea level. *Journal of Geophysical Research*, 71(12): 2883–2893. doi:10.1029/JZ071i012p02883
31. Caldwell D.R., Cutchin D.L., Longuet-Higgins M.S. **1972**. Some model experiments on continental shelf waves. *Journal of Marine Research*, 30: 39–55.
32. Munk W., Snodgrass F., Wimbush M. **1970**. Tides offshore: Transition from California coastal to deep-sea waters. *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*, 1(1-2): 161–235.
33. Robinson A. R. **1964**. Continental shelf waves and the response of the sea level to weather systems. *Journal of Geophysical Research*, 69: 367–368.
34. Ковалев П.Д., Ковалев Д.П., Шевченко Г.В. **2015**. *Возобновляемые энергетические ресурсы Сахалинской области*. Владивосток: Дальнаука, 216 с.

References

- Hamon B.V. **1962**. The spectrum of mean sea level at Sydney, Coff's Harbour, and Lord Howe Island. *Journal of Geophysical Research*, 67: 5147–5155. <https://doi.org/10.1029/jz067i013p05147>
- Efimov V.V., Kulikov E.A., Rabinovich A.B., Fine I.V. **1985**. [Waves in the boundary regions of the ocean]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 280 p. (In Russ.).
- Mysak L.A. **1980**. Recent advances in shelf wave dynamics. *Reviews of Geophysics*, 18(1): 211–241. <https://doi.org/10.1029/rg018i001p00211>
- LeBlond P.H., Mysak L.A. **1981**. *Waves in the Ocean*. Amsterdam: Elsevier, 602 p. (Elsevier Oceanography Series; 20).
- Buchwald V.T., Adams J.K. **1968**. The propagation of continental shelf waves. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 305(1481): 235–250.
- Brink K.H. **1991**. Coastal-trapped waves and wind-driven currents over the continental shelf. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23(1): 389–412. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.23.010191.002133>
- Brunner K., Rivas D., Lwiza K.M.M. **2019**. Application of classical coastal trapped wave theory to high-scattering regions. *Journal of Physical Oceanography*, 49(9): 2201–2216. <https://doi.org/10.1175/jpo-d-18-0112.1>
- Huthnance J. **1975**. On trapped waves over a continental shelf. *Journal of Fluid Mechanics*, 69: 689–704. <https://doi.org/10.1017/s0022112075001632>
- Longuet-Higgins M. **1965**. Some dynamical aspects of ocean currents. *Quarterly J. of the Royal Meteorological Society*, 91(390): 425–451. <https://doi.org/10.1002/qj.49709139005>
- Cartwright D. **1969**. Extraordinary tidal currents near St Kilda. *Nature*, 223: 928–932. <https://doi.org/10.1038/223928a0>
- Cutchin D.L., Smith R.L. **1973**. Continental shelf waves: low frequency variations in sea level and currents over Oregon continental shelf. *Journal of Physical Oceanography*, 3(3): 73–82. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1973\)003<0073:cswlfv>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1973)003<0073:cswlfv>2.0.co;2)
- Rabinovich A.B. **1984**. [Topographic vortices in the area of the Kuril-Kamchatka trench]. *Dokl. USSR Academy of Sciences*, 277(4): 976–979. (In Russ.).
- Gill A.E., Schumann E.H. **1974**. The generation of long shelf waves by the wind. *Journal of Physical Oceanography*, 4: 83–90. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1974\)004<0083:tgolsw>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1974)004<0083:tgolsw>2.0.co;2)

14. Gill A.E., Clarke A.J. **1974**. Wind-induced upwelling, coastal currents and sea-level changes. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 21: 325–345. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(74\)90038-2](https://doi.org/10.1016/0011-7471(74)90038-2)
15. Clarke A.J. **1977**. Observational and numerical evidence for wind-forced coastal trapped long waves. *Journal of Physical Oceanography*, 7: 231–247. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1977\)007<0231:OANEFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1977)007<0231:OANEFW>2.0.CO;2)
16. Brink K.H. **1982**. The effect of bottom friction on low-frequency coastal trapped waves. *Journal of Physical Oceanography*, 12: 127–133. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1982\)012<0127:TEOBFO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1982)012<0127:TEOBFO>2.0.CO;2)
17. Thomson W. (Lord Kelvin). **1979**. On gravitational oscillations of rotating water. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh. Section A: Mathematical and Physical Sciences*, 10(1880): 92–100. <https://doi.org/10.1017/S0370164600043467>
18. Platzman G.W. **1971**. Ocean tides and related waves. In: *Mathematical problems in the geophysical sciences*, p. 239–291. (Lectures in Applied Mathematics; 14).
19. Nekrasov A.V. **1975**. [*Tidal waves in marginal seas*]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 247 p. (In Russ.).
20. Marchuk G.I., Kagan B.A. **1983**. [*Dynamics of ocean tides*]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 359 p. (In Russ.).
21. Rabinovich A.B. **1993**. *Long gravitational waves in the ocean: capture, resonance, radiation*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 325 p. (In Russ.).
22. Plekhanov Ph.A., Kovalev D.P. **2016**. The complex program of processing and analysis of time-series data of sea level on the basis of author's algorithms. *Geoinformatika*, 1: 44–53. (In Russ.). EDN: VQZVLF
23. Kovalev D.P. **2018**. *Кума*: patent RU 2018618773, no. 2018612587, application 20.03.2018; publ. 19.07.2018. (In Russ.).
24. Parker B.B. **2007**. *Tidal analysis and prediction*. Maryland: Silver Spring, 378 p. (NOAA Special Publication NOS CO-OPS 3). URI: <http://hdl.handle.net/11329/632>; <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-191>
25. Tskhai J.R. **2017**. [*Spatial and temporal variability of chlorophyll-a concentration in the surface layer of the Sea of Okhotsk and adjacent water areas according to satellite data*]: Thesis for a Cand. Degree (Geogr.). Yuzhno-Sakhalinsk, 157 p. (In Russ.).
26. 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: 104514. doi:10.1016/j.csr.2021.104514
27. Gill A.E. **1982**. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. London: Academic Press, 662 p. (International Geophysics Series; 30).
28. Drivdal M., Weber J.E.H., Debernard J.B. **2016**. Dispersion relation for continental shelf waves when the shallow shelf part has an arbitrary width: application to the shelf west of Norway. *Journal of Physical Oceanography*, 46(2): 537–549. doi:10.1175/JPO-D-15-0023.1
29. Darelus E., Smedsrud L.H., Osterhus S., Foldvik A., Gammelsrod T. **2009**. Structure and variability of the Filchner overflow plume. *Tellus*, 61A: 446–464. doi:10.1111/j.1600-0870.2009.00391.x
30. Hamon B.V. **1966**. Continental shelf waves and the effects of atmospheric pressure and wind stress on sea level. *Journal of Geophysical Research*, 71(12): 2883–2893. doi:10.1029/JZ071i012p02883
31. Caldwell D.R., Cutchin D.L., Longuet-Higgins M.S. **1972**. Some model experiments on continental shelf waves. *Journal of Marine Research*, 30: 39–55.
32. Munk W., Snodgrass F., Wimbush M. **1970**. Tides offshore: Transition from California coastal to deep-sea waters. *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*, 1(1-2): 161–235.
33. Robinson A. R. **1964**. Continental shelf waves and the response of the sea level to weather systems. *Journal of Geophysical Research*, 69: 367–368.
34. Kovalev P.D., Kovalev D.P., Shevchenko G.V. **2015**. [*Renewable energy resources of the Sakhalin region*]. Vladivostok: Dalnauka, 216 p. (In Russ.).

Об авторах

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

Ковалев Дмитрий Петрович (<https://orcid.org/0000-0002-5184-2350>), 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

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 16.02.2023

Принята к публикации 15.05.2023

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:

Kovalev, Dmitry P. (<https://orcid.org/0000-0002-5184-2350>), 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

Zarochintsev, Vitalij 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 16 February 2023

Accepted 15 May 2023

© Авторы 2023 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2023. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.34.016; 550.34.035

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.175-179>
<https://www.elibrary.ru/jbujuu>

Оптическая система регистрации прогиба образца в испытаниях на изгиб

М. А. Мищенко*, И. А. Ларионов, В. А. Васькин

*E-mail: micle@ikir.ru

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
Камчатский край, с. Паратунка, Россия

Резюме. При проведении работ по трехточечному изгибу и разрушению образца различных геоматериалов используются специальные средства регистрации его прогиба. Для решения данной задачи авторами на базе доступного оптического сенсора создана бесконтактная система регистрации. Тестирование системы проведено в экспериментах по изгибу различных материалов. Полученная система регистрации обладает достаточной чувствительностью и является недорогим аналогом подобных систем на рынке.

Ключевые слова: система регистрации, оптический сенсор, изгиб образца

Optical system for recording specimen deflection in bending tests

Mikhail A. Mishchenko*, Igor A. Larionov, Vasily A. Vas'kin

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

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

Abstract. Special systems for recording deflections are used, when carrying out the works on three-point bending and destruction of specimens made of different geomaterials. The authors developed an off-contact recording system based on an available optical sensor in order to resolve this problem. The system was tested during the bending tests of various materials. The obtained system is sensitive enough and is an inexpensive analogue of such systems in the market.

Keywords: recording system, optical sensor, specimen deflection

Для цитирования: Мищенко М.А., Ларионов И.А., Васькин В.А. Оптическая система регистрации прогиба образца в испытаниях на изгиб. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 2, с. 175–179. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.175-179>; <https://www.elibrary.ru/jbujuu>

For citation: Mishchenko M.A., Larionov I.A., Vas'kin V.A. Optical system for recording specimen deflection in bending tests. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 2, pp. 175–179. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.175-179>; <https://www.elibrary.ru/jbujuu>

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (№ АААА-А21-121011290003-0).

Acknowledgements

The work was carried out within the framework of realization of the State Task of the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, FEB RAS (No. АААА-А21-121011290003-0).

Введение. На сегодняшний день изучение процесса деформации приповерхностных пород и его следствий на разных стадиях подготовки землетрясений в рамках исследования сейсмотектонического процесса актуально не только в региональном, но и глобальном мас-

штабе. Результаты многолетних исследований различных геофизических полей в условиях постоянно протекающего сейсмотектонического процесса [1, 2] указывают на необходимость проведения лабораторных экспериментов по изучению различных свойств горных

пород при деформировании их образцов [3, 4], что требует серьезной оснащённости точными современными средствами измерения физических величин. Испытания образцов на изгиб являются одними из наиболее часто проводимых на практике. Для измерения прогиба образца в процессе испытаний применяются современные бесконтактные экстензометры, которые при широких функциональных возможностях имеют внушительную стоимость. Авторы предлагают бесконтактную систему регистрации прогиба образца, реализованную на базе доступного оптического сенсора.

Принцип работы оптического сенсора.

В целом конструкция блока оптического сенсора ADNS-2610 (рис. 1) помимо микросхемы сенсора включает еще несколько базовых элементов. Это держатель, в который устанавливается светодиод, и непосредственно сама микросхема сенсора. Эта система элементов крепится на печатную плату, между ней и нижней поверхностью крепится пластиковый элемент, содержащий две линзы.

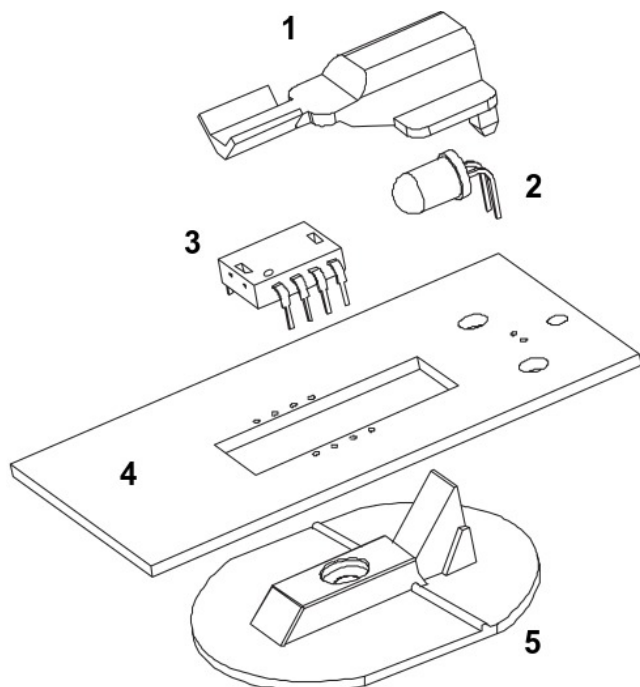


Рис. 1. Базовые элементы оптической схемы сенсора в сборе: 1 – держатель, 2 – светодиод, 3 – оптический сенсор ADNS-2610, 4 – печатная плата, 5 – система линз.

Fig. 1. Basic elements of the assembled sensor optical circuit: 1 – holder, 2 – light emitting diode, 3 – ADNS-2610 optical sensor, 4 – printed circuit board, 5 – lens system.

С помощью светодиода и системы фокусирующих его свет линз под сенсором подсвечивается участок поверхности. Отраженный от этой поверхности свет собирается другой линзой и попадает на оптический сенсор (рис. 2). Микросхема ADNS-2610 в своем составе имеет подсистему получения изображения и интегрированный процессор обработки снимков. Изображение рабочей поверхности сканируется, а затем на основе анализа последовательных снимков, представляющих собой квадратную матрицу пикселей разной яркости, интегрированный процессор вычисляет смещение сенсора вдоль осей X и Y.

Размер матрицы оптического сенсора составляет 18×18 пикселей. Для первичной оценки размера области сканируемой поверхности использовалась прозрачная дифракционная решетка с периодом 0.2 мм. Изображение, полученное с оптического сенсора, охватывает 4.5 периода, что соответствует 0.9 мм. Таким образом, сохраняемое квадратное изображение имеет рабочую поверхность размером $\sim 0.9 \times 0.9$ мм². А значит, линейное смещение сенсора на 1 пиксель соответствует сдвигу на ~ 0.05 мм.

В состав оптической системы регистрации входят: блок оптического сенсора в сборе (ADNS-2610 – оптический сенсор, который выполнен в корпусе DIP-8 и применяется в комплекте со светодиодным источником под-

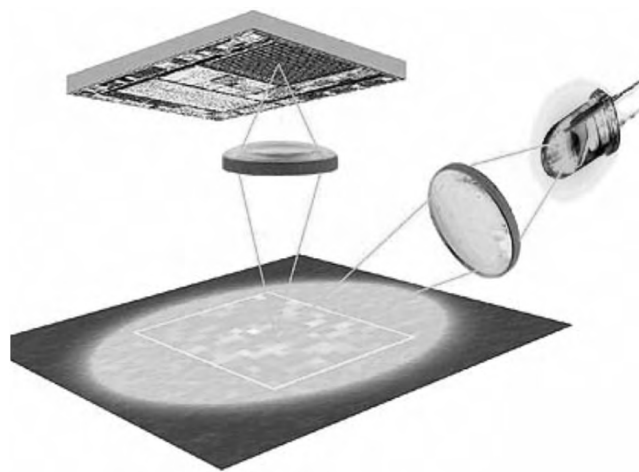


Рис. 2. Схема подсветки рабочей поверхности и проецирование ее изображения на оптический сенсор.

Fig. 2. Scheme of work surface additional illumination and work surface projection on the optical sensor.

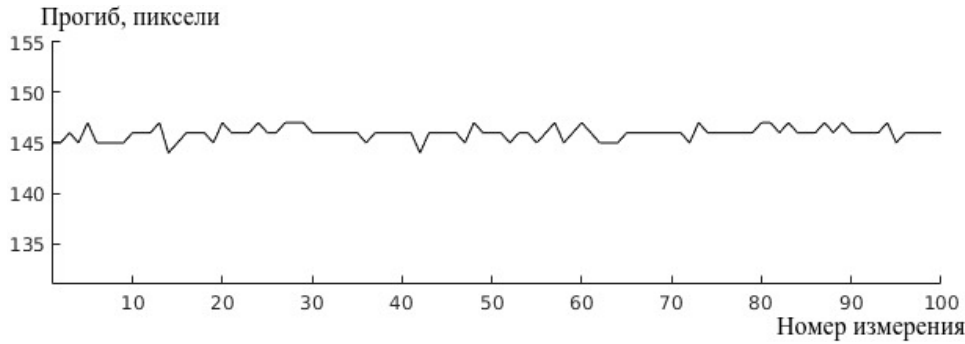


Рис. 3. Результаты калибровки оптической системы регистрации. По оси абсцисс – номер измерения, по оси ординат – величина смещения в пикселях.

Fig. 3. Results of optical recording system calibration. Measurement number is along the X-axis, displacement magnitude in pixels is along the Y-axis.

светки HLMP-ED80, держателем светодиода HDNS-2200 и линзой HDNS-2100); микроконтроллер с прошивкой; компьютер с программой сбора данных.

Методика калибровки системы. Калибровка оптической системы регистрации проводилась при помощи концевой меры длиной 8 мм из набора № 3 концевых мер класса точности 2. Была проведена серия из 100 измерений, результаты приведены на рис. 3.

Суммарная погрешность измерений вычисляется по формуле

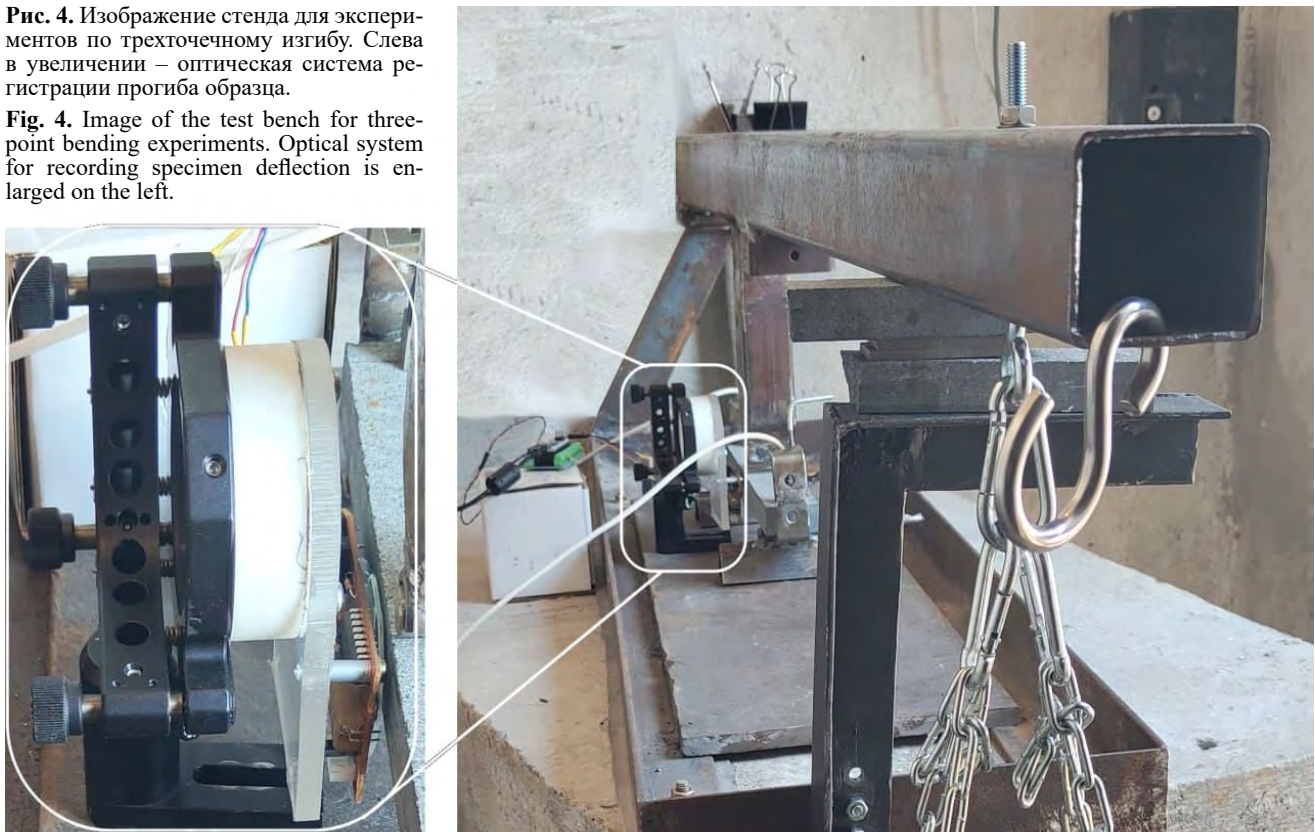
$$\Delta_{\Sigma}x = \sqrt{\delta x^2 + \Delta x^2}, \quad (1)$$

где δx – систематическая погрешность, а Δx – случайная погрешность.

Согласно ГОСТ 9038-90*, систематическая погрешность δx соответствует допуску отклонению длины концевой меры от номинального значения, она равна 0.4 мкм.

Рис. 4. Изображение станда для экспериментов по трехточечному изгибу. Слева в увеличении – оптическая система регистрации прогиба образца.

Fig. 4. Image of the test bench for three-point bending experiments. Optical system for recording specimen deflection is enlarged on the left.



*ГОСТ 9038-90. Меры длины концевые плоскопараллельные. Технические условия: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 25.01.91 № 86; дата введения 1991-07-01 [GOST 9038-90. Gauge blocks. Specifications: approved and put into operation by the Decree no. 86 of the USSR State Committee for Product Quality Management and Standards dated 25.01.91; date of introduction 1991-07-01]. URL: <https://meganorm.ru/Data/283/28341.pdf>

Расчет случайной погрешности измерений проводится по формуле

$$\Delta x = \pm t_{\alpha,n} * S_{\bar{x}}, \quad (2)$$

где $t_{\alpha,n}$ – коэффициент Стьюдента, α – доверительная вероятность, n – число измерений, $S_{\bar{x}}$ – средняя квадратическая ошибка среднего арифметического (3):

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}, \quad (3)$$

где x_i – результат i -го измерения, \bar{x} – среднее арифметическое измерений.

Результаты расчета суммарной погрешности серии измерений смещения следующие:

Доверительная вероятность α	0.68	0.95	0.99
Суммарная погрешность измерений $\Delta_{\Sigma}x$, мм	± 0.0036595	± 0.0072326	± 0.0095671

Тестирование системы. Тестирование системы регистрации проводилось на стенде, разработанном для экспериментов по трехточечному изгибу образцов горных пород и искусственных материалов. Изображение стенда и его упрощенная схема представлены на рисунках 4 и 5 соответственно. Оптическая система установлена на основании стенда с помощью держателя, применяемого в оптических схемах, с возможностью двухосевого регулирования.

Тестовые эксперименты на трехточечный изгиб проводились в первом случае на образце строительного керамогранита с размерами $8 \times 40 \times 250$ мм, а во втором – на образце природного гранита с размерами $20 \times 40 \times 250$ мм. Результаты регистрации прогиба образца в обоих экспериментах представлены на рисунках 6 а и 6 б соответственно.

В первом эксперименте – с изгибом образца керамогранита – нагрузка линейно увеличивалась на протяжении приблизительно 1 ч. При достижении критического прогиба (0.548 ± 0.01 мм) произошел слом образца (рис. 6 а).

Во втором эксперименте – с изгибом образца природного гранита – нагрузка изменялась ступенчато: периоды линейного увеличения (длительностью приблизительно 1.5 ч) сменялись периодами отстаивания (величина нагрузки оставалась постоянной в течение нескольких часов). Как видно на графике

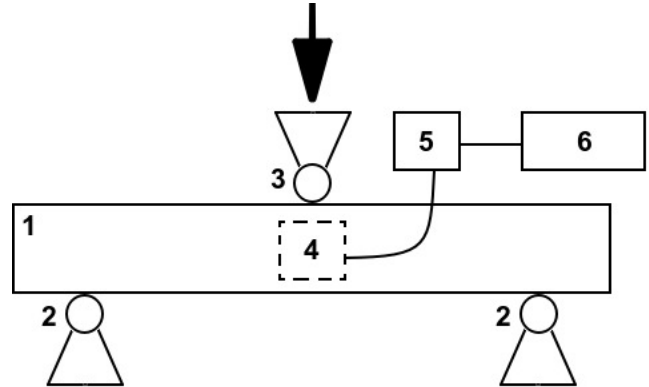


Рис. 5. Упрощенная схема стенда для проведения эксперимента на трехточечный изгиб. 1 – образец, 2 – точки опоры, 3 – точка приложения нагрузки, 4 – место установки блока оптического сенсора, 5 – микроконтроллер, 6 – компьютер.

Fig. 5. Simplified scheme of the test bench for three-point bending experiments. 1 – specimen, 2 – support points, 3 – load application point, 4 – position of the optical sensor block, 5 – microcontroller, 6 – PC.

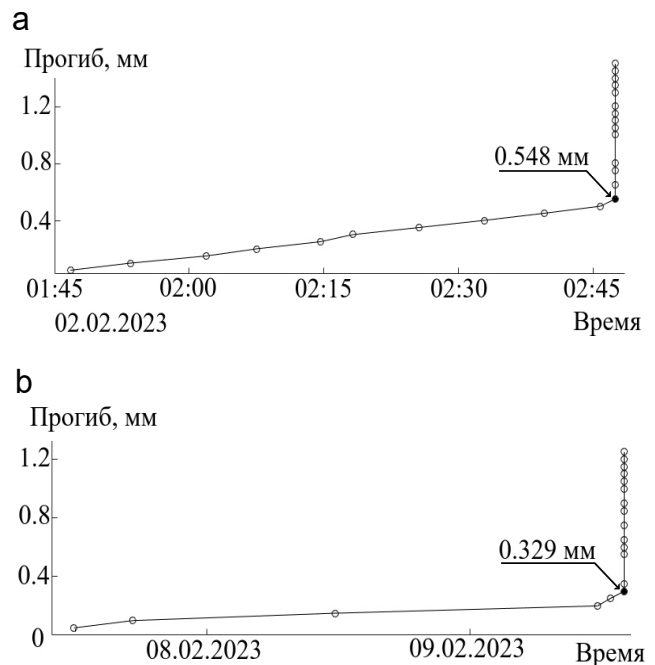


Рис. 6. Графики изменения прогиба образца строительного керамогранита (а) и природного гранита (б) в экспериментах по его трехточечному изгибу.

Fig. 6. Graphs of deflection change of construction ceramic granite (a) and of natural granite (b) specimen during the experiments on its three-point bending.

рис. 6 б, при достижении критического прогиба (0.329 ± 0.01 мм) произошел слом образца. Максимальная величина прогиба, полученная в нашем эксперименте с изгибом образца природного гранита, немного больше его величины в работе [4]. Это можно объяснить большей длиной образца в нашем случае.

Заключение. Представленная система показала достаточную чувствительность для измерения прогиба образцов разных материалов в экспериментах по трехточечному изгибу. Значения регистрируемого прогиба образцов сопоставимы с результатами в аналогичных экспериментах других авторов. В перспективе возможно увеличение чувствительности системы при использовании оптического сенсора большего разрешения. Представленную систему планируется использовать в лабораторных экспериментах при моделировании процессов деформирования приповерхностных пород перед землетрясением.

Список литературы

1. Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М., Ларионов И.А., Мищенко М.А., Щербина А.О., Солодчук А.А. **2012**. Отклик геоакустической эмиссии на активизацию деформационных процессов при подготовке землетрясений. *Тихоокеанская геология*, 31(6): 59–67. EDN: PVYCVV
2. Руленко О.П., Марапулец Ю.В., Кузьмин Ю.Д., Солодчук А.А. **2016**. Совместное возмущение геоакустического, эманационного и атмосферного электрического полей у границы земная кора – атмосфера перед землетрясением. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 3(14): 72–78. EDN: XBARKD

Об авторах

Сотрудники лаборатории акустических исследований, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, с. Паратунка:

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

Ларионов Игорь Александрович (<https://orcid.org/0000-0002-9369-7497>), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, igor@ikir.ru

Васькин Василий Александрович (<https://orcid.org/0009-0005-9032-6059>), ведущий инженер, vaskin@ikir.ru

Поступила 19.04.2023

Принята к публикации 10.05.2023

3. Мубассарова В.А., Богомолов Л.М., Закупин А.С., Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. **2014**. Особенности локализации деформации и распределения очагов акустической эмиссии в образцах горных пород под воздействием одноосного сжатия и электрических импульсов. *Геодинамика и тектонофизика*, 5(4): 919–938. doi:10.5800/GT-2014-5-4-0163; EDN: TDMROT
4. Пантелеев И.А. **2020**. Анализ тензора сейсмического момента акустической эмиссии: микромеханизмы разрушения гранита при трехточечном изгибе. *Акустический журнал*, 66(6): 654–668. DOI: 10.31857/S0320791920060076; EDN: TZZPPC

References

1. Marapulets Y.V., Shevtsov B.M., Larionov I.A., Mishchenko M.A., Shcherbina A.O., Solodchuk A.A. **2012**. Geoacoustic emission response to deformation processes activation during earthquake preparation. *Russian J. of Pacific Geology*, 6(6): 457–464. <https://doi.org/10.1134/s1819714012060048>
2. Rulenko O.P., Marapulets Yu.V., Kuzmin Yu.D., Solodchuk A.A. **2016**. Joint perturbation of geoacoustic, emanation and atmospheric electric fields at the boundary of the earth's crust and the atmosphere before the earthquake. *Vestnik KRAUNTs. Fiziko-matematicheskie nauki = Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*, 3(14): 72–78. (In Russ.). EDN: XBARKD
3. Mubassarova V.A., Bogomolov L.M., Zakupin A.S., Panteleev I.A., Naimark O.B. **2014**. Strain localization peculiarities and distribution of acoustic emission sources in rock samples tested by uniaxial compression and exposed to electric pulses. *Geodynamics & Tectonophysics*, 5(4): 919–938. (In Russ.). doi:10.5800/GT-2014-5-4-0163
4. Panteleev I.A. **2020**. Analysis of the seismic moment tensor of acoustic emission: granite fracture micro-mechanisms during three-point bending. *Acoustical Physics*, 66(6): 653–665. <https://doi.org/10.1134/s106377102006007x>

About the Authors

Employees of the Laboratory of acoustic research, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation of FEB RAS, Kamchatkskiy kray, Paratunka:

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

Larionov, Igor A. (<https://orcid.org/0000-0002-9369-7497>), Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, igor@ikir.ru

Vas'kin, Vasily A. (<https://orcid.org/0009-0005-9032-6059>), Leading Engineer, vaskin@ikir.ru

Received 19 April 2023

Accepted 10 May 2023

© Авторы 2023 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2023. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 531.39

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.180-195>
<https://www.elibrary.ru/lpplx>

Исследование по динамике рамных конструкций

П. Г. Великанов^{*1,2}, Ю. П. Артюхин²

*E-mail: pvelikanov@mail.ru

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Резюме. Определение собственных и вынужденных колебаний рамных конструкций, моделируемых стержнями с распределенными массами (бесконечное число степеней свободы), довольно затруднительно. Поэтому в статье модель рамы наделяют конечным числом степеней свободы: массу помещают в некоторое число узлов, которые упруго взаимодействуют со стержнями, не имеющими массы. Стержни работают только на изгиб. Продольные перемещения не учитываются, так как частота продольных колебаний на два порядка выше частоты изгибных колебаний. Такая модель приводит к составлению выражений кинетической и потенциальной энергии, позволяющих затем с помощью уравнений Лагранжа 2-го рода получить систему дифференциальных уравнений колебаний сооружения. В статье с использованием функций Грина, матриц жесткости, масс, податливости и др. была решена задача о свободных колебаниях Г-образной рамы. Полученные приближенные результаты при сравнении с малоизвестными точными результатами показали хорошую сходимость, особенно при увеличении числа степеней свободы (количества сосредоточенных масс, моделирующих распределенную массу стержней Г-образной рамы).

Ключевые слова: колебания рам, частоты колебаний, функция Грина, матрица жесткости, матрица масс, матрица податливости

Research on the dynamics of frame structures

Peter G. Velikanov^{*1,2}, Yury P. Artyukhin²

*E-mail: pvelikanov@mail.ru

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

² Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

Abstract. Determining the natural and forced oscillations of frame structures simulated by the rods with distributed masses (an infinite number of degrees of freedom) is quite difficult. Therefore, in the article, the frame model is endowed with a finite number of degrees of freedom: the mass is placed in a certain number of nodes that elastically interact with rods that have no mass. The rods work only for bending. Longitudinal displacements are not taken into account, since the frequency of longitudinal oscillations is two orders of magnitude higher than the frequency of bending ones. Such a model leads to the construction of expressions of the kinetic and potential energy, which then allows using the Lagrange equations of second kind to obtain a system of differential oscillation equations of the structure. The problem of free oscillations of the G-shaped frame was solved in the article using Green's functions, matrices of stiffness, masses, malleability, etc. The obtained approximate results were compared with little-known exact results and demonstrated good convergence, especially with an increase in the number of degrees of freedom (the number of concentrated masses simulating the distributed mass of the rods of the G-shaped frame).

Keywords: oscillations of frames, oscillation frequencies, Green's function, stiffness matrix, mass matrix, malleability matrix

Для цитирования: Великанов П.Г., Артюхин Ю.П. Исследование по динамике рамных конструкций. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 2, с. 180–195. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.180-195>; <https://www.elibrary.ru/lpplx>

For citation: Velikanov P.G., Artyukhin Yu.P. Research on the dynamics of frame structures. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 2, pp. 180–195. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.180-195>; <https://www.elibrary.ru/lpplx>

Введение

Колебательные и волновые процессы в технике играют двоякую роль: с одной стороны, например, колебания валов двигателей, вибрации корпусов, мостовых сооружений и т.д. при неблагоприятных условиях могут вызвать опасные напряжения, деформации и износ, с другой – колебания, например, используют для осуществления эффективных технологических процессов (вибрационное погружение свай, виброзапрессовка деталей, виброуплотнители грунта, вибрационное транспортирование грузов, вибрационные тепло- и массообменные аппараты и т.д.) [1–7].

Анализ колебательных и волновых процессов показал, что между колебаниями разной физической природы чрезвычайно много общего. Конкретные колебательные и волновые процессы, с которыми приходится иметь дело специалистам в технике, различны, однако колебательные и волновые явления, в них происходящие, подчиняются общим закономерностям и описываются едиными моделями.

В технике мы редко встречаемся со свободными колебаниями: вибрация машин вызывается, как правило, каким-либо источником энергии. Между тем поведение системы при свободных колебаниях – это характеристика ее собственных свойств, недаром частота свободных колебаний называется собственной частотой системы. Частота собственных колебаний является важнейшей динамической характеристикой сооружений, поскольку ее величина значительно влияет на расчетные значения нагрузок. Ошибки, допущенные на стадии вычисления частоты собственных колебаний, приводят к неправильному определению напряженно-деформированного состояния несущих конструкций. Помимо этого, неверное определение собственной частоты колебаний может привести к возникновению не спрогнозированных резонансных явлений, которые являются достаточно опасными. В свете вышесказанного исследование в статье свободных колебаний рамных конструкций представляется актуальным.

Аналитическое (точное) решение поставленной задачи может быть получено, если: область однородная, геометрия проста (регулярна), граничные условия на контуре сравнительно просты, определяющие дифференциальные уравнения линейны. В противном случае могут быть использованы численные методы для нахождения численного решения. Численные методы отчетливо делятся на два класса: класс, требующий аппроксимации во всей области (метод конечных разностей, метод конечных элементов (МКЭ)), и класс, требующий аппроксимации только на границе области (метод граничных элементов).

МКЭ (в зависимости от приложений и взглядов исследователя может быть интерпретирован как метод возможной работы, вариационно-разностный метод, метод взвешенных невязок (метод Бубнова–Галеркина)) дает решение, которое всегда несколько отличается от точного решения. Величина ошибки зависит от многих факторов самой разнообразной природы, среди которых важнейшие: 1) размеры и число узлов отдельных конечных элементов; 2) аппроксимирующие функции внутри отдельных конечных элементов; 3) особенности вычисления матрицы жесткости; 4) алгоритм решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ); 5) качество программ; 6) тип используемой ЭВМ.

Практика использования МКЭ показывает, что следует обратить особое внимание на второй из вышеперечисленных пунктов. Неудачный выбор аппроксимирующих функций приводит к очень медленной сходимости, что в свою очередь приводит к необходимости мелкого дробления тела на конечные элементы и, как следствие, к неоправданным вычислительным расходам на решение задач. Более того, иногда наблюдается сходимость не к точному, а к некоторому другому решению, что недопустимо (поэтому в МКЭ необходимо внимательно следить за тем, чтобы при конечноэлементной дискретизации выполнялись условия совместности (согласованности, конформности), совместности, необходимой степени параметризации и др.).

В процессе реализации численных методов и созданных на их основе алгоритмов расчета сложных структур постепенно пришло понимание того обстоятельства, что не существует ни одного метода, обладающего бесспорными преимуществами при решении бесконечного разнообразия технических проблем. Это заставило обратить внимание на альтернативные варианты «гибридизации» различных методов в целях использования их преимуществ и компенсации слабых сторон.

Представление исследуемой области совокупностью подобластей (как, например, в МКЭ) имеет смысл дискретизации континуальной задачи с заменой реальной области тела с бесконечным числом степеней свободы приближенно эквивалентным телом с большим, но конечным числом степеней свободы.

Исследование в статье свободных колебаний рамных конструкций было реализовано с помощью сравнения аналитического (точного) решения с численными решениями: МКЭ, реализованного в Ansys (узлы конечных элементов рамных конструкций размещены на их границах), и его модернизации («гибридизации») (массу конечных элементов помещают в их середине и называют узлами, которые

упруго взаимодействуют со стержнями рамы, не имеющими массы).

В настоящее время считается классическим получение элементов матрицы податливости (коэффициентов влияния) с помощью следующей методики: к каждой из масс, на которые действуют внешние силы, прикладывают единичную силу и отдельно для каждой единичной силы строят эпюру изгибающих моментов; затем по правилу Верещагина (перемножением площадей этих эпюр на координаты под центрами их тяжести) или Симпсона находят искомые элементы матрицы. В предложенной статье искомые элементы матрицы податливости определяются через функцию Грина, что сокращает предварительные вычисления [1, 8–11].

Как будет показано, результаты обоих численных методов (МКЭ и его модернизации – «гибридизации») для одинакового числа конечных элементов практически идентичны (и хорошо согласуются с аналитическим (точным) решением), в то время как размерности СЛАУ существенно различаются (так как число степеней свободы в МКЭ всегда значительно больше числа степеней свободы в его модернизации).

1. Постановка и решение задач

Допустим, что механическая система имеет n степеней свободы и ее кинетическая (T) и потенциальная (Π) энергии имеют вид квадратичных функций:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij} \dot{x}_i \dot{x}_j; \quad \Pi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} x_i x_j, \quad (1.1)$$

где x_i, \dot{x}_i – поперечные перемещения и скорости перемещений сосредоточенных масс сооружений; m_{ij}, k_{ij} – компоненты матрицы масс $[M]$ и матрицы жесткости $[K]$ соответственно.

Если при движении система рассеивает энергию, то к соотношениям (1.1) следует добавить квадратичную функцию рассеивания энергии Релея:

$$Rel = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij} \dot{x}_i \dot{x}_j, \quad (1.2)$$

где r_{ij} – компоненты матрицы рассеивания $[R]$.

Введем вектор-строку $(x) = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и вектор-столбец $\{x\}$ такой, что $\{x\}^T = (x)$. Тогда квадратичные функции (1.1), (1.2) можно представить в матричной форме

$$2T = ([M]\{\dot{x}\})\{\dot{x}\} = (\dot{x})\{[M]^T\{\dot{x}\}\}; 2\Pi = ([K]\{x\})\{x\}; 2Rel = ([R]\{\dot{x}\})\{\dot{x}\}. \quad (1.3)$$

Используя уравнения Лагранжа 2-го рода $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial\{\dot{x}\}}\right) - \left(\frac{\partial T}{\partial\{x\}}\right) = \{P\} - \left(\frac{\partial\Pi}{\partial\{x\}}\right) - \left(\frac{\partial Rel}{\partial\{\dot{x}\}}\right)$

и соотношения (1.3), запишем дифференциальные уравнения колебаний системы в матричной форме, используя дифференцирование квадратичных форм по вектору-столбцу [11]:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [R]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{P\}, \quad (1.4)$$

где $\{P\} = (P_1, P_2, \dots, P_n)^T$ – вектор-столбец внешних нагрузок, приложенных к массам.

1.1 Задача о собственных значениях

Если рассматривать свободные колебания без учета рассеивания энергии, уравнение (1.4) примет вид

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0. \quad (1.5)$$

Предполагая, что матрицы масс $[M]$ и жесткости $[K]$ не зависят от времени t , будем искать частное решение уравнения (1.5) в виде $\{x\} = \{B\}e^{i\omega t}$, причем $\{B\} = (B_1, B_2, \dots, B_n)^T$ – произвольный вектор-столбец. Тогда задача сводится к решению системы однородных уравнений относительно амплитуд B_k :

$$([K_1] - \lambda[M_1])\{B\} = 0; \lambda = \frac{\omega^2 l^3 m}{d}; [M] = m[M_1]; [K] = \frac{d}{l^3}[K_1], \quad (1.6)$$

где $[M_1], [K_1]$ – безразмерные матрицы масс и жесткости соответственно; ω – частота колебаний; l – длина произвольного элемента; d – изгибная жесткость произвольного элемента; m – стандартная сосредоточенная масса, приложенная в середине элемента.

1.2 Прямой подход к определению собственных колебаний

Если безразмерная матрица масс представляет собой единичную матрицу $[M_1] = [E]$, то приходим к стандартной процедуре определения собственных значений λ и собственных векторов (амплитуд) $\{B\}$ для матрицы жесткости $[K]$ из решения однородной системы уравнений

$$(k_{ij} - \lambda\delta_i^j)B_j = 0; (i, j = \overline{1, n}), \quad (1.7)$$

где δ_i^j – символ Кронекера.

Так как $B_j \neq 0$, то решение системы (1.7) возможно при условии равенства нулю характеристического уравнения, полученного из определителя

$$|[K] - \lambda[E]| = 0. \quad (1.8)$$

Если $[M_1] \neq [E]$, то преобразуем уравнение (1.5) к виду

$$[E]\{\ddot{x}\} + [M]^{-1}[K]\{x\} = 0$$

и будем искать собственные значения матрицы $[M]^{-1}[K]$.

Частота свободных колебаний найдется по формуле

$$\omega = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{\lambda d}{lm}}, \quad (1.9)$$

где $d = EI$; E – модуль упругости Юнга (модуль упругости первого рода), а I – осевой момент инерции поперечного сечения.

Определитель (1.8) относительно λ дает полином n -го порядка. Корни этого полинома будут вещественными, так как матрица жесткости является симметричной. Пусть все эти корни простые и различные $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$. Тогда, подставляя значение одного из корней в (1.7), можно определить с точностью до одной произвольной постоянной вектор-столбец $\{Q^i\} = \{B\}|_{\lambda=\lambda_i}$ который удовлетворяет матричному соотношению $[K]\{Q^i\} = \lambda_i\{Q^i\}; (i = \overline{1, n})$.

Иногда удобнее собственные векторы $\{Q^i\}$ нормировать, т.е. сделать по модулю равными единице.

Введем матрицу $[Q] = [\{Q^1\}, \{Q^2\}, \dots, \{Q^n\}]$, состоящую из собственных векторов-столбцов матрицы жесткости (в теории колебаний ее называют модальной матрицей). Тогда предыдущее соотношение можно записать для всего набора собственных чисел λ :

$$[K][Q] = [Q][J], \quad (1.10)$$

$$\text{где } [J] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_k & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{k+1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_n \end{bmatrix}.$$

Матрица $[J]$ называется жордановой матрицей (в теории колебаний – спектральная матрица) и представляет собой диагональную матрицу с расположением по главной диагонали собственных значений и нулями вне диагонали. Из (1.10) следует, что спектральная матрица может быть получена произведением матриц:

$$[J] = [Q]^{-1}[K][Q], \quad (1.11)$$

где $[Q]^{-1}$ – обратная матрица.

1.3 Обратный подход к определению собственных колебаний

Другой способ определения частот и форм свободных колебаний состоит в приведении уравнения (1.5) к виду

$$[D_d]\{\ddot{x}\} + [E]\{x\} = 0, \quad (1.12)$$

где $[D_d] = [F][M]$ – динамическая матрица; $[F] = [K]^{-1}$ – матрица податливости.

Отыскивая решение уравнения (1.12) в форме $\{x\} = \{B\}e^{i\omega t}$, снова придем к стандартной процедуре определения λ_1 матрицы $[D_1]$:

$$([D_1] - \lambda_1[E])\{B\} = 0; \lambda_1 = \frac{\omega_1^2 d}{l^3 m}; \omega = \frac{1}{\omega_1}; [D_1] = [K_1]^{-1}[M_1]. \quad (1.13)$$

Здесь собственное число λ_1 безразмерной динамической матрицы $[D_1]$ выражается через квадрат обратной частоты колебаний, а формы (амплитуды) отличаются знаком:

$$\omega = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{EI}{lm\lambda_1}}; \lambda = \frac{1}{\lambda_1}. \quad (1.14)$$

1.4 Общее решение уравнений свободных колебаний

Частное решение уравнения (1.5), соответствующее некоторой частоте ω_s , имеет вид

$$x_{si} = \varphi_{is} \sin(\omega_s t + \alpha_s); (i, s = \overline{1, n}), \quad (1.15a)$$

где φ_{is} – элементы модальной матрицы (амплитуд собственных форм колебаний), $[\varphi_{is}] = [Q]$, α_s – сдвиг фазы. Выражение (1.15a) характеризует главное колебание частоты ω_s , когда другие частоты не учитываются. Все массы в этом случае колеблются по гармоническому закону с одинаковой частотой $\omega_s = \sqrt{\lambda_s}$ и фазой α_s .

Общее решение уравнения (1.5) запишем в виде [12]

$$x_i = \sum_{s=1}^n A_s \varphi_{is} \sin(\omega_s t + \alpha_s), \quad (1.15b)$$

где A_s, α_s – произвольные постоянные, которые определяются из начальных условий для отклонений x_{i0} и скоростей \dot{x}_{i0} из системы $2n$ уравнений:

$$x_{i0} = \sum_{s=1}^n A_s \varphi_{is} \sin \alpha_s; \quad \dot{x}_{i0} = \sum_{s=1}^n A_s \omega_s \varphi_{is} \cos \alpha_s.$$

Формы колебаний φ_{is} не зависят от начальных условий движения, но влияют только на постоянные A_s и α_s .

Более удобным является другой вид общего решения с произвольными постоянными A_s, C_s :

$$x_i(t) = \sum_{s=1}^n \varphi_{is} (A_s \sin \sqrt{\lambda_s} t + C_s \cos \sqrt{\lambda_s} t). \quad (1.15c)$$

1.5 Условия ортогональности форм колебаний

Для колебания стержней с распределенными массами формы колебаний $\varphi_m(x)$ обладают свойством ортогональности вида [13]

$$\int_0^l p(x) \varphi_r(x) \varphi_s(x) dx = 0; (r \neq s). \quad (1.16a)$$

Так как по длине стержня проведена дискретизация по x_i точкам, то интеграл (1.16a) необходимо заменить суммой по $i = \overline{1, n}$. Роль весовой функции $p(x)$ выполняют компоненты матрицы масс. Условия ортогональности при этом примут вид

$$\sum_{i=1}^n \varphi_r(x_i) m_{is} \varphi_s(x_i) = 0; \quad (r \neq s) \quad (1.16b)$$

или

$$\{Q^r\}^T [M] \{Q^s\} = 0. \quad (1.16c)$$

Если $[M]$ – единичная матрица, то

$$\{Q^r\}^T \{Q^s\} = \sum_i^n \varphi_{ir} \varphi_{si} = 0, \quad r \neq s. \quad (1.16d)$$

Свойство (1.16a), (1.16b) позволяет при вычислении уравнений (1.16c), (1.16d) получать произвольные постоянные для больших систем уравнений в явном виде.

1.6 Функция Грина и матрица податливости

Матрица масс чаще всего является диагональной матрицей, поэтому основная трудность задачи колебаний сооружений состоит в определении матрицы податливости $[F] = [\delta_{ik}]$. Матрица податливости будет симметричной матрицей на основе теоремы Максвелла о взаимности перемещений $\delta_{ik} = \delta_{ki}$. Компоненты матрицы податливости есть перемещения сооружения в точке i под действием единичной нагрузки в точке k .

Для описания перемещений в трехмерном деформированном теле существует функция Грина. Представим себе закрепленное тело, отнесенное к декартовой системе координат $x = (x_1, x_2, x_3)$. Пусть в точке $\xi = (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ действует единичная сила, параллельная оси x_k . Обозначим перемещение в точке x под действием единичной сосредоточенной силы в точке ξ вектором $\bar{G}^{(k)}(x, \xi)$. Здесь индекс k показывает причину перемещения. Символ x обозначает текущую точку, символ ξ – место приложения силы. Вектор $\bar{G}^{(k)}(x, \xi)$ называют вектором Грина. Если записать его проекции, то при переборе $k = 1, 2, 3$ получим тензор Грина $[G_i^{(k)}]$, $i = 1, 2, 3$. Функции $G_i^{(k)}$ называются функциями перемещений Грина.

Применим теорему Бетти о взаимности работ к двум системам сил: единичная сила, действующая в точке ξ , параллельная оси x_k , и единичная сила, действующая в точке x , параллельная оси x_j , и получим теорему Максвелла о взаимности перемещений для сосредоточенных сил:

$$G_k^{(j)}(x, \xi) = G_j^{(k)}(\xi, x), \quad (1.17)$$

из которой следует, что проекция перемещений на x_k -е направление в точке x от действия единичной нагрузки в точке ξ , параллельной x_j , равна проекции перемещений на x_j -е направление в точке ξ от действия единичной нагрузки в точке x , параллельной x_k . В строительной механике равенство (1.17) обычно записывают $\delta_{kj} = \delta_{jk}$. Фактически функции перемещений Грина (матрица Грина) есть не что иное, как компоненты матрицы податливости.

1.7 Инструмент численной реализации задачи о собственных значениях

Численную реализацию задачи о собственных значениях стандартной процедуры в виде уравнений (1.6) или (1.13) удобно делать с помощью функций пакета символьной математики (ПСМ) «WolframMathematica» [14]. Например, использование функций:

Eigenvalues[K] – выводит в порядке убывания собственные значения $\lambda = (\lambda_n, \lambda_{n-1}, \dots, \lambda_2, \lambda_1)$ матрицы [K];

Eigenvectors[K] – выводит собственные векторы матрицы [K], соответствующие собственным значениям модальной матрицы ($\{Q^n\}, \dots, \{Q^2\}, \{Q^1\}$);

Eigensystem[K] – выводит одновременно собственные значения и собственные векторы;

JordanDecomposition[K] – выводит сначала модальную матрицу векторов-столбцов [Q], а затем спектральную матрицу [J]

Normalize[n] – нормирование вектора n ;

DiagonalMatrix[$\{m\}$] – создает диагональную матрицу с диагональю $\{m\}$.

2. Динамика Г-образной рамы

Задача распределения массы в рамах наталкивается на преодоление следующего затруднения. Для оценки этого распределения необходимо иметь точное решение задачи о свободных колебаниях рамы с равномерно распределенной массой. К сожалению, в литературе даны общие рекомендации по построению частотных соотношений и некоторые частные результаты для симметричных и антисимметричных колебаний. В результате поисков удалось обнаружить частотное соотношение для Г-образной рамы в [15] со ссылкой на [16]. При сравнении решения задачи о колебаниях Г-образной рамы, несущей сосредоточенные массы, с точным решением предварительно необходимо иметь уверенность, что в [15, 16] нет ошибок (опечаток).

Рассмотрим динамику сооружения, представляющего собой некоторый пристрой к основному сооружению, в виде рамы с вертикальной стойкой длины L_1 изгибной жесткости D_1 , обладающей массой на единицу длины m_1 , и горизонтальным ригелем длины L_2 жесткости D_2 , обладающей массой на единицу длины m_2 (рис. 1). Вертикальная стойка закреплена, горизонтальный ригель опирается на стену. Колебания рамы состоят из изгибных и продольных колебаний. Анализ показывает, что отношение частот ω_r изгибных колебаний к продольным ω_n равно [17]

$$\frac{\omega_r}{\omega_n} = \frac{\frac{\beta_r^2}{L^2} \sqrt{\frac{D}{\rho}}}{\left(\frac{n\pi}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho_0}}\right)} = \frac{\beta_r^2}{\sqrt{3}\pi} \frac{h}{L}, \quad (n, r = 1, 2, 3 \dots),$$

где ρ_0 – масса в единице объема, $\rho = m$ – масса в единице длины.

Последнее равенство принято при $n = 1$ и для прямоугольного поперечного сечения. Откуда следует, что частота продольных колебаний на два порядка больше частоты изгибных колебаний. Поэтому обычно при колебании рам учитывают лишь изгибные колебания, описываемые уравнением

$$D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0. \quad (2.1)$$

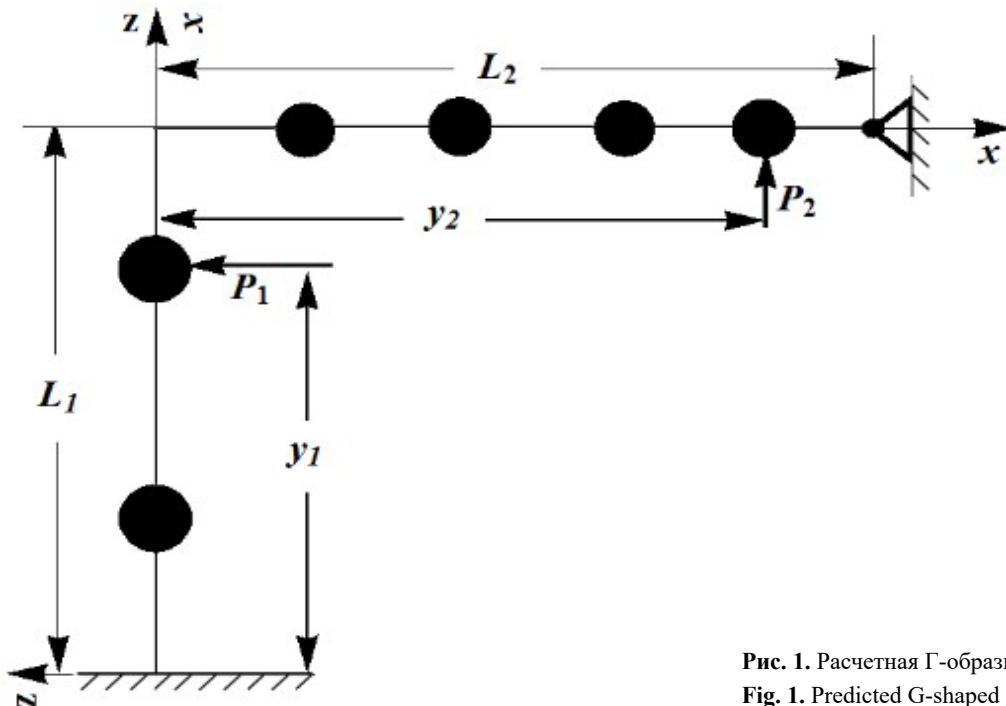


Рис. 1. Расчетная Г-образная рама.
Fig. 1. Predicted G-shaped frame.

Ищем решение (2.1) в виде $w(x, t) = W(x) e^{i\omega t}$. Тогда из (2.1) следует статическое соотношение вида

$$DW^{IV}(x) + q_{\text{ин}}(x) = 0,$$

где $q_{\text{ин}}(x) = -m\omega^2 W(x)$.

Силы инерции $q_{\text{ин}}(x)$ являются аналогом упругого основания с коэффициентом постели k (однопараметрическим упругим основанием Винклера) [18]. Следовательно,

$$W^{IV}(x) - k^4 W(x) = 0, \quad (2.2)$$

где $k^4 = \frac{m}{D} \omega^2$.

Решение уравнения (2.2) выражается с помощью функций Крылова:

$$\begin{aligned} W(x) &= W(0)S(kx) + \frac{W'(0)}{k}T(kx) + \frac{W''(0)}{k^2}U(kx) + \frac{W'''(0)}{k^3}V(kx); \\ W'(x) &= W(0)kV(kx) + W'(0)S(kx) + \frac{W''(0)}{k}T(kx) + \frac{W'''(0)}{k^2}U(kx); \\ W''(0) &= W(0)k^2U(kx) + W'(0)kV(kx) + W''(0)S(kx) + \frac{W'''(0)}{k}T(kx); \\ W'''(x) &= W(0)k^3T(kx) + W'(0)k^2U(kx) + W''(0)kV(kx) + W'''(0)S(kx), \end{aligned} \quad (2.3)$$

где функции Крылова имеют вид

$$\begin{aligned} S(x) &= \frac{1}{2}(chx + cosx); T(x) = \frac{1}{2}(shx + sinx); \\ U(x) &= \frac{1}{2}(chx - cosx); V(x) = \frac{1}{2}(shx - sinx) \end{aligned} \quad (2.4)$$

и обладают следующими свойствами

$$\begin{aligned} S(0) &= 1; T(0) = U(0) = V(0) = 0; S'_x(kx) = kV(kx); T'_x(kx) = kS(kx); \\ U'_x(kx) &= kT(kx); V'_x(kx) = kU(kx); S(x)T(x) - U(x)V(x) = \frac{1}{2}(chxsinx + shxcosx); \\ T(x)U(x) - S(x)V(x) &= \frac{1}{2}(chxsinx - shxcosx); \\ S^2(x) - U^2(x) &= chxcosx; T^2(x) - V^2(x) = shxsinx; \\ U^2(x) - T(x)V(x) &= \frac{1}{2}(1 - chxcosx); S^2(x) - T(x)V(x) = \frac{1}{2}(1 + chxcosx). \end{aligned} \quad (2.5)$$

Изгибающие моменты и поперечные (перерезывающие) силы находятся по формулам:

$$M(x, t) = -D \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2}; Q(x, t) = -D \frac{\partial^3 w(x, t)}{\partial x^3}.$$

Введем локальные координаты x и z , жестко связанные со стойкой и ригелем. Динамический прогиб вертикальной стойки в локальной системе координат с учетом начальных параметров $W_1(0) = W'_1(0) = 0$ и формул (2.3) получит вид

$$W_1(x) = \frac{W'''_1(0)}{k_1^2} U(k_1 x) + \frac{W''_1(0)}{k_1^3} V(k_1 x), \quad (2.6)$$

где $k_i = \sqrt[4]{\frac{m_i \omega^2}{D_i}}$; ($i = 1, 2$).

Динамический прогиб горизонтального ригеля в локальной системе координат при $W_2(0) = 0$ равен

$$W_2(x) = \frac{W_2'(0)}{k_2} T(k_2 x) + \frac{W_2''(0)}{k_2^2} U(k_2 x) + \frac{W_2'''(0)}{k_2^3} V(k_2 x). \quad (2.7)$$

Прогибы выражаются через пять неизвестных начальных параметров: $W_1''(0), W_1'''(0), W_2'(0), W_2''(0), W_2'''(0)$ и частоту ω , которые определим из условий контакта в точке жесткого соединения балок (равенства прогибов, углов поворота, моментов):

$$W_1(L_1) = W_2(0) = 0; W_1'(L_1) = W_2'(0); D_1 W_1''(L_1) = D_2 W_2''(0) \quad (2.8)$$

и условия шарнирного закрепления рамы

$$W_2(L_2) = 0; W_2''(L_2) = 0. \quad (2.9)$$

Используя (2.6)–(2.9) и исключая последовательно начальные параметры, получим:

$$\left[(U^2 - VT)(\beta_1)(T^2 - V^2)(\beta_2) + \left(\frac{D_1 k_1}{D_2 k_2} \right) (TU - SV)(\beta_1)(TU - SV)(\beta_2) \right] \frac{W_1'''(0)}{U(\beta_1)T(\beta_2)} = 0,$$

где $\beta_i = L_i \sqrt[4]{\frac{m_i \omega^2}{D_i}}$; ($i = 1, 2$).

Учитывая, что $W_1'''(0) \neq 0, U(\beta_1) \neq 0, T(\beta_2) \neq 0$, получим трансцендентное уравнение для определения частоты ω :

$$\left(\frac{D_2 k_2}{D_1 k_1} \right) \frac{(T^2 - V^2)(\beta_2)}{(TU - SV)(\beta_2)} + \frac{(TU - SV)(\beta_1)}{(U^2 - VT)(\beta_1)} = 0.$$

Пользуясь свойствами функций Крылова (2.5), окончательно находим:

$$\frac{ch\beta_1 \sin\beta_1 - sh\beta_1 \cos\beta_1}{ch\beta_1 \cos\beta_1 - 1} = \frac{D_2}{D_1} \sqrt[4]{\frac{m_2 D_1}{D_2 m_1}} \frac{2sh\beta_2 \sin\beta_2}{(ch\beta_2 \sin\beta_2 - sh\beta_2 \cos\beta_2)}, \quad (2.10)$$

где $\beta_1 = L_1 \sqrt[4]{\frac{m_1 \omega^2}{D_1}}$; $\beta_2 = \frac{L_2}{L_1} \sqrt[4]{\frac{m_2 D_1}{D_2 m_1}} \beta_1$; частота равна $\omega = \frac{\beta_1^2}{L_1^2} \sqrt{\frac{D_1}{m_1}}$.

Частотное уравнение (2.10) не отличается от выражения, приведенного в [15, 16]. В частном случае $D_1 = D_2; m_1 = m_2; L_2 = 2L_1$ частотные коэффициенты примут вид $\beta_2 = 2\beta_1$. При этом предположении в [15, 16] получено два частотных коэффициента $\beta_1 = \{1.809, 3.2804\}$ первого и второго тона. Формы колебаний в [15, 16] не рассматривались.

С помощью встроенных функций ПСМ «WolframMathematica» $FindRoot[Eq, \{\beta, \beta_0\}]$ были получены 6 основных частотных коэффициентов колебаний рамы $\beta_1 = \beta, \beta_0$ – окрестность параметра, где происходит процесс нахождения корня:

$$\{1.80977, 3.28039, 4.27789, 5.01377, 6.4288, 7.40966\}.$$

Определим формы колебаний рамы. Из условий $W_1(L_1) = 0$ следует

$$W_1''(0) = -\frac{W_1'''(0) V(\beta_1)}{k_1 U(\beta_1)}.$$

Тогда форму колебаний стойки можно представить в виде

$$W_1(x) = C \left(V(k_1 x) - \frac{V(\beta_1)}{U(\beta_1)} U(k_1 x) \right); C = \frac{W_1'''(0)}{k_1^3}.$$

Выражая в (2.7) все начальные параметры через один $W_1'''(0)$, получим форму колебаний ригеля:

$$W_2(x) = C \frac{k_1}{k_2} \left\{ A(\beta_1) \left(T(k_2 x) - \frac{V(\beta_2)}{T(\beta_2)} V(k_2 x) \right) + \left(\frac{D_1 k_1}{D_2 k_2} \right) B(\beta_1) \left(U(k_2 x) - \frac{S(\beta_2)}{T(\beta_2)} V(k_2 x) \right) \right\},$$

где $A(\beta_1) = \frac{(U^2 - VT)(\beta_1)}{U(\beta_1)}$; $B(\beta_1) = \frac{(TU - SV)(\beta_1)}{U(\beta_1)}$.

Каждой частоте ω_i ($i = \overline{1,6}$) отвечает своя форма колебаний $W_1^i(x)$, $W_2^i(x)$.

Формы колебаний определяются с точностью до множителя C , который в дальнейшем прием равным единице. Введем безразмерную длину $\xi = x/L_1$. Тогда $k_1 x = \beta_1 \xi$. Приравнивая множитель $C = 1$, определим i -ю форму колебаний стойки:

$$y(\xi, i) = V(\beta(i)\xi) - \left(V(\beta(i))/U(\beta(i)) \right) U(\beta(i)\xi).$$

Прогиб горизонтального ригеля будем вычислять в тех же локальных безразмерных координатах. В нашем примере $k_1/k_2 = 1$; $d_1 k_1/(d_2 k_2) = 1$; $\beta_1 = \beta$; $\beta_2 = 2\beta$. Полагая для любой частоты $C = 1$, $k_2 x = \beta \xi$, найдем форму колебаний ригеля для i -й частоты:

$$z(\xi, i) = \left((U^2 - TV)(\beta(i)) \left(T(\beta(i)\xi) - \left(V(2\beta(i))/T(2\beta(i)) \right) \right) V(\beta(i)\xi) + \right. \\ \left. + (TU - SV)(\beta(i)) \left(U(\beta(i)\xi) - \left(S(2\beta(i))/T(2\beta(i)) \right) \right) V(\beta(i)\xi) \right) / U(\beta(i)).$$

Если отсчитывать координату ξ для стойки и ригеля от начала заделки как безразмерную длину дуги периметра рамы, то можно изобразить форму колебаний рамы на одном рисунке, причем область изменения прогибов будет $0 \leq \xi \leq 3$. Шесть форм колебаний отражены на рис. 2.

Анализ полученных шести форм колебаний показывает: при первых трех частотах по вертикальной стойке рамы пробегает одна полуволна, постепенно увеличивая амплитуду. Только начиная с четвертой частоты появляются две полуволны, постепенно увеличивая амплитуду до шестой частоты. На ригеле рамы возникает вначале одна полуволна с большой амплитудой, затем амплитуда падает с увеличением полуволн пропорционально частоте.

Сделаем расчет динамики рамы в нашем случае, распределяя массу следующим образом. Стойку разделим на два элемента и поместим две сосредоточенные массы в их середине. На ригеле поместим четыре массы в середине каждого элемента. Все элементы имеют одинаковую длину $L_1/2 = L_2/4$ и одинаковую сосредоточенную массу $m = L_1/2$.

Для получения матрицы податливости построим функцию Грина, пользуясь методом начальных параметров (рис. 1).

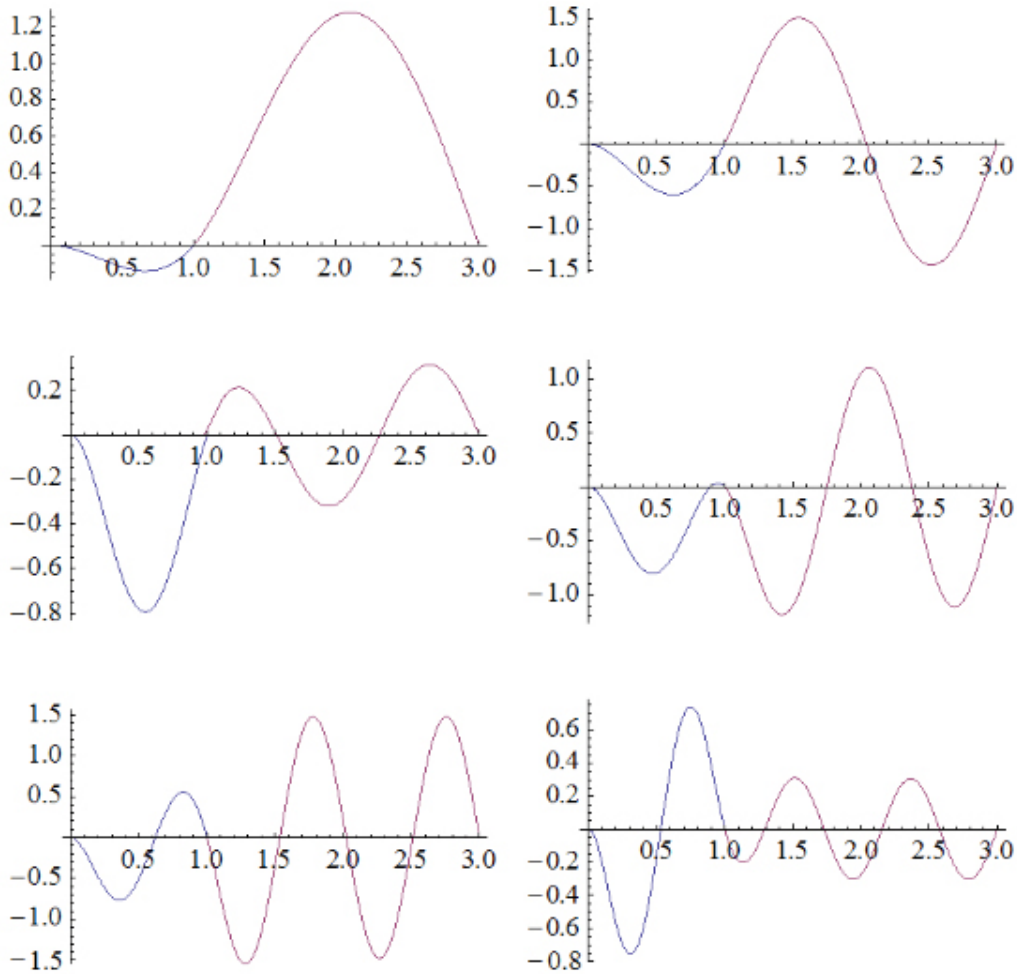


Рис. 2. Формы колебаний Г-образной рамы.
 Fig. 2. The oscillation forms of the G-shaped frame.

$$W_1(\xi) = \frac{L_1^3}{6D_1} \left[-\frac{3M01}{L_1} \xi^2 - Q01\xi^3 + P_1(\xi - \eta)_+^3 \right]; \xi = \frac{x}{L_1}; \eta = \frac{y_1}{L_1}; \quad (2.11)$$

$$W_2(\xi) = \frac{L_2^3}{6D_2} \left[\frac{6\theta02D_2}{L_2^2} \xi - \frac{3M02}{L_2} \xi^2 - Q02\xi^3 + P_2(\xi - \chi)_+^3 \right]; \xi = \frac{x}{L_2}; \chi = \frac{y_2}{L_2};$$

$$w01 = \theta01 = w02 = 0,$$

$$(\xi - \eta)_+^3 = \begin{cases} (\xi - \eta)^3, & \xi \geq \eta \\ 0, & \xi \leq \eta \end{cases}; (\xi - \chi)_+^3 = \begin{cases} (\xi - \chi)^3, & \xi \geq \chi \\ 0, & \xi \leq \chi \end{cases}; 0 \leq \xi, \eta, \chi \leq 1.$$

Остальные начальные параметры определяются из условий контакта и граничных условий рамы на другом конце:

$$W_1(1) = w02 = 0; W_2(1) = 0; M_2(1) = 0; W_1'(1) = \theta02; M_1(1) = M02. \quad (2.12)$$

К сожалению, в общем виде все параметры определить не удастся. Для нашего частного случая все начальные параметры выразим через начальный момент $M01$ и начальную поперечную силу $Q01$ стойки. Из (2.12) найдем

$$\frac{M01}{L_1} = \frac{1}{(4 + 3d_3)} (-P_1(1 - \eta)\eta(2(2 - \eta) + 3d_3(1 - \eta)) + \left(\frac{L_2}{L_1}\right) P_2(2 - \chi)(1 - \chi)\chi);$$

$$Q01 = \frac{1}{(4 + 3d_3)} \left(P_1(4 + 3d_3 - 3(2 + 3d_3)\eta^2 + 2(1 + 3d_3)\eta^3) - 3 \left(\frac{L_2}{L_1} \right) P_2(2 - \chi)(1 - \chi)\chi \right);$$

$$D_2 = D_1 = D; L_2 = 2L_1; M02 = L_1(M01/L_1 + Q01 - P_1(1 - \eta));$$

$$\theta02 = L_1^2/(2D)(-2M01/L_1 - Q01 + P_1(1 - \eta)^2);$$

$$Q02 = 3P_1(d_3(1 - \eta)^2 + (1 - \eta)) \left(\frac{L_1}{L_2} \right) - \frac{3M01}{L_1 \left(\frac{L_1}{L_2} \right) (1 + 2d_3)} - 3Q01 \left(\frac{L_1}{L_2} \right) (1 + d_3) + P_2(1 - \chi)^3;$$

$$d_3 = \frac{D_2 L_1}{D_1 L_2}.$$

Затем, попеременно присваивая $P_1 = 1, P_2 = 0$ и наоборот, придавая переменным ξ, η, χ текущие значения сосредоточенных масс и значений, в которых прикладывается единичная сила, получим матрицу податливости в виде $[F]$ и ее безразмерный аналог $[a]$:

$$[F] = \frac{D}{L_1^3} [a],$$

где $[a] =$

$$\begin{bmatrix} 0,00259677 & 0,00225645 & -0,00174782 & -0,00324596 & -0,00274658 & -0,00104869 \\ 0,00225645 & 0,00579279 & -0,00524347 & -0,00973788 & -0,00823975 & -0,00314608 \\ -0,00174782 & -0,00524347 & 0,0115098 & 0,0239794 & 0,0206909 & 0,00794752 \\ -0,00324596 & -0,00973788 & 0,0239794 & 0,0761552 & 0,0752563 & 0,0300127 \\ -0,00274658 & -0,00823975 & 0,0206909 & 0,0752563 & 0,0961304 & 0,0426229 \\ -0,00104869 & -0,00314608 & 0,00794752 & 0,0300127 & 0,0426229 & 0,0245602 \end{bmatrix}$$

Матрица масс $[M]$ и ее безразмерный аналог $[M_1]$ имеют вид

$$[M] = mL_1 [M_1],$$

$$\text{где } [M_1] = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 \end{bmatrix}$$

Отсюда динамическая матрица может быть получена простым перемножением вышеприведенных матриц:

$$[D_d] = [a][M_1].$$

Матрица податливости получилась, как это и должно быть, симметричной. Причем некоторые коэффициенты имеют знак минус. Этот знак зависит от выбора локальных координат. При другом выборе все элементы матрицы могут быть положительными. Проверка показывает, что частота колебаний является инвариантной по отношению к выбору локальных осей координат. Коэффициенты характеристического полинома 6-го порядка также будут содержать 6 инвариантов. Частота колебаний – физическая величина и не зависит от наблюдателя!

Собственные значения Λ динамической матрицы $[D_d]$ связаны с частотой колебаний следующим образом: $\omega = \frac{1}{L_1^2} \sqrt{\frac{D_1}{\Lambda m_1}}$. Откуда коэффициент β_1^2 необходимо сравнивать с $\Lambda^{-0.5}$.

Вычислим собственные значения $\Lambda: \{\Lambda_6, \Lambda_5, \Lambda_4, \Lambda_3, \Lambda_2, \Lambda_1\} = \text{Eigenvalues}[Dd]$:
 $\{0.0932819, 0.0087568, 0.00300994, 0.001681, 0.00102958, 0.000613312\}$.

Коэффициенты частот $\Lambda^{-0.5}$ для 6 сосредоточенных масс (приближенное решение) получат значения:

$\{3.27417, 10.6863, 18.2272, 24.3902, 31.1652, 40.3793\}$.

Соответствующее точное решение β_1^2 для 6 сосредоточенных масс имеет вид:

$\{3.27526, 10.761, 18.3004, 25.1379, 41.3295, 54.903\}$.

Приближенные частоты оказываются ниже: 1-я частота на 0.03 %, 2-я на 0.69 %, 3-я на 0.4 %, 4-я на 3 %, 5-я на 25 %, 6-я – на 26.5 %.

Приближенные частоты, полученные с помощью МКЭ в Ansys, оказываются ниже: 1-я частота на 0.03 %, 2-я на 0.42 %, 3-я на 1.09 %, 4-я на 1.93 %, 5-я на 11.4 %, 6-я – на 16.71 %.

Также хочется отметить, что приближенные частоты получены из СЛАУ разной размерности (для МКЭ она больше, чем для модернизированного метода, более чем в 2.3 раза).

Анализ вычислений для большего числа разбиений стержней (стойки и ригеля) рамы на элементы показывает экспоненциальную сходимость приближенных частот к точным. Например, для коэффициента 2-й собственной частоты колебаний (для коэффициента 1-й собственной частоты колебаний различие и так чрезвычайно мало – 0.03 %) при разбиении массы рамы на 6 элементов, в середине которых помещена 1/6 часть общей массы рамы, погрешность в определении 2-й собственной частоты колебаний рамы всего 0.69 %. А начиная с 18 элементов погрешность составляет менее 0.1 %.

Наибольшее значение сосредоточенных масс (число степеней свободы для нахождения собственных значений) нами было опробовано при $n = 200$, т.е. для матриц с 40 000 элементов, или решение полинома 200-го порядка. К счастью, ПСМ «WolframMathematica» [14] и с этой задачей успешно справился, применив метод итераций матриц Стодолы.

Заключение

В связи с тем, что определение собственных и вынужденных колебаний рамных сооружений, моделируемых стержнями с распределенными массами (бесконечное число степеней свободы) довольно затруднительно, в статье сделана попытка наделить модель сооружения конечным числом степеней свободы: масса помещена в некоторое число узлов, которые упруго взаимодействуют со стержнями рамы, не имеющими массы. Стержни рамы работают только на изгиб.

В статье с использованием функций Грина, матриц жесткости, масс, податливости и др. была решена задача о свободных колебаниях Г-образной рамы. Полученные приближенные результаты при сравнении с малоизвестными точными результатами показали хорошую сходимость, особенно при увеличении числа степеней свободы (количества сосредоточенных масс, моделирующих распределенную массу стержней рамы).

Список литературы

- Хазов П.А., Кожанов Д.А., Анущенко А.М., Сатанов А.А. **2022**. Динамика строительных конструкций при экстремальных природных воздействиях: колебания, прочность, ресурс. Н. Новгород: ННГАСУ, 96 с.
- Виноградов Ю.И., Хохлов С.В., Соколов С.Т. **2019**. Особенности сейсмического мониторинга при ведении взрывных работ вблизи действующего газопровода. *Известия Тульского государственного университета*, 1: 296–305. EDN: YOZCUI
- Мкртычев О.В., Решетов А.А. **2017**. Сейсмические нагрузки при расчете зданий и сооружений. М.: Изд-во АСВ, 140 с.
- Литвинова Э.В. **2017**. Определение параметров динамических характеристик колебаний строительных конструкций, зданий и сооружений. *Строительство и техногенная безопасность*, 61(9): 93–99.

5. Сюй Пэйфу (ред.). **2008.** *Проектирование современных высотных зданий*: пер. с кит. М.: Изд-во АСВ, 469 с.
 6. Рашидов Т.Р., Мардонов Б., Мирзаев И. **2018.** О колебаниях подземных трубопроводов под действием сейсмических волн. *Проблемы механики. Узбекский журнал*, 4: 19–23. URL: <https://assets.slib.uz/edition/file/5dfc6907cb26e.pdf>
 7. Господариков А.П., Зацепин М.А. **2019.** Математическое моделирование нелинейных краевых задач геомеханики. *Горный журнал*, 12: 16–20. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.12.03>
 8. Шейн А.И. **2015.** *Динамика и устойчивость сооружений. Обеспечение сейсмостойкости зданий и сооружений*. Пенза: ПГУАС, 108 с.
 9. Еремьянц В.Э., Рудаев Я.И., Тютюкин Г.В. **2014.** *Аналитическая динамика и теория колебаний*: учеб. пособие. Ч. 2. Бишкек: Изд-во КРСУ, 247 с
 10. Гусев А.Ф., Новоселова М.В. **2017.** *Прикладная теория колебаний*. Тверь: Тверской гос. техн. ун-т, 160 с.
 11. Харрис С.М., Крид Ч.И. **1980.** *Справочник по ударным нагрузкам*. Сокр. перевод с англ. Н.А. Пэдуре. Л.: Судостроение, 358 с.
 12. Бабаков И.М. **1958.** *Теория колебаний*: учеб. пособие для высш. техн. учеб. заведений. М.: Гостехиздат, 628 с.
 13. Стеклов В.А. **1927.** *Основы теории интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений*. М.; Л.: Госиздат, 419 с.
 14. Артюхин Ю.П., Гурьянов Н.Г., Котляр Л.М. **2002.** *Система Математика 4.0 и ее приложения в механике*: учеб. пособие. Казань: Казанское математическое общество: Изд-во КамПИ, 415 с.
 15. Коллатц Л. **1968.** *Задачи на собственные значения (с техническими приложениями)*: перевод со второго нем. изд. Под общ. ред. В.В. Никольского. М.: Наука, 503 с. URL: <http://ikfia.ysn.ru/wp-content/uploads/2018/01/Kollatc1968ru.pdf>
 16. Гогенемзер К., Прагер В. **1936.** *Динамика сооружений. Учение о колебаниях применительно к потребностям инженера строителя*. Перевод с нем. А.А. Янсон. Л.; М.: ОНТИ, Гл. ред. строит. лит., 358 с.
 17. Новацкий В. **1963.** *Динамика сооружений*. Перевод с польского Л.В. Янушевича. М.: Госстройиздат, 376 с.
 18. Великанов П.Г., Куканов Н.И., Халитова Д.М. **2021.** Использование непрямого метода граничных элементов для расчета изотропных пластин на упругом основании Винклера и Пастернака–Власова. *Вестник Самарского университета. Естественная серия*, 27(2): 33–47. doi:10.18287/2541-7525-2021-27-2-33-47
- ## References
1. Khazov P.A., Kozhanov D.A., Anushchenko A.M., Satanov A.A. **2022.** [*Dynamics of building structures under extreme natural impacts: vibrations, strength, resource*]. N. Novgorod: NNGASU, 96 p. (In Russ.).
 2. Vinogradov Yu.I., Khokhlov S.V., Sokolov S.T. **2019.** Features of seismic monitoring by explosive works near existing gas pipeline. *Izvestiya Tula State University*, 1: 296–305. (In Russ.). EDN: YOZCUI
 3. Mkrtychev O.V., Reshetov A.A. **2017.** [*Seismic loads in structural engineering*]. Moscow: Publ. House ASV, 140 p. (In Russ.).
 4. Litvinova E.V. **2017.** Determination of parameters of dynamic characteristics of vibrations of building constructions, buildings and structures. *Stroitel'stvo i tekhnologennaya bezopasnost' = Construction and industrial safety*, 61(9): 93–99. (In Russ.). EDN: YSFCJI
 5. Xu Peifu (ed.). **2008.** [*Design of modern high-rise buildings*]. Moscow: Publ. House ASV, 469 p. (In Russ. Transl. from Chinese).
 6. Rashidov T.R., Mardonov B., Mirzaev I. **2018.** About vibrations of underground pipelines under the action of seismic waves. *Problems of Mechanics. Uzbek Journal*, 4: 19–23. (In Russ.). URL: <https://assets.slib.uz/edition/file/5dfc6907cb26e.pdf>
 7. Gospodarikov A.P., Zatsepina M.A. **2019.** Mathematical modeling of boundary problems in geomechanics. *Mining Journal*, 12: 16–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.12.03>
 8. Shein A.I. **2015.** [*Dynamics and stability of structures. Ensuring earthquake resistance of buildings and structures*]. Penza: PGUAS, 108 p. (In Russ.).
 9. Eremyants V.E., Rudaev Ya.I., Tyutyukin G.V. **2014.** [*Analytical dynamics and theory of oscillations*]: Textbook. Pt 2. Bishkek: KRSU Publ. House, 247 p. (In Russ.).
 10. Gusev A.F., Novoselova M.V. **2017.** [*Applied theory of oscillations*]. Tver: Tver State Technical University, 160 p. (In Russ.).
 11. Harris C.M., Creed Ch.I. **1980.** [*Handbook of shock loads*]. Leningrad: Sudostroenie, 358 p. (In Russ.). (Transl. from English: C.M. Harris, Ch.E. Crede (eds). **1976.** *Shock and vibration handbook*. Second ed. New York: McGraw-Hill, 1218 p.)
 12. Babakov I.M. **1958.** [*Theory of oscillations*]: Textbook for higher techn. educational institutions. Moscow: Gostekhizdat, 628 p. (In Russ.).
 13. Steklov V.A. **1927.** [*Fundamentals of the integration theory of the ordinary differential equations*]. Moscow; Leningrad: Gosizdat, 419 p. (In Russ.).
 14. Artyukhin Y.P., Guryanov N.G., Kotlyar L.M. **2002.** [*The Mathematics 4.0 system and its applications in*

- mechanics*]: Textbook. Kazan: Kazan Mathematical Society: Publ. House of CamPI, 415 p. (In Russ.).
15. Collatz L. **1968**. [*The eigenvalue problems (with technical applications)*]: Transl. from German. Moscow: Nauka, 503 p. (In Russ.). URL: <http://ikfia.ysn.ru/wp-content/uploads/2018/01/Kollatz1968ru.pdf>
 16. Hohenemser K., Prager W. **1936**. [*Dynamics of structures. The theory of oscillations applied to the needs of a civil engineer*]. Transl. from German by A.A. Yanson. Leningrad; Moscow: ONTI, 358 p. (In Russ.).
 17. Novatsky V. **1963**. [*Dynamics of structures*]. Transl. from Polish by L.V. Yanushevich. Moscow: Gosstroizdat, 376 p. (In Russ.).
 18. Velikanov P.G., Kukanov N.I., Khalitova D.M. **2021**. Use of the indirect boundary elements method for the calculation of isotropic plates on an elastic Winkler base and Pasternak–Vlasov base. *Bulletin of Samara University. Natural Science Series*, 27(2): 33–47. (In Russ.). doi:10.18287/2541-7525-2021-27-2-33-47

Об авторах

Великанов Петр Геннадьевич (<https://orcid.org/0000-0003-0845-2880>), кандидат физико-математических наук, доцент, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ; Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, pvelikanov@mail.ru

Артюхин Юрий Павлович (<https://orcid.org/0000-0002-6243-9145>), доктор физико-математических наук, профессор, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, ArtukhinYP@mail.ru

About the Authors

Velikanov, Peter G., Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan; Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, pvelikanov@mail.ru

Artyukhin, Yury P., Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, ArtukhinYP@mail.ru

Поступила 7.04.2023

Принята к публикации 21.05.2023

Received 7 April 2023

Accepted 21 May 2023

© Автор 2023 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author 2023. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 910.3

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.196-205>
<https://www.elibrary.ru/yucbey>

Оценка эколого-хозяйственного баланса в водосборе залива Петра Великого (Японское море)

Т. К. Музыченко

E-mail: mtk1998@yandex.ru

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

Резюме. Анализируются показатели эколого-хозяйственного баланса в пределах водосбора зал. Петра Великого. Необходимость данного исследования обусловлена тем, что на экологическую ситуацию в водосборе влияет процесс интенсивного хозяйственного освоения, неравномерно распределенный по изучаемой территории. На основе результатов дешифрирования спутниковых снимков была создана карта, отображающая пространственное распределение 10 типов использования земель (застроенные земли, карьеры, рисовые чеки, сельскохозяйственные земли, неиспользуемые сельскохозяйственные земли, неиспользуемые рисовые чеки, луга, леса, кустарники и водные объекты) по состоянию на 2022 г. Выполнена оценка эколого-хозяйственного баланса для территории водосбора. Водосбор был разделен на 20 речных бассейнов. Каждому типу землепользования присвоен балл антропогенной нагрузки. На основе этого рассчитаны показатели эколого-хозяйственного баланса – коэффициенты абсолютной и относительной напряженности, площадь земель со средо- и ресурсостабилизирующими функциями и коэффициент естественной защищенности. Выявлено, что на изучаемой территории в целом соблюдается баланс между природным потенциалом территории и ее хозяйственным освоением, но в бассейнах рек Богатая и Первая Речка интенсивность антропогенного воздействия повышена. Минимальное влияние хозяйственного освоения на природный потенциал наблюдается на юго-западе водосбора (в бассейнах рек Болотная, Тесная, Цукановка, Гладкая, Рязановка, Пойма, Брусья, Нарва, Барабашевка, Амба).

Ключевые слова: залив Петра Великого, бассейновый подход, эколого-хозяйственный баланс, антропогенная нагрузка, коэффициенты относительной и абсолютной напряженности территории, коэффициент естественной защищенности

Ecological and economic balance evaluation of Peter the Great Gulf basin (Sea of Japan)

Tatiana K. Muzychenko

E-mail: mtk1998@yandex.ru

Pacific Geographical Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract. This work analyzes the indicators of ecological and economic balance within the basin of Peter the Great Gulf. The need for this study is due to the fact, that environmental conditions in the basin are greatly affected by the ongoing process of infrastructural and economic development. The aforementioned processes are characterized by unevenness in their spatial distribution. A map that demonstrates the spatial distribution of 10 land use classes (built-up areas, quarries, rice/paddy fields, agricultural lands, unutilized agricultural lands, unutilized rice/paddy fields, grasslands, shrublands, forests and water bodies) of the area of interest has been compiled using satellite imagery as of 2022. The ecological and economic balance of the basin, which was subdivided into 20 smaller river basins, has been evaluated. Each land use class was assigned to a category representing the intensity of anthropogenic impact. Ecological and economic balance indicators – absolute tension, relative tension, natural protectiveness indices and total area of land with resource-stabilizing properties – were calculated. The balance between the natural potential and economic development was found to be maintained in the study area as a whole, albeit with a few exceptions such as the Pervaya Rechka and Bogataya river basins which host the most intense human impact in the basin. Minimum human influence on the natural potential can be observed in the southwest of the basin (basins of the Bolotnaya, Tesnaya, Tsukanovka, Gladkaya, Ryazanovka, Poyma, Brusya, Narva, Barabashevka, Amba rivers).

Keywords: Peter the Great Gulf, basin approach, ecological and economic balance, anthropogenic impact, absolute and relative tension indices, natural protectiveness index

Для цитирования: Музыченко Т.К. Оценка эколого-хозяйственного баланса в водосборе залива Петра Великого (Японское море). *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 2, с. 196–205. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.196-205>; <https://www.elibrary.ru/yucbey>

For citation: Muzychenko T.K. Ecological and economic balance evaluation of Peter the Great Gulf basin (Sea of Japan). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 2, pp. 196–205. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.196-205>; <https://www.elibrary.ru/yucbey>

Введение

Водосбор залива Петра Великого (ЗПВ) подвергается значительному антропогенному воздействию, которое необходимо отслеживать и измерять не только для своевременного реагирования при ухудшении экологической обстановки, но и для разработки планов по устойчивому развитию территории.

Водосборы крупных объектов – рек, озер – являются пространственными системами суши с мощным интегрирующим фактором и четкими границами – водоразделами, способствующими формированию целостных социальных и хозяйственных систем. В бассейнах крупных рек и на побережье морей, как правило, наиболее высокая плотность населения [1, 2].

Основоположником бассейнового подхода считается Р. Хортон, который охарактеризовал речные бассейны как «эрозионные комплексы» [3]. В работах В.Б. Сочавы, М.И. Львовича, Н.И. Коронкевича, А.И. Субботина и Л.М. Корытного речной бассейн представлен как геосистема [1, 4–7]. При анализе структуры использования земель бассейновый подход позволяет устанавливать эффективные пространственные формы взаимодействия между природопользователями, опираясь на специфику природно-хозяйственных условий в конкретном бассейне [1]. Данный подход также широко применяется в практике изучения трансграничных территорий, различные части которых соединены энергетическими, вещественными, информационными потоками, но одновременно разделены границами государств [8, 9]. Для них особенно важен анализ пространственной структуры земель. Одной из таких территорий является входящий в водосбор ЗПВ трансграничный бассейн р. Раздольной.

Концепция эколого-хозяйственного баланса (ЭХБ), разработанная Б.И. Кочуровым [10], подразумевает обеспечение баланса между возможностями природы и интересами различных групп населения на какой-либо территории. Результатом ЭХБ, достигаемого

посредством совершенствования существующей структуры землепользования, является обеспечение устойчивого развития природы и общества, воспроизводства природных ресурсов, а также отсутствие негативных экологических последствий.

Прибрежные районы, формируя зону контакта моря и суши, играют значительную роль в природных и антропогенных процессах. Они обладают высокой экологической, социально-экономической и эстетической ценностью. Интенсификация и диверсификация человеческой деятельности приводят к изменению геоморфологических и гидрологических параметров территорий, а также оказывают влияние на морскую среду и биологические сообщества. Эти процессы, в свою очередь, снижают способности прибрежных экосистем выполнять хозяйственные, рекреационные, навигационные и прочие социально значимые функции. Показатели ЭХБ демонстрируют, как распределение антропогенной нагрузки по территории влияет на устойчивость природных ландшафтов [11]. Концепция ЭХБ нашла широкое применение во всех регионах страны, при этом в основном в качестве объектов оценок выступают административные территории – субъекты федерации или муниципальные образования [12–18].

Целью настоящей работы является оценка показателей эколого-хозяйственного баланса на основе структуры пространственного распределения типов использования земель в пределах водосбора зал. Петра Великого. Для достижения цели выполнены следующие задачи – составлена карта пространственного распределения земель в водосборе ЗПВ, выполнен расчет картографо-статистических данных по землепользованию, осуществлена оценка эколого-хозяйственного баланса территории.

Материалы и методы

В основу расчетов показателей ЭХБ [10] для водосбора ЗПВ легли картографо-статистические данные о пространственной струк-

туре землепользования в этой зоне в масштабе 1:100 000, полученные в результате дешифрирования данных дистанционного зондирования – спектрзональных снимков среднего пространственного разрешения с космических аппаратов Landsat 8 и Sentinel-2. Обработка данных и подготовка картографических материалов выполнена посредством ArcGIS Pro 2.8 [19].

Начальным этапом оценки ЭХБ является определение степени антропогенной нагрузки. Методом экспертно-балльной оценки каждому из 10 типов землепользования, выделенных нами в соответствии с геоэкологической классификацией ландшафтов В.А. Николаева [20], была присвоена одна из 6 возможных категорий антропогенной нагрузки. Высшей степенью нагрузки отличаются застроенные территории, а также карьеры, в связи с чем данным категориям земель присвоен балл 6. Балл 5 получили рисовые чеки, так как их постоянное орошение оказывает значительное влияние на ландшафты и водные объекты территории; балл 4 – эксплуатируемые сельскохозяйственные угодья; 3 – сельскохозяйственные угодья и рисовые чеки, которые не находятся в использовании, но последствия оказываемого на них в прошлом воздействия, как правило, все еще остаются заметными. Балл 2 получили луга по причине того, что объем антропогенных воздействий на них ограничен. К однопольной категории отнесены земли природоохранного назначения, кустарники, леса и водные объекты.

Индекс антропогенной нагрузки (АН) рассчитывается по формуле 1, где r – это балл антропогенной нагрузки, а S_r – процентная доля данной категории земель в общей площади.

$$АН_n = r \cdot S_r. \quad (1)$$

Коэффициент абсолютной напряженности эколого-хозяйственного состояния территории K_a показывает отношение площади земель с высшей степенью антропогенной нагрузки к площади земель с очень низкой степенью:

$$K_a = \frac{АН_6}{АН_1}. \quad (2)$$

Данный показатель отображает восстановительный потенциал ландшафтов территории, уравновешивающий сильные антропогенные воздействия. Чем ниже коэффициент K_a ,

тем более благополучным является состояние окружающей среды.

Коэффициент относительной напряженности эколого-хозяйственного состояния территории (K_o) характеризует сбалансированность пространственной структуры землепользования:

$$K_o = \frac{АН_4 + АН_5 + АН_6}{АН_1 + АН_2 + АН_3}. \quad (3)$$

Эталонным значением K_o является 1.0 – в данной ситуации на территории соблюдается баланс между различными антропогенными воздействиями и восстановительным потенциалом природы.

Каждому антропогенному воздействию или их совокупности соответствует свой предел устойчивости природных и природно-антропогенных ландшафтов. Он зависит от площади естественных биогеоценозов, урочищ, природоохранных зон и особо охраняемых территорий, в совокупности способных выполнять средо- и ресурсостабилизирующие функции, и выражается показателем $P_{сф}$:

$$P_{сф} = P_1 + 0.8 P_2 + 0.6 P_3 + 0.4 P_4 \quad (4)$$

Чем больше его значение, тем выше естественная защищенность территории и, соответственно, устойчивость ландшафтов [1].

Коэффициент естественной защищенности земельного фонда ($K_{ЕЗ}$) отражает долю земель со средо- и ресурсостабилизирующими функциями в общей площади территории (P_o). Рассчитывается коэффициент по формуле

$$K_{ЕЗ} = \frac{P_{сф}}{P_o}. \quad (5)$$

Величина данного показателя менее 0.5 свидетельствует о критически низком уровне защищенности территории. В отличие от сравнения процентно-площадных соотношений различных типов землепользования (например, лесистости или распаханности территории), $K_{ЕЗ}$ является интегральной характеристикой и может быть использован для комплексной оценки территории.

Результаты и обсуждение

Водосбор ЗПВ охватывает юг Приморского края Российской Федерации, юго-вос-

ток провинции Хэйлунцзян и северо-восток провинции Цзилинь Китайской Народной Республики. Около 66.94 % его территории находится в пределах РФ, соответственно 33.06 % – на территории КНР.

Для более подробного анализа результатов картографирования водосбор ЗПВ на основе пространственных данных HydroATLAS (<https://www.hydrosheds.org/hydroatlas>) был поделен на 20 бассейнов рек (без учета их притоков и мелких рек на островных территориях), впадающих в зал. Петра Великого. Более половины площади водосбора (55.8 %) занимает бассейн р. Раздольной, 14.7 % – бассейн р. Партизанской, 4.7 % – Артемовки и 3.1 % – Петровки. Доля бассейнов остальных рек составляет суммарно 21.7 %.

Леса, кустарники, а также водные объекты, являясь категориями земель с наименьшей степенью антропогенной нагрузки (1 балл), доминируют в пределах каждого бассейна, входящего в водосбор ЗПВ (рис. 1). Леса встречаются повсеместно во внутренних, преимущественно горных, районах водосбора, а в долинах рек и на прибрежных равнинах замещаются другими типами земель. В среднем течении р. Раздольной и в низовьях р. Болотной сплошной лесной покров отсутствует [21]. Максимальная доля земель (92.9 % от площади бассейна) с баллом 1 наблюдается в бассейне р. Шкотовка (табл. 1), а минимальная – в бассейне р. Болотной (38.8 %). Суммарная площадь данной категории по всему водосбору составляет 23 637.1 км² (77.6 % от общей площади водосбора) (табл. 1).

Луга (2 балла), как правило, замещают земли лесов в долинах рек, вокруг крупных водоемов и на побережьях. Наиболее обширны их площади на северо-западе российской части бассейна р. Раздольной, а также в бассейне р. Болотной, в силу их ландшафтных особенностей. Суммарная их площадь по всему водосбору ЗПВ составляет 2 176.2 км² (7.1 % от площади водосбора) (табл. 1). Наибольшая доля земель с баллом 2 в бассейне р. Болотной (57.3 %), а наименьшая – в бассейне Первой Речки (1 %).

Неэксплуатируемые сельскохозяйственные земли и рисовые чеки (балл 3) занимают 2.9 % от площади водосбора ЗПВ (894.4 км²)

(табл. 1). Территории данной категории распространены в среднем и нижнем течении бассейна р. Раздольной, а также в устье р. Артемовка. Бассейн р. Амба отличается наибольшей долей земель с 3-балльной степенью АН (7.9 %), а бассейн р. Рязановка – наименьшей (0.3 %).

Эксплуатируемые сельскохозяйственные угодья (4-балльная степень АН) составляют 9 % от общей площади (2 733.6 км²) (табл. 1). Как правило, они располагаются в низовьях и средних течениях крупных рек изучаемого водосбора, а также на крупных равнинных участках – например, на Раздольненской равнине, в Артемовской межгорной котловине. Крупные массивы возделываемых полей имеются в верховьях и среднем течении рек Дасуйфэньхэ и Сяосуйфэньхэ, которые своим слиянием образуют р. Раздольную. Максимальная доля земель, принадлежащих к данной категории, отмечена в бассейне р. Раздольной (13.8 %), а их полное отсутствие – в бассейне р. Брусья.

Эксплуатируемые рисовые чеки (5 баллов) расположены исключительно в среднем течении р. Раздольной. Их площадь составляет 35.7 км² (табл. 1) (0.1 % от общей площади водосбора ЗПВ).

Территории, включающие в себя застроенные земли и карьеры, с максимальным баллом 6 АН, как правило, располагаются в долинах рек и на побережьях. Крупные города присутствуют в бассейне р. Раздольной (Уссурийск, Суйфэньхэ и Дуннин), в центральной (Владивосток, Артём и их агломерации) и восточной частях водосбора (Находка и Партизанск). Земли, входящие в данную категорию, занимают 3.3 % от площади водосбора (1 001.5 км²) (табл. 1). Наибольшая доля земель с максимальной антропогенной нагрузкой в бассейнах рек Первая Речка и Богатая (31.7 % и 31.9 % соответственно).

Для каждого речного бассейна в пределах водосбора зал. Петра Великого были рассчитаны показатели ЭХБ – коэффициенты абсолютной (K_a) и относительной (K_o) напряженности, площадь земель со средо- и ресурсостабилизирующими функциями (P_{cf}) и коэффициент естественной защищенности ($K_{ЕЗ}$) (табл. 2).

Коэффициент абсолютной напряженности. Общее для водосбора значение K_a составляет 0.25, что указывает на преобладание мало-

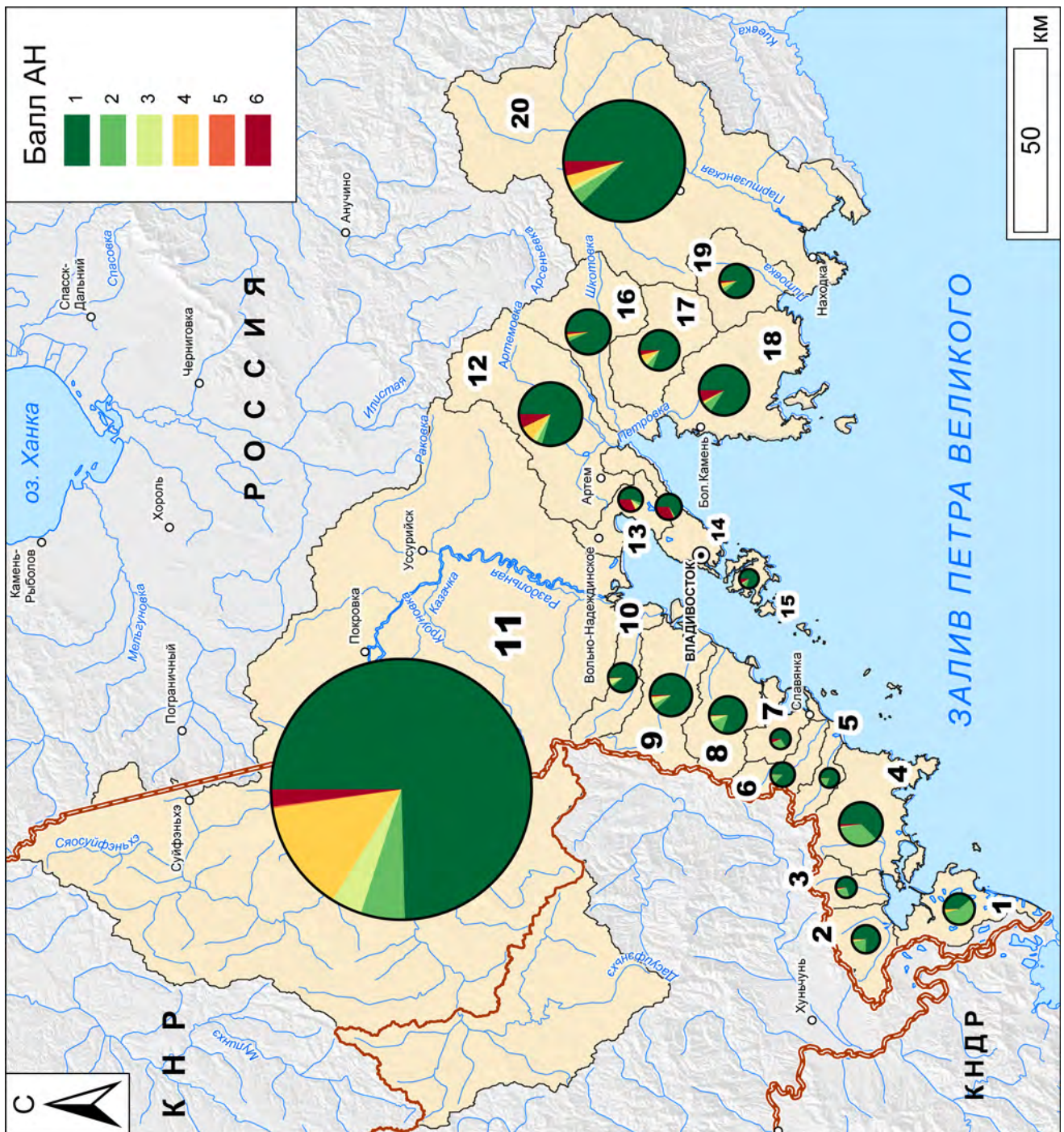


Рис. 1. Пространственное распределение площадей земель с различной степенью антропогенной нагрузки в бассейнах рек водосбора ЗПВ. Бассейны рек: 1 – Болотная, 2 – Тесная, 3 – Цукановка, 4 – Гладкая, 5 – Рязановка, 6 – Пойма, 7 – Брусья, 8 – Нарва, 9 – Барабашевка, 10 – Амба, 11 – Раздольная, 12 – Артёмовка, 13 – Богатая, 14 – Первая Речка, 15 – островные территории, 16 – Шкотовка, 17 – Суходол, 18 – Петровка, 19 – Литовка, 20 – Партизанская.

Fig. 1. Spatial distribution of land agricultural areas with varying degrees of anthropogenic load in river basins of Peter the Great Gulf. River basins: 1 – Bolotnaya, 2 – Tesnaya, 3 – Tsukanovka, 4 – Gladkaya, 5 – Ryazanovka, 6 – Poyma, 7 – Brusya, 8 – Narva, 9 – Barabashevka, 10 – Amba, 11 – Razdolnaya, 12 – Artyemovka, 13 – Bogataya, 14 – Pervaya Retchka, 15 – island territories, 16 – Shkotovka, 17 – Sukhodol, 18 – Petrovka, 19 – Litovka, 20 – Partizanskaya.

нарушенных земель. Максимальные значения (0.62 и выше) этого коэффициента отмечаются для бассейна Первой Речки и р. Богатой, где значительные площади занимают застроенные земли (рис. 2).

Средние значения коэффициента K_a (0.30–0.61) характерны, как правило, для центральной части водосбора – бассейнов рек Артёмовка, Петровка и Брусья, а также для островных территорий. В их пределах хозяйственное освоение имеет очаговый характер, но, в отличие от предыдущей категории, все же преобладают ненарушенные земли. На островных территориях такие значения коэффициента получены в большей части за счет островов Русский и Попова.

Остальные бассейны водосбора отличаются низкими значениями K_a (ниже 0.29). Примечательно, что в пределах бассейна Раздольной доля ненарушенных (или менее нарушенных) территорий в относительном выражении больше, чем антропогенно преобразованных. Ми-

нимальные значения данного коэффициента относятся к большей части бассейнов юго-запада водосбора (реки Пойма, Тесная, Болотная и Рязановка), которые отличаются минимальным хозяйственным освоением. Также в их пределах, как правило, находятся ООПТ.

Коэффициент относительной напряженности. Наиболее высокие показатели K_o (выше 0.79) получены для бассейнов рек Богатая и Первая Речка – 2.41 и 2.79 соответственно. Это указывает на явно выраженную экологическую напряженность и на то, что данная территория является несбалансированной по степени и потенциалу устойчивости природы.

В остальных бассейнах значение K_o менее 1, что означает преобладание малонарушенных типов земель. Средним по водосбору значением является 0.56.

Средние значения K_o (0.33–0.78) определены для бассейна р. Раздольной, островных территорий, а также для центральной и вос-

Таблица 1. Распределение площадей земель с различной степенью антропогенной нагрузки в пределах водосбора зал. Петра Великого (км²)

Table 1. Distribution of land areas with varying degrees of anthropogenic load within Peter the Great Gulf (km²)

Бассейн	Балл антропогенной нагрузки					
	1	2	3	4	5	6
Амба	323.2	9.9	28.7	0.6	–	2.0
Артёмовка	1 137.4	43.0	39.5	108.2	–	102.8
Барабашевка	618.7	30.9	37.0	5.8	–	8.1
Богатая	148.1	12.9	16.7	5.8	–	86.2
Болотная	160.7	237.1	–	15.3	–	0.7
Брусья	127.6	51.7	2.7	–	–	12.8
Гладкая	461.7	260.1	6.0	1.7	–	12.8
Литовка	420.8	21.5	6.2	20.1	–	10.2
Нарва	453.9	75.7	30.1	1.9	–	4.2
Островные территории	143.3	16.2	4.1	0.5	–	14.6
Партизанская	3 925.9	175.3	56.8	143.0	–	175.5
Первая Речка	197.6	3.3	1.4	2.7	–	95.1
Петровка	803.4	61.4	7.6	10.2	–	71.8
Пойма	233.6	31.4	1.3	1.2	–	0.8
Раздольная	12 680.5	930.2	651.2	2 348.3	35.7	359.2
Рязановка	148.7	31.7	0.6	1.4	–	0.7
Суходол	522.3	35.2	–	36.9	–	25.4
Тесная	260.5	73.8	4.6	5.2	–	1.0
Цукановка	144.3	51.6	–	5.5	–	4.5
Шкотовка	7251	23.3	–	19.2	–	13.2
Водосбор ЗПВ	23 637.1	2 176.2	894.4	2 733.6	35.7	1 001.5

точной частей водосбора. В частности, в бассейне р. Раздольной данный коэффициент равен 0.71. Таким образом, несмотря на то что данный бассейн отличается высокой степенью антропогенного освоения, вклад малоосвоенных территорий в K_o там все же выше.

Низкие значения K_o (менее 0.32) характерны для бассейнов рек Шкотовка, Литовка, а также юго-запада водосбора (реки Болотная, Тесная, Цукановка, Гладкая, Рязановка, Пойма, Брусся, Нарва, Барабашевка, Амба). На юго-западе водосбора значительную часть площади занимают территории ООПТ со строгим режимом охраны (национальный парк и заповедник) и с ограничениями в природопользовании. Бассейнам рек Шкотовка и Литовка присуще очаговое хозяйственное освоение.

Площадь земель со средо- и ресурсстабилизирующими функциями. Наибольшим значением показателя $P_{сф}$ отличается бассейн р. Раздольной. Значения $P_{сф}$ минимальны на юго-западе, где минимальна и площадь бас-

сейнов рек, а также на п-ове Муравьева-Амурского, где преобладают антропогенно-преобразованные земли.

Коэффициент естественной защищенности. Среднее по водосбору значение этого коэффициента $K_{ЕЗ} = 0.89$ является показателем экологически благоприятной ситуации в бассейне. В целом все речные бассейны, входящие в водосбор, благополучны по данному параметру.

Минимальны значения $K_{ЕЗ}$ в бассейнах рек Богатой и Первой Речки – 0.63 и 0.67 соответственно. Это указывает на более низкий уровень экологической защищенности, чем в других бассейнах водосбора. Однако перегруженности территории хозяйственной деятельностью здесь не наблюдается.

Средние значения $K_{ЕЗ}$ в пределах 0.68–0.91 имеют бассейны рек Раздольная, Артёмовка, Суходол и Петровка в центральной и восточной частях водосбора, а также рек Болотная, Цукановка, Гладкая и Брусся в юго-западной

Таблица 2. Показатели эколого-хозяйственного баланса для территории водосбора зал. Петра Великого
Table 2. Ecological and economical balance indicators in Peter the Great Gulf basin

Бассейн реки	K_a	K_o	$P_{сф}$, км ²	$K_{ЕЗ}$	Площадь бассейна, км ²
Амба	0.13	0.10	348.62	0.96	364.37
Артёмовка	0.54	0.78	1 240.13	0.87	1 432.35
Барабашевка	0.08	0.09	668.02	0.95	700.52
Богатая	3.49	2.41	170.96	0.63	269.94
Болотная	0.03	0.10	356.45	0.86	413.73
Брусся	0.60	0.32	170.65	0.88	194.92
Гладкая	0.16	0.08	678.36	0.91	746.73
Литовка	0.14	0.29	450.46	0.94	479.49
Нарва	0.06	0.05	533.84	0.94	566.40
Островные территории	0.61	0.47	159.36	0.89	179.12
Партизанская	0.27	0.37	4 166.54	0.93	4 486.17
Первая Речка	2.89	2.79	202.27	0.67	300.31
Петровка	0.54	0.50	862.46	0.90	955.78
Пойма	0.02	0.03	259.99	0.97	268.38
Раздольная	0.17	0.71	14 754.12	0.87	17 004.92
Рязановка	0.03	0.05	175.07	0.96	183.22
Суходол	0.29	0.51	565.95	0.91	620.60
Тесная	0.02	0.06	324.25	0.94	344.95
Цукановка	0.19	0.20	187.73	0.91	205.90
Шкотовка	0.11	0.20	752.39	0.96	781.82
Водосбор ЗПВ	0.25	0.56	27 027.62	0.89	30 499.62

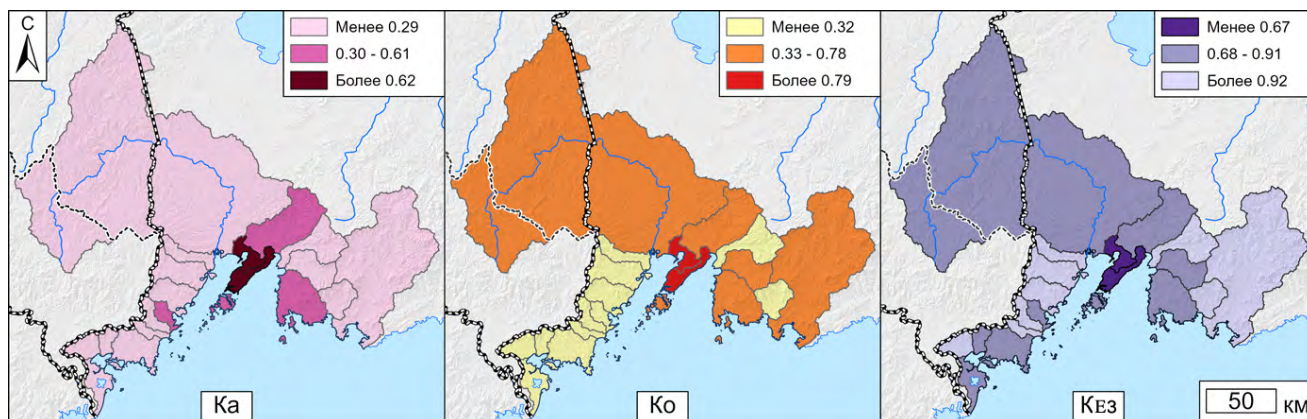


Рис. 2. Значения показателей эколого-хозяйственного баланса на территории водосбора зал. Петра Великого.
Fig. 2. Values of ecological and economical balance indicators within the Peter the Great Gulf basin.

части. Здесь, несмотря на наличие обширных площадей малонарушенных территорий, имеются относительно крупные очаги преобразованных земель.

Коэффициент более 0.92 отличает бассейны рек Партизанская, Шкотовка и Литовка, а также Барабашевка, Нарва, Тесная и Пойма (для них получен максимальный показатель $K_{E3} - 0.97$). Здесь отмечается преобладание малонарушенных территорий, при крайне малой площади, а местами полном отсутствии освоенных участков земель.

Заключение

В структуре земель водосбора зал. Петра Великого преобладают леса, в особенности на юго-западе, где расположены особо охраняемые природные территории, а также на востоке, отличающемся горным рельефом. Доминирование данного типа земель ослабевает только на п-ове Муравьева-Амурского, в среднем течении бассейна р. Раздольной и, как правило, на побережьях залива. Таким образом, большая часть земель в водосборе испытывает низкую антропогенную нагрузку.

Расчет показателей эколого-хозяйственного баланса позволил нам выявить характер экологической обстановки по всему водосбору и в отдельных его бассейнах.

Значения коэффициента абсолютной напряженности (K_a) свидетельствуют о доминировании земель с минимальной антропогенной нагрузкой во всех бассейнах водосбора, кроме двух – бассейнов рек Богатая и Первая Речка. Значения K_a для них, соответственно 3.49

и 2.89, указывают на существенное преобладание здесь земель с максимальной антропогенной нагрузкой. Самые низкие значения коэффициента характерны для юго-западной части водосбора (бассейнов рек Барабашевка, Нарва, Пойма, Рязановка, Тесная, Болотная), большая часть площади которой покрыта ООПТ.

Значения коэффициента относительной напряженности (K_o) максимальны также в бассейнах рек Богатой и Первой Речки (2.41 и 2.79 соответственно, при эталонном значении 1.0). Следовательно, эти территории находятся под значительным давлением антропогенной деятельности. Близкие к идеальному значения получены для бассейнов рек Раздольная и Артемовка, где хозяйственное освоение территории в целом не вредит потенциалу устойчивости природы. Наиболее низкие значения (ниже 0.1) характерны для юго-запада водосбора, где преобладают малоосвоенные и нетронутые территории.

Наибольшей площадью земель со средо- и ресурсостабилизирующими функциями (показатель $P_{сф}$) отличается самый крупный в водосборе бассейн – р. Раздольной, а наименьшей – бассейны сравнительно небольших рек юго-запада (таких, как Амба, Барабашевка, Рязановка и др.).

Согласно значениям коэффициента естественной защищенности (K_{E3}), наименьшую антропогенную нагрузку испытывают бассейны юго-запада водосбора, в особенности рек Амба, Пойма и Рязановка. Также высока экологическая защищенность на востоке водосбора и в бассейне р. Шкотовка, возможно в силу

преимущественно низко- и среднегорного рельефа. Наиболее уязвимы с экологической точки зрения бассейны рек Богатая и Первая Речка, из-за высокой хозяйственной освоенности.

Таким образом, было установлено, что в целом по водосбору соблюдается баланс между природным и хозяйственным потенциалами территории, но в отдельных его частях (бассейны рек Богатая и Первая Речка) уровень антропогенной нагрузки весьма высокий. Минимальный уровень антропогенного воздействия отличает бассейны рек на юго-западе водосбора (Болотная, Тесная, Цукановка, Гладкая, Рязановка, Пойма, Брусья, Нарва, Барабашевка, Амба).

Анализ эколого-хозяйственного баланса водосбора зал. Петра Великого является первым этапом работ по оценке современного геоэкологического состояния территории. В дальнейшем на основе картографо-статистического и математического анализа будет осуществлена оценка сложности природно-хозяйственных систем, в том числе в границах муниципальных образований. Данная работа является базовой для разработки и внедрения систем устойчивого природопользования в регионе, включая трансграничный аспект.

Список литературы

1. Корытный Л.М. 2017. Бассейновая концепция: от гидрологии к природопользованию. *География и природные ресурсы*, 2: 5–16. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-2\(5-16\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(5-16))
2. Рогов В.Ю., Багайников М.Л. 2020. Бассейновый подход к формированию институтов экономического развития регионов (применительно к Байкальскому региону). *Вестник ЗабГУ*, 26(5): 106–117. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2020-26-5-106-117>
3. Хортон Р.Е. 1948. *Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов*. Л.: Инстр. лит., 156 с.
4. Сочава В.Б. 1978. *Введение в учение о геосистемах*. Новосибирск: Наука, 320 с.
5. Львович М.И. 1963. *Человек и воды. Преобразование водного баланса и речного стока*. М.: Гос. изд-во геогр. лит., 568 с.
6. Коронкевич Н.И. 2003. Гидрологический трансграничный перенос в странах СНГ. В кн.: *Трансграничные проблемы СНГ*. М.: Опус, с. 22–32.
7. Субботин А.И., Дыгало В.С. 1991. *Экспериментальные гидрологические исследования в бассейне реки Москвы*. М.: Гидрометеоиздат, 262 с.
8. Ганзей С.С. 2004. *Трансграничные геосистемы юга Дальнего Востока России и северо-востока КНР*. Владивосток: Дальнаука, 231 с.
9. Бакланов П.Я. 2018. Структурные особенности и потенциал развития приграничных и трансграничных районов: теоретические аспекты. *Региональные исследования*, 3(61): 19–24. EDN: YRSDJR
10. Кочуров Б.И. 1999. *Геоэкология: экодиагностика и эколого-хозяйственный баланс территории*. Смоленск: СГУ, 154 с.
11. Mani-Perez C., Xavier L.Y., Santos C.R., Turra A. 2016. Stakeholders' perceptions of local environmental changes as a tool for impact assessment in coastal zones. *Ocean & Coastal Management*, 119: 135–145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.10.005>
12. Минников И.В., Куролап С.А. 2013. Оценка эколого-хозяйственного баланса территории Воронежской области. *Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология*, 1: 129–136. EDN: QYPDGF
13. Бодрова В.Н. 2013. Расчет и оценка эколого-хозяйственного баланса Волгоградской области в геoinформационной системе. *Проблемы региональной экологии*, 2: 43–50. EDN: QBZEPX
14. Меркулов П.И., Меркулова С.В., Варфоломеев А.Ф. 2008. Геоэкологические аспекты исследования структуры землепользования на территории республики Мордовия. *Инженерные технологии и системы*, 18(1): 123–130. EDN: SZCTRN
15. Уленгов Р.А., Уразметов И.А. 2013. Некоторые подходы к геоэкологической оценке региональных геосистем республики Татарстан. *Современные проблемы науки и образования*, 1(443): 140–147. EDN: PWBDHV
16. Панченко Е.М., Дюкарев А.Г. 2015. Оценка эколого-хозяйственного баланса Обь-Томского междуречья с учетом антропогенной нагрузки. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 326(12): 87–95. EDN: VUSPCD
17. Чупикова С.А., Ойдул Т.М., Монгуш Б.С. 2020. ГИС-анализ эколого-хозяйственного баланса кожуунов Республики Тыва. *Природные ресурсы, среда и общество*, 3(7): 59–67. <https://doi.org/10.24411/2658-4441-2020-10028>
18. Карпова Л.А. 2016. Картографическая оценка показателей эколого-хозяйственного баланса с использованием геoinформационных технологий. *Вестник СГУГиТ*, 4(36): 122–135. EDN: XQYXOJ
19. Егидарев Е.Г., Базаров К.Ю., Мишина Н.В. 2019. Современное использование земель в бассейне озера Ханка. В кн.: *Геосистемы Северо-Восточной Азии: особенности их пространственно-временных структур, районирование территории и акватории*: сб. науч. статей. Владивосток: Тихоокеан. ин-т географии, с. 197–203. URL: http://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/geosystems_2019.pdf (дата обращения: 16.06.2023).
20. Николаев В.А. 2006. *Ландшафтоведение: Семинарские и практические занятия*. М.: Геогр. факультет МГУ, 208 с.
21. Музыченко Т.К. 2022. Пространственный анализ землепользования в водосборе залива Петра Великого. *Успехи современного естествознания*, 10: 58–63. <https://doi.org/10.17513/use.37908>

References

1. Korytny L.M. **2017**. The basin concept: from hydrology to nature management. *Geography and Natural Resources*, 38(2): 111–121. <https://doi.org/10.1134/S1875372817020019>
2. Rogov V.Yu., Bagaynikov M.L. **2020**. Pool approach to the formation of institutions of economic development of the region (applicable to the Baikal region). *Bulletin of ZabGU = Transbaikalian State University Journal*, 26(5): 106–117. (In Russ.).
3. Horton R.E. **1948**. [*Erosion development of rivers and catchment areas*]. Leningrad: Inostr. Lit., 156 p. (In Russ.).
4. Sochava V.B. **1978**. [*Introduction to geosystem studies*]. Novosibirsk: Nauka, 320 p. (In Russ.).
5. Lvovich M.I. **1963**. [*Man and waters. Conversion of water balance and river runoff*]. Moscow: Gos. Izd-vo geogr. lit., 568 p. (In Russ.).
6. Koronkevich N.I. **2003**. [Transboundary hydrological transfer in CIS countries]. In: *Transgranichnye problemy SNG*. Moscow: Opus, p. 22–31. (In Russ.).
7. Subbotin A.I., Dygalo V.S. **1991**. [*Experimental hydrological studies in the Moscow River basin*]. Moscow: Gidrometeoizdat, 262 p. (In Russ.).
8. Ganzey S.S. **2004**. [*Transboundary Geosystems of the South of the Russian Far East and the Northeast of China*]. Vladivostok: Dalnauka, 231 p. (In Russ.).
9. Baklanov P.Ya. **2018**. Structural features and potential of border and transboundary areas development: theoretical aspects. *Regionalnye issledovaniya*, 3(61): 19–24. (In Russ.). EDN: YRSDJR
10. Kochurov B.I. **1999**. [*Geoecology: ecodiagnosics, ecological and economical balance of the territory*]. Smolensk: SGU, 154 p. (In Russ.).
11. Mani-Perez C., Xavier L.Y., Santos C.R., Turra A. **2016**. Stakeholders' perceptions of local environmental changes as a tool for impact assessment in coastal zones. *Ocean & Coastal Management*, 119: 135–145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.10.005>
12. Minnikov I.V., Kurolap S.A. **2013**. Assessment of ecological and economic balance in the Voronezh Oblast. *Vestnik VGU = Proceedings of Voronezh State University. Seriya: Geografiya. Geoecogiya*, 1: 129–136. (In Russ.). EDN: QYPDGF
13. Bodrova V.N. **2013**. Calculation and evaluation of ecological and economic balance of the Volgograd Region in geographical information system. *Problemy regionalnoy ekologii = Regional Environmental Issues*, 2: 43–50. (In Russ.). EDN: QBZEPX
14. Merkulov P.I., Merkulova S.V., Varfolomeev A.F. **2008**. [Geoecological aspects of the land use structure research in Mordovia Republic]. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*, 18(1): 123–130. (In Russ.). EDN: SZCTRN
15. Ulengov R.A., Urazmetov I.A. **2013**. [Approaches to geoecological evaluation of Tatarstan Republic geosystems]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, 1(443): 140–147. (In Russ.). EDN: PWBDHV
16. Panchenko E.M., Dyukarev A.G. **2015**. Assessment of ecological and economical balance of the territory of Ob-Tom interfluvium considering anthropogenic load. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 326(12): 87–95. (In Russ.). EDN: VUSPCD
17. Chupikova S.A., Oydup T.M., Mongush B.S. **2020**. GIS analysis of ecological and economic balance for kozhuuns of the Republic of Tyva. *Prirodnye resursy, sreda i obshchestvo = Natural resources, environment and society*, 3(7): 59–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2658-4441-2020-10028>
18. Karpova L.A. **2016**. Mapping evaluation indicators environmental and economic balance using GIS technology. *Vestnik SGUGIT = Vestnik of SSUGT*, 4(36): 122–135. (In Russ.). EDN: XQYXOJ
19. Egidarev E.G., Bazarov K.Yu., Mishina N.V. **2019**. Current land use in the Khanka Lake basin. In: *Geosystems of Northeast Asia: the peculiarities of their spatial-temporal structures, zoning of land and waters: coll. scientific articles*. Vladivostok: Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of RAS, p. 197–203. (In Russ.). URL: http://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/geosystems_2019.pdf (accessed 16.06.2023).
20. Nikolaev V.A. **2006**. [*Landscape science: Seminars and practical classes*]. Moscow: Geograficheskiy fakultet MGU, 208 p. (In Russ.).
21. Muzychenko T.K. **2022**. Spatial analysis of land use of the Peter the Great Gulf basin. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in current natural sciences*, 10: 58–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37908>

Об авторе

Музыченко Татьяна Константиновна (<https://orcid.org/0000-0001-8858-5979>), аспирант, младший научный сотрудник, Информационно-картографический центр, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, mtk1998@yandex.ru

Поступила 28.04.2023

Принята к публикации 15.06.2023

About the Author

Muzychenko, Tatiana K. (<https://orcid.org/0000-0001-8858-5979>), Postgraduate, Junior Researcher, Information-Cartography Center, Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, mtk1998@yandex.ru

Received 28 April 2023

Accepted 15 June 2023

© The Authors 2023. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© Авторы 2023 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

UDK 504.73;504.5

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.2.206-211>
<https://www.elibrary.ru/qffxzb>

First data on lichens from Matua Island, Far East of Russia. Families *Physciaceae* and *Caliciaceae*

Alexander K. Ezhkin^{*1}, Irina A. Galanina², Fedor A. Romanyuk¹

*E-mail: ezhkin@yandex.ru

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

²Federal Scientific Center of East Asian Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract. The presented work is based on the study of material collected by F.A. Romanyuk in the surroundings of Sarychev Peak active volcano on Matua Island, middle Kurils in 2017. Two families – *Physciaceae* and *Caliciaceae* – were sorted out from the collection and studied at first. As a result, seven species of the families were found: two species of the genus *Rinodina*, two species of the genus *Physcia*, two species of the genus *Buellia* and the species *Tetramelas chloroleucus*. All found species of the studied families were first identified for Matua Island. Matua Island is the northernmost location point in Eurasia for the species *Rinodina ascociscana*. *Buellia badia* is a new registered species for the Sakhalin Region.

Keywords: lichens, active volcano, biodiversity, Kurils, Northeast Asia

Первые сведения о лишайниках с острова Матуа, Дальний Восток России. Семейства *Physciaceae* и *Caliciaceae*

А. К. Ежкин^{*1}, И. А. Галанина², Ф.А. Романюк¹

*E-mail: ezhkin@yandex.ru

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

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

Резюме. Работа основана на исследовании материала лишайников, собранного Ф.А. Романюком в 2017 г. в окрестностях действующего вулкана Пик Сарычева на о. Матуа, средние Курилы. Образцы лишайников собраны в юго-восточной долиненной части острова, которая периодически подвержена влиянию аэральная пирокластике и слабому воздействию парогазовых эмиссий. Главная особенность современных извержений влк. Пик Сарычева – высокая эксплозивность, при которой выбрасываемый вулканом обломочный материал формирует пирокластические потоки. Кроме активности вулкана в кратере иных ее проявлений в пределах острова не отмечено. После обработки первых двух семейств лишайников *Physciaceae* и *Caliciaceae* из коллекции было выявлено 7 видов: 2 вида из рода *Rinodina*, 2 из рода *Physcia* и 2 из рода *Buellia*, а также вид *Tetramelas chloroleucus*. Все найденные виды лишайников в окрестностях вулкана впервые указываются для о. Матуа. Для *Rinodina ascociscana* о. Матуа является самой северной точкой местонахождения вида в Евразии. *Buellia badia* – новый вид для Сахалинской области.

Ключевые слова: лишайники, активный вулкан, биоразнообразие, Северо-Восточная Азия

For citation: Ezhkin A.K., Galanina I.A., Romanyuk F.A. First data on lichens from Matua Island, Far East of Russia. Families *Physciaceae* and *Caliciaceae*. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 2, pp. 206–211. (In Engl., abstr. in Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.2.206-211>; <https://www.elibrary.ru/qffxzb>

Introduction

Matua Island (N 48°05' E 153°13') relates to the middle Kuril Islands, located in the northeastern part of the Pacific Ocean. The climate of the island is cold similar to the northern Kuril Islands with a high rainfall of 1223 mm/year, a predominance of cloud cover, frequent fogs (up to 205 days per year), constant and strong winds*. Winter is relatively mild (the average monthly temperature of January is -6°C), summer is cold – the average temperature of the warmest month (August) is $+10.9^{\circ}\text{C}$. Vegetation is boreal-alpine typical for the middle Kurils [1]. Matua is a volcanic island with an area of 50 km², a length of 11 km and a width of 6.5 km. The southeastern part of the island is a rather flat surface and Sarychev Peak active volcano rises in the northwestern part with a height of 1446 m [2]. Matua Island has a rather complex structure. Young pyroclastic flows and lava largely overlap and mask the older parts of the foundation of the island where tertiary rocks lie. There are two types of lava flows on the island: relatively ancient flows (more than 1000 years) and young flows of modern volcanism (up to several hundred years) [2]. The volcano crater is the center of its historical eruptions (1765 ± 5 , 1878–1879, 1923, 1928, 1930, 1946, 1954, 1960, 1976, 2009, 2017, 2018, 2020, 2021). All of them were terminal and mostly short-lived (first hours, days). The nature of the activity of Sarychev Peak is mainly explosive and explosive-effusive – from weak eruptions of the Vulcanian type to powerful paroxysms of the Subplinian type. The main feature of modern eruptions of Sarychev Peak volcano is their high explosivity in which the clastic material emitted by the volcano forms pyroclastic flows. The products of Sarychev Peak eruptions are dominated by pyroclastics. The part of lava material is sharply subordinated. Pyroclastic formations are represented by an almost complete set of facies typical of modern explosive eruptions of andesite volcanoes (deposits of pyroclastic flows and waves, ash of the flow cloud) [3].

Besides the volcano activity in the crater, no other impacts on the environment within the island were noted. As a result, a volcanic activity influence on the ecosystem components, including lichen cover appears occasionally during eruptive

events: destruction by lava and pyroclastic flows, burying by lahar deposits, suppression by vapor-gas emissions and ashfalls [1]. This paper presents lichen material collected in the southeastern valley part of the island, which is periodically exposed to aerial pyroclastics and the weak effect of vapor-gas emissions.

Earlier only one lichen species – *Ramalina scoparia* Vain. was registered for Matua Island [4]. In this study we represent lichen species of two families – *Physciaceae* and *Caliciaceae* – sorted out from the big collection of lichens made from Matua Island. Totally 7 species were identified from the mentioned families. Two species of the genus *Rinodina*, two species of the genus *Physcia*, two species of the genus *Buellia* and *Tetramelas chloroleucus*. *Buellia badia* is new registered species for the Sakhalin Region. The collection was housed in the herbarium of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS (SAK), and Federal Scientific Center of East Asian Terrestrial Biodiversity of the Far Eastern Branch of RAS (VLA).

Material and Methods

Herbarium specimens were collected by the third author Fedor A. Romanyuk in 2017 from Matua Island (Fig. 1). Voucher specimens are de-

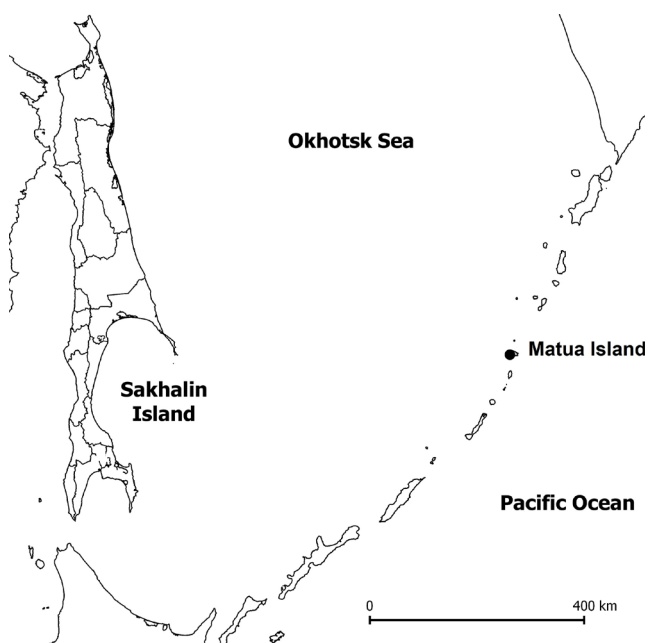


Fig. 1. Map of the study area. Matua Island.

* [USSR Climate Handbook. Issue 34. Sakhalin region]. 1990. Leningrad, 351 p. (In Russ.)

posited in the herbaria SAK and VLA. Morphological and anatomical characters were analyzed by standard light microscopical techniques. Full label data of examined specimens are provided for every species. A few publications have been used to identify the samples [5–9].

Results

The species

Buellia disciformis (Fr.) Mudd

The species is characterized by crustose thallus, rimose or areolate, slightly verrucose, superficial or sometimes immersed, thin, pale or yellowish grey, often delimited by a black prothallus. Apothecia 0.3–1.3 mm diam., lecideine type, superficial, flat or rarely convex, black. Hymenium to 100 µm, containing numerous oil droplets. Spores *Callispora*-type, 8 in asci, 1-septate, occasionally with two additional false septa, narrowly ellipsoid, sometimes slightly curved; (12)17–26(30) × (6.5)7–10(13) µm. Thallus K+ pale yellow, C–, PD+ pale yellow. The species grows commonly on deciduous and coniferous trees, very often in mixed forests. *B. disciformis* is widely distributed in the Northern Hemisphere mostly in boreal and temperate vegetation zones [10]. *B. disciformis* can be confused with *Tetramelas chloroleucus* but the latter has a positive reaction with C+ orange, *Buellia*-type spores, and absence of oil droplets in the hymenium.

Specimens examined: Matua Island, near takeoff strip, alder forests (*Duschekia fruticosa* (Rupr.) Pouzar), on bark of *D. fruticosa*, alt. 66 m, 48°03'15,25" N, 153°15'11,52" E. 12.06.2017. F.A. Romanyuk. No. 2113 (SAK); *ibid.*, Ainu Bay, sea meadow, on deadwood, alt. 10 m, 48°02'27,61" N, 153°13'41,28" E. 14.06.2017. F.A. Romanyuk. No. 2114 (SAK).

B. disciformis was found for the first time in alder forests of Matua Island on soil, deadwood and rock. The species is widely distributed in Russia [11] including Far East – Khabarovskiy, Primorskiy and Sakhalin Regions [12].

Buellia badia (Fr.) A. Massal.

The species is characterized by crustose thallus, bullate, subsquamulose becoming distinctly squamulose, without prothallus; usually deep chocolate to grey-brown, with thin epine-

cral layer of dead cells. Apothecia 0.3–0.8 mm diam., lecideine type, black, soon sessile on thallus surface. Hymenium to 100 µm, without oil droplets. Spores *Buellia*-type, 8 in asci, 1-septate, (10)12–15(20) × 6–9 µm. Thallus K–, C–, PD–. The species grows on siliceous rock, roof tiles, on other lichens. The species is registered in Europe, Northern Africa, North America, Asia, Australia, New Zealand. [10, 13]. The species is close to *Dimelaena californica* but distinguished for the presence of norstictic acid in *D. californica*. Asci of both *B. badia* and *D. californica* are different from the typical *Bacidia*-type ascus that is usually observed in *Buellia*. Marbach [14] and Kalb [15] included *B. badia* in the monotypic genus *Monerolechia*, arguing that its ascus structure is significantly different from *Buellia*.

Specimens examined: Matua Island, Ainu Bay, sea meadow, on rock, alt. 10 m, 48°02'27,61" N, 153°13'41,28" E. 14.06.2017. F.A. Romanyuk. No. 2117 (SAK).

B. badia was found in sea meadow of Matua Island on rock. The species is widely distributed in Russia [11] including Arctic and Northern Far East. The species is noted in the Sakhalin Region for the first time.

Physcia caesia (Hoffm.) Fűrnr.

The species is characterized by orbicular to irregular thallus to 7 cm diam., grey – bluish grey, white-dotted, lower surface grey – dark brown with dark rhizines, soralia numerous to 2 mm diam., blue-grey, usually laminal, often capitate and crater-like or rarely marginal and lip-shaped, in older parts soralia often cover the whole upper surface. Apothecia rare, disc to 2 mm, black, grey-pruinose. Ascospores 17–25 × 6–11 µm. Cortex and medulla K+ yellow, PD–. The species grows commonly on calcareous and nitrogen-rich rocks surfaces, including tops of walls, concrete roofs, bird's perching rocks by the sea and lakes, rarely on wood and bases of trees. The species is widely distributed within the arctic, boreal and temperate vegetation zones [10, 13, 16]. *P. caesia* resembles *P. subalbinea* but the species has soralia on top of the lobes and the latter has lip-shaped soralia at lobe tips. The species close to *P. dubia* but the latter is distinguished by a K– medulla, terminal lip-shaped soralia, has narrower and more fragile lobes.

Specimens examined: Matua Island, Yurlova Cape, sea meadow, on soil, alt. 20 m, 48°02'36,70" N, 153°16'05,19" E. 27.06.2017. F.A. Romanyuk. No. 2108 (SAK); *ibid.*, on deadwood. F.A. Romanyuk. No. 2109 (SAK); *ibid.*, Ainu Bay, sea meadow, on deadwood, alt. 10 m, 48°02'27,61" N, 153°13'41,28" E. 14.06.2017. F.A. Romanyuk. No. 2110 (SAK); *ibid.*, on rock. F.A. Romanyuk. No. 2111 (SAK).

P. caesia was found in sea meadow of Matua Island on soil, deadwood and rock. The species is widely distributed in Russia [11] including Far East – Khabarovskiy, Primorskiy and Sakhalin Regions [12, 17].

Physcia dubia (Hoffm.) Lettau

The species is characterized by orbicular or irregular thallus to 5 cm diam., loosely adnate, grey-white to darkish grey, usually nonpruinose, with sorediate lobes often ascending and usually radiating, soralia terminal, lip-shaped, whitish to dark grey. Lower surface grey – dark brown with dark rhizines. Matua material is sterile. Cortex K+ yellow (atranorin), medulla K–, PD–. This species usually grows on various types of non-calcareous rocks, concrete surfaces and even on asphalt, roofs, bird-perch stones; dust-impregnated bark and wood in parks and roadsides. The species is widely distributed in boreal and temperate areas of the Northern Hemisphere. It is also known from the southern cold temperate part of South America [12, 13, 16]. *P. dubia* is close to *P. tenella* but lacks the marginal cilia of that species. *P. dubia* also resembles *P. caesia* but distinguished from the species with lip-shaped soralia and the K– medulla.

Specimens examined: Matua Island, Dvoynaya Bay, sea meadow, on rock, alt. 20 m, 48°04'39,07" N, 153°15'45,64" E. 13.06.2017. F.A. Romanyuk. No. 2112 (SAK).

P. dubia was found in sea meadow of Matua Island on rock. The species is widely distributed in Russia [11] including Far East – Khabarovskiy, Primorskiy and Sakhalin Regions [11, 12, 18].

Rinodina ascociscana (Tuck.) Tuck.

The species is characterized by large *Physcia*-type spores (22.5)30.0–32.0(39.5) × (10.5)13.5–14.5(17.0) μm of Type A development, ochraceous to brownish, glossy thallus and thalline margin of apothecia often radially cracked. This

species usually grows on bark of coniferous and deciduous trees in mixed and deciduous forests in the south of the Russian Far East, Korea and Japan [9, 19, 20]. *Rinodina ascociscana* can be confused with *R. turfacea* (Wahlenb.) Körb. and differs in its ochraceous to brownish, glossy thallus lacking sphaerophorin and thalline margin of apothecia often radially cracked [7].

Specimens examined: Matua Island, Yurlova Cape, sea meadow, on plant debris and mosses in log, alt. 20 m, 48°02'36,70" N, 153°16'05,19" E. 27.06.2017. F.A. Romanyuk. (VLA).

R. ascociscana was found in sea meadow of Matua Island on plant debris and mosses on log. It is the northernmost point where this species is found in Eurasia. In Russia, *R. ascociscana* was recently found in Primorye Territory, Kuril Islands and Sakhalin Island [9, 19, 20]. It was found on Honshu Island in Japan, on Jeju Island in Korea and in eastern North America [7, 9, 21].

Rinodina turfacea (Wahlenb.) Körb.

Rinodina turfacea is characterized by brownish-grey thallus, large apothecia with concave or plane disc, persistent thalline margin containing crystals of sphaerophorin, *Physcia*-type spores (22.0)27.5–29.5(35.0) × (10.5)12.5–13.5(15.5) μm of Type A development [7]. *R. turfacea* can be confused with *R. cinereovirens* Vain. But *R. cinereovirens* differs by more broadly ellipsoid spores with more bluntly rounded apices. Furthermore, *R. cinereovirens* inhabits bark and wood, in contrast to *R. turfacea* which typically grows on decaying ground vegetation, less often on wood in oroarctic environments in North America [9].

Specimens examined: Matua Island, Yurlova Cape, sea meadow, on plant debris, alt. 34 m, 48°04'14,29" N, 153°15'52,32" E. 11.06.2017. F.A. Romanyuk. (VLA); *ibid.*, Ainu Bay, sea meadow, on deadwood, alt. 10 m, 48°02'27,61" N, 153°13'41,28" E. 14.06.2017. F.A. Romanyuk. (VLA).

Rinodina turfacea was found in sea meadow of Matua Island on deadwood and plant debris. It is mainly northern circumpolar species restricted to the Arctic and Subarctic territories in Eurasia from Scandinavia to Kamchatka Peninsula with southernmost locations in the Mongolian and Chinese parts of the Altai [9, 12, 20, 22–29]. In North America, it is common in the Arctic, southward to

the Rocky Mountains in Montana and Wyoming, also in the state of Colorado [7].

Tetramelas chloroleucus (Körb.) A. Nordin

The species is characterized by crustose thallus, granular areolate, moderately thickened, ±continuous or becoming dispersed; prothallus: absent, usually dark grey to pale grey, fresh material is often greenish. Apothecia 0.3–0.8 mm diam., lecideine type, black, soon sessile on thallus surface. Hymenium to 100 µm, with sparse oil droplets. Spores *Callispora*-type, 8 in asci, 1-septate, (10)16–21(23) × 6–9(11) µm. Thallus K+ yellow, C+ orange or C–, PD–. The species grows on coniferous and deciduous trees in montane and subalpine forests. The species is widely distributed throughout North America, Europe and Asia [13]. The species is close to *Buellia erubescens*. Both species have comparatively narrow spores of the *Callispora*-type but *B. erubescens* has broadly ellipsoid spores and normally K+ red reaction (crystals) with thallus.

Specimens examined: Matua Island, near takeoff strip, alder forests (*D. fruticosa*), on bark of *D. fruticosa*, alt. 66 m, 48°03'15,25" N, 153°15'11,52" E. 12.06.2017. F.A. Romanyuk. No. 2115, 2116 (SAK).

Tetramelas chloroleucus was found in alder forests of Matua Island on bark of *D. fruticosa*. The species is widely distributed in Asian part of Russia including south of Far East [11].

Conclusion

The revealed species of the families *Physciaceae* and *Caliciaceae* collected on Sarychev Peak volcano and in its surroundings mostly belong to widespread and common species in the region. No rare or threatened species was found among sorted lichens of the investigated families. All studied lichens can be considered as pioneer species which inhabit occasionally rejuvenated substrates which periodically exposed to eruptive events: destruction by lava and pyroclastic flows, burying by lahar deposits, suppression by vapor-gas emissions and ash falls. The main substrates of the collected lichens were deadwood, soil, rocks and bark of *Duschekia fruticosa* widespread on the island. The effect of vapor-gas emissions is rather weak on lichen cover in the place – the

southeastern valley part of Matua Island. The main damage source on lichens in surroundings of Sarychev Peak active volcano is exposure by aerial pyroclastics from activity of the crater. No other impacts on the environment within the island were noted.

It is worth noting that volcano islands of the Middle Kurils are still poorly studied. *Buellia badia* which is new species for Sakhalin Island is good example of the evidence of unexplored territory and a reason to continue investigation.

References

1. Grishin S.Yu., Terekhina N.V. **2012**. Plant cover of Matua Island (Kuril Islands). *Komarovskiye Chteniya*, 59: 188–229. (In Russ.).
2. Gorshkov G.S. **1967**. *Vulkanizm Kurilskoy ostrovnoy dugi [Volcanism of the Kuril Island Arc]*. Moscow: Nauka, 280 p. (In Russ.).
3. Degtarev A.V., Rybin A.V., Razzhigaeva N.G. **2011**. Istoricheskie izverzheniya vulkana Pik Sarycheva (o. Matua, Tsentralnye Kurilskie ostrova) [Historical eruptions of Sarychev Peak volcano (Matua Island, Central Kuril Islands)]. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*, 1(17): 102–119. (In Russ.).
4. Joneson S., Kashiwadani H., Tschabanenko S., Gage S. **2004**. *Ramalina* of the Kuril Islands. *The Bryologist*, 107(1): 98–106. [https://doi.org/10.1639/0007-2745\(2004\)107\[98:rotki\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1639/0007-2745(2004)107[98:rotki]2.0.co;2)
5. Tolpysheva T.Yu. **2008**. *Buellia*. In: [Handbook of the lichens of Russia]. Vol. 10. St. Petersburg: Nauka, p. 149–180. (In Russ.).
6. Urbanavichene I.N. **2008**. *Physcia*. In: [Handbook of the lichens of Russia]. Vol. 10. St. Petersburg: Nauka, p. 258–276. (In Russ.).
7. Sheard J.W. **2010**. *The lichen genus Rinodina* (Ach.) Gray (Lecanoromycetidae, Physciaceae) in North America, North of Mexico. Ottawa: NRC Research Press, 246 p.
8. Sheard J.W. **2018**. A synopsis and new key to the species of *Rinodina* (Ach.) Gray (Physciaceae, lichenized Ascomycetes) presently recognized in North America. *Herzogia*, 31(1): 395–423. <https://doi.org/10.13158/hea.31.1.2018.395>
9. Sheard J.W., Ezhkin A.K., Galanina I.A., Himelbrant D.E., Kuznetsova E., Shimizu A., Stepanchikova I., Thor G., Tønsberg T., Yakovchenko L.S., Spribille T. **2017**. The lichen genus *Rinodina* (Physciaceae, Telochistales) in northeastern Asia. *The Lichenologist*, 49(6): 617–672. <https://doi.org/10.1017/S0024282917000536>
10. Smith C.W., Aptroot A., Coppins B.J., Fletcher A., Gilbert O.L., James P.W., Wolseley P.A. (eds). **2009**. *The Lichens of Great Britain and Ireland*. London: British Lichen Society, 1046 p.

11. [A checklist of the lichen flora of Russia]. **2010**. St. Petersburg: Nauka, 194 p. (In Russ. with Engl. introduction).
12. Tchabanenko S.I. **2002**. *Konspekt flory lishainikov yuga rossiiskogo Dalnego Vostoka* [Checklist of the lichen flora of the South of the Russian Far East]. Vladivostok: Dal' nauka, 232 p. (In Russ.).
13. Nash T.H., Ryan B.D., Gries C., Bungartz F. (eds) **2002**. *Lichen flora of the Greater Sonoran Desert Region*. Vol. 1. *Lichens Unlimited*. Arizona State University, 532 p.
14. Marbach B. **2000**. *Corticole und lignicole Arten der Flechtengattung Buellia sensu lato in den Subtropen und Tropen*. J. Cramer, Berlin, Stuttgart, 384 p. (Bibliotheca Lichenologica; 74).
15. Kalb K. **2004**. New or otherwise interesting lichens. II. *Bibliotheca Lichenologica*, 88: 301–329.
16. Stenroos S., Velmala S., Pykälä J., Ahti T. (eds). **2016**. *Lichens of Finland*. Helsinki: Botanical Museum, Finnish Museum of Natural History, 896 p. (Norrlinia; 30).
17. Ezhkin A.K. **2020**. Lichens of the Natural Monument “Highlands of Mt. Chekhov”, Sakhalin Island. *Biota i sreda zapovednykh territoriy*, 4: 25–38. (In Russ. with Engl. introduction).
18. Ezhkin A.K., Galanina I.A. **2016**. Epiphytic lichens of deciduous trees in the city of Yuzhno-Sakhalinsk and specifics of their distribution by sensitivity to the anthropogenic impact. *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo tsentra = Bull. of the North-East Scientific Center FEB RAS*, 4: 95–107. (In Russ., abstr. in Engl.).
19. Galanina I.A., Ezhkin A.K. **2019**. Genus *Rinodina* of the Kuril Islands (Far East Russia). *Turczaninowia*, 22(4): 5–16. <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.22.4.1>
20. Galanina I.A., Ezhkin A.K., Ohmura Y. **2021**. The genus *Rinodina* (Physciaceae, lichenized Ascomycota) of the Sakhalin Island (Far East Russia). *Botanicheskii zhurnal*, 106(2): 147–165. <https://doi.org/10.31857/S0006813621020034>
21. Lendemer J.C., Tripp E.A., Sheard J. **2014**. A review of *Rinodina* (Physciaceae) in Great Smoky Mountains National Park highlights the growing significance of this “island of biodiversity” in Eastern North America. *Bryologist*, 117: 259–281. <https://doi.org/10.1639/0007-2745-117.3.259>
22. Schubert R., Klement O. **1971**. Beitrag zur Flechtenflora der Mongolischen Volksrepublik. *Feddes Reportorium*, 82(3–4): 187–262. <https://doi.org/10.1002/fedr.4910820302>
23. Afonina O.M., Bredkina L.I., Makarova I.I. **1980**. Distribution of lichens and mosses in forest-steppe landscapes in the middle reaches of Indigurka River. *Botanicheskii Zhurnal*, 65 (1): 66–82. (In Russ.).
24. Abbas A., Mijit H., Tumur A., Jinong W. **2001**. A checklist of the lichens of Xinjiang, China. *Harvard Papers in Botany*, 5: 359–370.
25. Davydov E.A. **2001**. Annotated list of lichens of Western part of Altai (Russia). *Novosti sistematiki nizshikh rasteniy*, 35: 140–161. (In Russ.).
26. Mayrhofer H., Moberg R. **2002**. *Rinodina*. In: *Nordic Lichen Flora*, 2: 41–69.
27. Himelbrant D.E., Stepanchikova I.S., Kuznetsova E.S. **2009**. Lichens of some shrubs and dwarf shrubs of Kamchatka Peninsula. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 43: 150–171. <https://doi.org/10.31111/nsnr/2009.43.150>
28. Skirina I.F. **2012**. An annotated list of lichens of Bolshehekhtsirsky Nature Reserve (Khabarovsk Territory). *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 46: 202–216. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.31111/nsnr/2012.46.202>
29. Galanina I.A., Yakovchenko L.S., Zheludeva E.V., Ohmura Y. **2021**. The genus *Rinodina* (Physciaceae, lichenized Ascomycota) in the Magadan Region (Far East of Russia). *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 55(1): 97–119. <https://doi.org/10.31111/nsnr/2021.55.1.97>

Об авторах

Ежкин Александр Константинович (<https://orcid.org/0000-0002-2242-2250>), кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии растений и геоэкологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, ezhkin@yandex.ru

Галанина Ирина Александровна (<https://orcid.org/0000-0001-9029-2470>), кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории ботаники, Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, gairka@yandex.ru

Романюк Федор Александрович (<https://orcid.org/0000-0003-1581-1503>), младший научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности, Институт морской геологии геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, f.romanuk@imgg.ru

About the Authors

Ezhkin, Alexander K. (<https://orcid.org/0000-0002-2242-2250>), Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher of the Laboratory of plant ecology and geoecology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, ezhkin@yandex.ru

Galanina, Irina A. (<https://orcid.org/0000-0001-9029-2470>), Senior Researcher, Chief of the Laboratory of botany, Federal Scientific Center of East Asian Terrestrial Biodiversity of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, gairka@yandex.ru

Romanyuk, Fedor A. (<https://orcid.org/0000-0003-1581-1503>), Junior Researcher of the Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, f.romanuk@imgg.ru

Поступила 14.02.2023

Принята к публикации 02.04.2023

Received 14 February 2023

Accepted 2 April 2023

© Авторы 2023 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2023. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

МОНИТОРИНГ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ MONITORING OF GEOLOGICAL HAZARDS

УДК 551.21

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.212-218>
<https://www.elibrary.ru/xcqvio>

Эксплозивная активность вулкана Чикурачки в январе–феврале 2023 г. (о. Парамушир, Северные Курильские острова)

*А. В. Дегтерев**, *М. В. Чибисова*

**E-mail: d_a88@mail.ru*

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

Резюме. Приводятся первые сведения об извержении влк. Чикурачки в 2023 г. (о. Парамушир, Северные Курильские о-ва), полученные на основе спутниковых и визуальных данных. В период с 28 января по 8 февраля 2023 г. наблюдалось очередное эксплозивное извержение влк. Чикурачки, которое по своему характеру было аналогично предыдущим 5 эпизодам эксплозивной активности вулкана, происходившим на протяжении 2022 г. Деятельность вулкана характеризовалась проявлением умеренной вулканской активности: наблюдались как отдельные взрывы, так и фазы относительно спокойной и продолжительной (несколько часов) эмиссии пепло-газовой смеси. Всего в период с 28.01.23 по 8.02.2023 зафиксировано 8 выбросов на высоту от 2.5 до 4.5 км н.у.м. Пепловые шлейфы были направлены преимущественно на восток и северо-восток, их протяженность составляла 100–155 км. Учитывая высокую активность и эксплозивный характер деятельности влк. Чикурачки, при которых формируются протяженные пепловые шлейфы, вулкан является потенциально опасным для международных и местных авиалиний.

Ключевые слова: Курильские острова, вулкан Чикурачки, извержение, Парамушир, вулканический пепел, спутниковые данные

Explosive activity of Chikurachki volcano in January–February of 2023 (Paramushir Island, Northern Kuril Islands)

*Artem V. Degterev**, *Marina V. Chibisova*

**E-mail: d_a88@mail.ru*

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

Abstract. The first information about the eruption of Chikurachki volcano in 2023 (Paramushir Island, Northern Kuril Islands) obtained on the basis of satellite and visual data is presented. In the period from January 28 to February 8, 2023, another explosive eruption of Chikurachki volcano was observed, which in its nature was similar to the previous five episodes of explosive activity of the volcano that occurred throughout 2022. The volcano activity was characterized by the manifestation of moderate volcanic activity: both separate explosions and phases of a relatively calm and prolonged (several hours) emission of an ash-gas mixture were observed. In total, in the period from January 28 to February of 2023, eight ejections were recorded at a height of 2.5 to 4.5 km a.s.l. Ash plumes were directed mainly to the east and northeast, their length was 100–155 km. Given the high activity and explosive nature of the activities of Chikurachki volcano in recent years, during which extended ash plumes form, the volcano is potentially dangerous for international and local airlines.

Keywords: Kuril Islands, Chikurachki volcano, eruption, Paramushir, volcanic ash, satellite data

Для цитирования: Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Эксплозивная активность вулкана Чикурачки в январе-феврале 2023 г. (о. Парамушир, Северные Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 2, с. 212–218. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.212-218>; <https://www.elibrary.ru/xcqvio>

Финансирование и благодарности

Работа выполнена в соответствии с планом НИР лаборатории вулканологии и вулканопасности Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (№ 121030100168, рук. А.В. Дегтерев).

Авторы признательны жителю г. Северо-Курильск С.П. Лакомову за предоставленные фотоматериалы и данные об извержении вулкана Чикурачки в 2023 г.

Введение

Вулкан Чикурачки, расположенный в южной части о. Парамушир (Северные Курильские о-ва), заметно активизировался в последние годы. С января по октябрь 2022 г. по спутниковым и визуальным данным зафиксировано 5 эпизодов эксплозивной активности: 30 января – 3 февраля, 23–24 июня, 30 июня – 1 июля, 21 августа – 2 сентября, 13–20 октября [1]. По своему характеру и продолжительности рассматриваемые события аналогичны предыдущим извержениям вулкана, имевшим место в текущем столетии (2002, 2003, 2005, 2007, 2008, 2015, 2016, 2022 гг.). Отмечались как единичные выбросы, так и серии эксплозий на высоту 2–5 км н.у.м., а также периоды стабильной эмиссии пепло-газовой смеси. Пепловые шлейфы и облака распространялись преимущественно в восточном, южном, юго-восточном, северо-восточном и юго-западном направлениях, их протяженность составляла 250–790 км, а площадь достигала 25 408 км² [1].

В период с 28 января по 8 февраля 2023 г. зафиксирована очередная активизация влк. Чикурачки, первые сведения о которой представлены в настоящем сообщении.

Материалы и методы. Из-за удаленности и труднодоступности влк. Чикурачки, отсутствия наземных пунктов контроля вулканической деятельности (сейсмостанций, наклономеров, IP-видеокамер и т.д.) наблюдение за активностью вулкана осуществлялось на основе данных дистанционного зондирования: использовались космические снимки NOAA-18/19 (AVHRR/POES), Terra и Aqua (MODIS),

For citation: Degterev A.V., Chibisova M.V. Explosive activity of Chikurachki volcano in January–February of 2023 (Paramushir Island, Northern Kuril Islands). *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 2, pp. 212–218. (In Russ., abstr. in Engl). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.212-218>; <https://www.elibrary.ru/xcqvio>

Funding and acknowledgements

The work was carried out in accordance with the research plan of the laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS (no. 121030100168-3, headed by Artem V. Degterev).

The Authors are grateful to S.P. Lakomov, a resident of the city of Severo-Kurilsk, for providing photographic materials and data on the eruption of Chikurachki volcano in 2023.

SuomiNPP и JPSS-1 (VIIRS), Sentinel-2 и Himawari-8/9 по разности инфракрасных каналов 10–12 мкм (4–5 каналы AVHRR, 31–32 каналы MODIS, 14–15 каналы Himawari-8/9, VIIRS), обрабатываемые информационными системами «ВЕГА-Science» [2], и «Дистанционный мониторинг вулканов Камчатки и Курил» VolSatView [3]. В работе использованы также данные по высоте выбросов влк. Чикурачки от VAAC (Volcanic Ash Advisory Center) Токио и материалы SVERT (Sakhalin Volcanic Eruption Response Team). Кроме того, привлекались сведения, предоставленные очевидцами (фото- и видеоматериалы, описательные данные).

Общие сведения о вулкане Чикурачки.

Чикурачки (абс. выс. 1816 м), самый высокий вулкан о. Парамушир и один из самых активных вулканов Курильских островов, расположен в северной части хр. Карпинского (рис. 1). Его постройка, как впервые было установлено Г.С. Горшковым [4], состоит из древнего лавового основания, предположительно плейстоценового возраста, и насаженного на него молодого стратовулканического конуса (отн. выс. 250–300 м). На его вершине расположен неглубокий кратер, в юго-западной части которого находится колодцеобразная бокка [5], являющаяся центром последних извержений влк. Чикурачки. Вещественный состав пород вулкана представлен преимущественно базальтами умеренно-калиевой серии, значительно менее распространены андезибазальты [4, 5].

Исторические извержения влк. Чикурачки происходили в 1853–1859, 1958, 1961, 1964, 1973, 1986, 2002, 2003, 2005, 2007 (2 события),

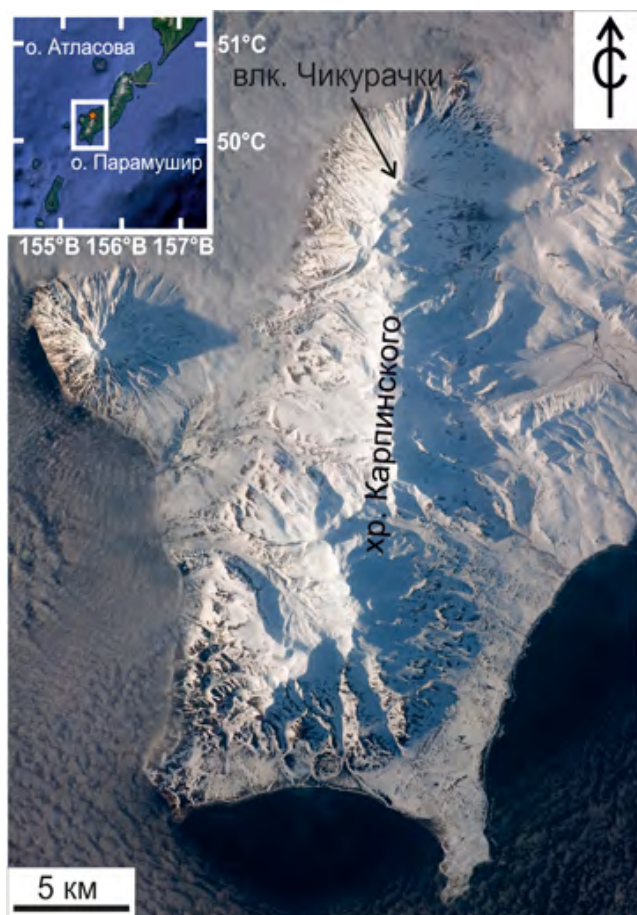


Рис. 1. Географическое положение вулкана Чикурачки. Использован фотоснимок южной части о. Парамушир, сделанный экипажем 23 экспедиции NASA 12 мая 2010 г. (<https://earthobservatory.nasa.gov/images/44578/southern-paramushir-island-kuril-chain-russia>).

Fig. 1. Geographical position of Chikurachki volcano. Image of the southern part of Paramushir Island taken by the NASA Expedition 23 crew on May 12, 2010 (<https://earthobservatory.nasa.gov/images/44578/southern-paramushir-island-kuril-chain-russia>), was used.

2008, 2015, 2016, 2022 гг. [1, 4, 5]. Преобладали умеренные и слабые (VEI 1-2) вулканические и стромболианские извержения; дважды, в 1853 и 1986 гг., имели место мощные плиннианские события – исключительно редкое явление для вулкана, продуцирующего магмы основного состава [5–7]. Более подробные сведения о влк. Чикурачки можно найти в [4–7].

Результаты наблюдений

После извержения 13–20 октября 2022 г. влк. Чикурачки находился в состоянии покоя. Судя по сообщениям местных жителей и фотоснимкам, признаков повышенной активности вулкана не наблюдалось. Конус был по-

крыт чистым белым снегом, без следов вулканического пепла; над кратером периодически отмечалось слабое парение (в ноябре–декабре 2022 г.) (рис. 2).

Очередная активизация вулкана началась 28 января. Первое информационное сообщение было получено от VACC Токио (https://www.data.jma.go.jp/vaac/data/TextData/2023/20230128_29036000_0001_Text.html). В течение дня, по данным дистанционного зондирования, было зарегистрировано 3 выброса на высоту 2.5–4 км н.у.м. (рис. 3 а).

Первый взрыв, зафиксированный по спутниковым снимкам Himawari-8/9, произошел в 06:00–06:10 UTC (здесь и далее приводится время по UTC, Coordinated Universal Time – всемирное координированное время). Высота пепловой колонны, по оценке VACC Токио, составляла 2.5–3 км н.у.м., протяженность пеплового шлейфа, распространяющегося в северо-восточном направлении (здесь и далее используется аэронавигационное обозначение направления движения пепловых облаков), достигала 70 км (по состоянию на 09:07 UTC) (NOAA-19). Следующий выброс отмечен в 18:30 UTC (Himawari-8/9). По данным VACC Токио, он имел аналогичную высоту – 2.5–3 км н.у.м. (рис. 3 а). Эруптивный шлейф протягивался в юго-восточном направлении на 65 км от вулкана. Последняя за этот день эксплозия зарегистрирована в 22:50 UTC (~4 км н.у.м.). Связанный с ней пепловый шлейф распространялся сначала в восток-юго-восточном направлении, а затем поменял направление на восточное (максимальное удаление от вулкана достигало 120 км, площадь ~ 2000 км², по данным NOAA-19 на 08:56 UTC 29 января 2023 г.). В это же время, по сообщению очевидцев и их видеозаписям, в районе бывшего пос. Шелехово наблюдался умеренный пеплопад (устное сообщение С.П. Лакомова). Из-за плохой видимости в районе поселка (низкая облачность, снег) деталей извержения очевидцы не видели. По спутниковым данным поступление материала наблюдалось примерно до 11:00 UTC 29 января.

31 января 03:00 UTC произошел выброс на высоту 3.5 км н.у.м. (VACC Токио) (рис. 3 а). Эруптивный шлейф имел низкую концентрацию пеплового материала и рас-

пространялся преимущественно на восток. К 08:33 UTC его протяженность достигала 155 км (по данным NOAA-19). В последующие часы наблюдалось относительно слабое, пульсирующее истечение пепло-газовой смеси, продолжающей расплываться преимущественно в восточном направлении.

Очередной выброс, выявленный по снимкам Himawari-8/9, зафиксирован 31.01.2023 в 14:00 UTC (~3 км н.у.м.). Пепловый шлейф от него распространялся сначала на юго-восток (30 км, 14:46 UTC), а затем менял направление на восток-северо-восточное. По состоянию на 22:29 UTC протяженность шлейфа составляла 90 км (NOAA-19). Поступление пепла, по данным VIIRS (NPP), наблюдалось до 03:03 UTC 1 февраля (рис. 4). В этот день (1 февраля

по сахалинскому времени) активность вулкана удалось наблюдать группе жителей Северо-Курильска, продвигавшихся на снегоходах по перевалу Кругозорный и охотоморскому побережью к пос. Шелехово.

На сделанных ими фотоснимках запечатлена умеренная эксплозивная активность с относительно спокойным истечением пепло-газовой смеси на высоту 600–800 м над кратером (рис. 5). В аналогичном режиме влк. Чикурачки действовал до следующего дня включительно. По устному сообщению и анализу фото- и видеоматериалов очевидцев из снегоходной группы, прибывших в пос. Шелехово, деятельность вулкана не прекращалась, в окрестностях выпадал тонкий, характерного шоколадного оттенка пепел. 2–4 февраля вулкан был закрыт облачностью, признаков активной вулканической деятельности не наблюдалось.

5 февраля активность вулкана возобновилась: в 15:40 UTC произошел выброс на высоту 4–4.5 км н.у.м., шлейф от него простирался в северном направлении (рис. 3 а). По спутниковым данным VIIRS (JPSS1), к 16:31 UTC его протяженность составляла 45 км. Поступление пеплового материала продолжалось до 21:30 UTC (Himawari-8/9). К этому времени эруптивный шлейф изменил направление и распространялся преимущественно в северо-восточном направлении (~85 км).

6 февраля в 14:10 UTC отмечен выброс на высоту 3 км н.у.м. (Himawari-8/9) (рис. 3 а). Пепловый шлейф от нее расплывался в юго-юго-западном направлении на 70 км от вулкана.

7 февраля в 05:40 UTC наблюдалась финальная эксплозия влк. Чикурачки на высоту 2.5 км н.у.м., зафиксированная по снимкам Himawari-8/9 (VACC Токио). Пепловый



Рис. 2. Вулкан Чикурачки, 20 ноября 2022 г. Фото С. Распопова
Fig. 2. Chikurachki volcano, November 20, 2022. Photo by S. Raspopov

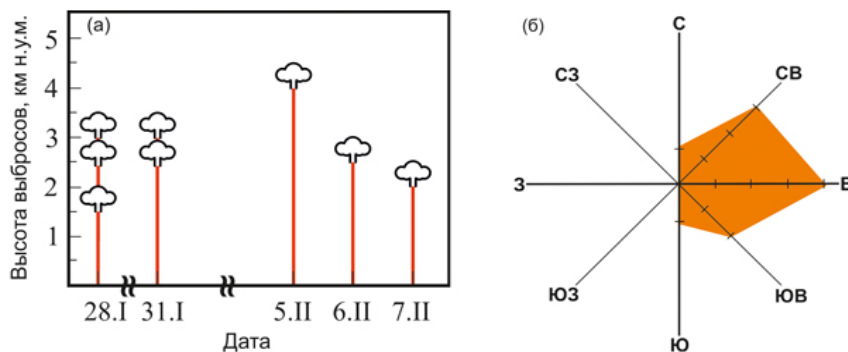


Рис. 3. Хронология вулканических взрывов (а) и основные направления перемещения пепловых шлейфов (б) вулкана Чикурачки за период с 28 января по 7 февраля 2023 г.
Fig. 3. Chronology of volcanic explosions (a) and main directions of propagation of ash plumes (b) of Chikurachki volcano for the period from January 28 to February 7, 2023.

шлейф распространялся в восток-северо-восточном направлении на 50 км от вулкана (по состоянию на 07:20 UTC). Затем направление шлейфа изменилось на восток-юго-восточное, его общая протяженность достигала ~100 км.

8 февраля наблюдалась повышенная парогазовая активность с небольшим количеством пепла. В последующие дни отмечалась лишь парогазовая эмиссия, извержение закончилось.



Рис. 4. Пепловый шлейф вулкана Чикурачки 1 февраля 2023 г. в 00:22 UTC на спутниковом снимке VIIRS (NPP).
Fig. 4. Ash plume of Chikurachki volcano on February 1, 2023 at 00:22 UTC on the VIIRS (NPP) satellite image.



Рис. 5. Эксплозивная активность вулкана Чикурачки 31 января (1 февраля – по Сахалинскому времени) 2023 г. (вид с северо-востока). Фото С. Распопова
Fig. 5. Explosive activity of Chikurachki volcano on January 31 (February 1 – Sakhalin time), 2023 (view from the northeast). Photo by S. Raspopov

Выводы

1. В период с 28 января по 8 февраля 2023 г. наблюдалось очередное эксплозивное извержение влк. Чикурачки на о. Парамушир. По своему характеру и параметрам оно соответствовало предыдущим 5 эпизодам эксплозивной активности вулкана, происходившим в 2022 г. (30 января – 3 февраля, 23–24 июня, 30 июня – 1 июля, 21 августа – 2 сентября, 13–20 октября). Деятельность вулкана характеризовалась проявлением умеренной вулканической активности: наблюдались как отдельные взрывы, так и фазы относительно спокойной и продолжительной (несколько часов) эмиссии пепло-газовой смеси. Всего в период с 28 января по 8 февраля зафиксировано 8 выбросов на высоту от 2.5 до 4.5 км н.у.м. Пепловые шлейфы протяженностью 100–155 км были направлены преимущественно на восток и северо-восток.

2. Учитывая высокую активность влк. Чикурачки и наличие в его современной эруптивной истории регулярно повторяющихся мощных плиннианских извержений, мониторингу активности вулкана следует уделять особое внимание. В частности, требуется организация постоянных геофизических и визуальных наблюдений с возможностью их фиксации и передачи актуальной информации о состоянии вулcano-магматической системы. Кроме того, необходимо продолжение палеовулканологических работ, направленных на реконструкцию эруптивной истории вулкана и составление долгосрочного прогноза его активности.

3. Используемые в практике деятельности SVERT информационные системы «ВЕГА-Science» и «Дистанционный мониторинг вулканов Камчатки и Курил» VolSatView являются эффективными и удобными инструментами мониторинга эксплозивных событий.

Список литературы

1. Дегтерев А.В., Чибисова М.В. 2022. Эксплозивная активность вулкана Чикурачки в январе–октябре 2022 г. (о. Парамушир, Северные Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 6(4): 328–338. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.328-338>; <https://www.elibrary.ru/qvwlny>
2. Лупян Е.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. 2015. Центр коллективного пользования система-

ми архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 12(5): 263–284.

3. Гордеев Е.И., Гирина О.А., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Уваров И.А., Бурцев М.А., Романова И.М., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Королев С.П., Верхотуров А.Л. 2016. Информационная система VolSatView для решения задач мониторинга вулканической активности Камчатки и Курил. *Вулканология и сейсмология*, 6: 1–16. <https://doi.org/10.7868/S0203030616060043>
4. Горшков Г.С. 1967. *Вулканизм Курильской островной дуги*. М.: Наука, 287 с.
5. Белоусов А.Б., Белоусова М.Г., Гришин С.Ю., Крестов П.В. 2003. Исторические извержения вулкана Чикурачки (о. Парамушир, Курильские острова). *Вулканология и сейсмология*, 3: 15–34.
6. Hasegawa T., Nakagawa M., Yoshimoto M., Ishizuka Y., Hirose W., Seki S., Ponomareva V., Rybin A. 2011. Tephrostratigraphy and petrological study of Chikurachki and Fuss volcanoes, western Paramushir Island, northern Kurile Islands: Evaluation of Holocene eruptive activity and temporal change of magma system. *Quaternary International*, 246(1-2): 278–297. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.06.0477>
7. Gurenko A.A., Belousov A.B., Trumbull R.B., Sobolev A.V. 2005. Explosive basaltic volcanism of the Chikurachki Volcano (Kurile arc, Russia): Insights on pre-eruptive magmatic conditions and volatile budget revealed from phenocryst-hosted melt inclusions and groundmass glasses. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 147(3-4): 203–232. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.04.002>

References

1. Degterev A.V., Chibisova M.V. 2022. The explosive activity of Chikurachki volcano in January–October 2022 (Paramushir Island, Northern Kuriles). *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 6(4): 328–338. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.328-338>
2. Loupian E.A., Bourtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskiy A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Suchugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A. 2015. IKI Center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 12(5): 263–284. (In Russ.).
3. Gordeev E.I., Girina O.A., Lupyan E.A., Sorokin A.A., Kramareva L.S., Efremov V.Yu., Kashnitskiy A.V., Uvarov I.A., Burtsev M.A., Romanova I.M., Mel'nikov D.V., Manevich A.G., Korolev S.P., Verkhoturav A.L. 2016. The VolSatView information system for monitoring the volcanic activity in Kamchatka and on the Kuril Islands. *J. of Volcanology and Seismology*, 10(6): 382–394. <https://doi.org/10.1134/s074204631606004x>
4. Gorshkov G.S. 1967. [Volcanism of the Kuril island arc]. Moscow: Nauka Publ., 287 p. (In Russ.).
5. Belousov A.B., Belousova M.G., Grishin S.Yu., Krestov P.V. 2003. Historical eruptions of Chikurachki volcano (Para-

- mushir I., Kuriles). *J. of Volcanology and Seismology*, 3: 15–34. (In Russ.).
6. Hasegawa T., Nakagawa M., Yoshimoto M., Ishizuka Y., Hirose W., Seki S., Ponomareva V., Rybin A. **2011**. Tephrostratigraphy and petrological study of Chikurachki and Fuss volcanoes, western Paramushir Island, northern Kurile Islands: Evaluation of Holocene eruptive activity and temporal change of magma system. *Quaternary International*, 246(1-2): 278–297. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.06.047>
7. Gurenko A.A., Belousov A.B., Trumbull R.B., Sobolev A.V. **2005**. Explosive basaltic volcanism of the Chikurachki Volcano (Kurile arc, Russia): Insights on pre-eruptive magmatic conditions and volatile budget revealed from phenocryst-hosted melt inclusions and groundmass glasses. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 147(3–4): 203–232. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.04.002>

Об авторах

Дегтерев Артем Владимирович (<https://orcid.org/0000-0001-8291-2289>), кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, d_a88@mail.ru

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

Поступила 29.05.2023

Принята к публикации 09.06.2023

About the Authors

Degterev, Artem V. (<https://orcid.org/0000-0001-8291-2289>), Cand. of Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher of the Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, d_a88@mail.ru

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

Received 29 May 2023

Accepted 9 June 2023

На печатную версию журнала «Геосистемы переходных зон» на 2023 год можно оформить подписку на сайте Объединенного каталога "Пресса России" www.pressa-rf.ru и через интернет-магазин «Пресса по подписке» (<https://www.akc.ru>) (подписной индекс 80882), а также по электронному каталогу Почты России (индекс ПС539)

You can subscribe to the printed version of the «Geosystems of transition zones» journal for 2023 on the website of the United Catalogue "Press of Russia" (www.pressa-rf.ru) and in the online store "Press on subscription" (<https://www.akc.ru>) (subscription index 80882), as well as on the electronic catalog of the Russian Post (index ПС539)

