

Научный журнал

Учредитель и издатель:

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения
Российской академии наук

Издается с января 2017 г.

Периодичность издания 4 раза в год

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

Журнал:

- индексируется в **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 докторской и кандидатской 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 Перечень ВАК к журналам II категории (К2).

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.imgur.ru>

ISSN 2541-8912 (Print)

ISSN 2713-2161 (Online)

GEOSYSTEMS OF TRANSITION ZONES

Vol. 8 No. 3 2024

July – September

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

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.

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 category in the VAK list.

Postal address

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

© ИМГиГ ДВО РАН, 2024

Редакционная коллегия

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

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

- **Адушкин Виталий Васильевич**, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, Институт динамики геосфер РАН; Московский физико-технический институт, Москва
- **Алексанин Анатолий Иванович**, д-р техн. наук, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
- **Быков Виктор Геннадьевич**, д-р физ.-мат. наук, Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косягина ДВО РАН, Хабаровск
- **Закупин Александр Сергеевич**, канд. физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск – зам. главного редактора
- **Ковалев Дмитрий Петрович**, д-р физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск
- **Кочарян Геворг Грантович**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт динамики геосфер РАН, Москва
- **Куркин Андрей Александрович**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород
- **Лабай Вячеслав Степанович**, д-р биол. наук, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск
- **Левин Владимир Алексеевич**, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток; Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
- **Лучин Владимир Александрович**, д-р геогр. наук, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильинчева ДВО РАН, Владивосток
- **Марапулец Юрий Валентинович**, д-р физ.-мат. наук, доцент, Институт космоморфических 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
- **Разжигаева Надежда Глебовна**, д-р геогр. наук, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток
- **Ребецкий Юрий Леонидович**, д-р физ.-мат. наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва
- **Родкин Михаил Владимирович**, д-р физ.-мат. наук, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва
- **Рыбин Анатолий Кузьмич**, д-р физ.-мат. наук, Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия
- **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
- **Шакиров Ренат Белалович**, д-р геол.-минер. наук, доцент, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильинчева ДВО РАН, Владивосток
- **Шевченко Георгий Владимирович**, д-р физ.-мат. наук, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск
- **Шеменда Александр Ильич**, профессор исключительного класса, Университет Ниццы София-Антиполис, Ницца, Франция
- **Ярмолюк Владимир Викторович**, академик РАН, д-р геол.-минер. наук, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

Editorial Board

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

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
(Регистрационный номер ПИ № ФС 77-73243 от 13.07.2018 г.). ТERRITORY OF DISSEMINATION – Russian Federation, foreign countries.

Переводчик Чера Анастасия Дмитриевна

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

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

Формат 60 × 84 /8. Усл. печ. л. 11.6.
Тираж 150 экз. Заказ 8054. Свободная цена.
Дата выхода в свет 30.09.2024.

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

Translator Anastasiya D. Chera

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

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

Sheet size 60 × 84 /8. Conv. print. sheets 11.6.
Number of copies 150. Order no. 8054. Free price.
Date of publishing 30.09.2024.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

Геофизика, сейсмология

- A.C. Закупин, А.И. Казаков, Н.С. Стобун, С.А. Гуляков, М.Ю. Андреева, О.А. Жердева.* О возможной связи между магнитными бурями и землетрясениями в определенных тектонических условиях (на примере о. Сахалин) 161
H.A. Сычева. Сейсмотектонические деформации и сброшенные напряжения землетрясений Центрального Тянь-Шаня 174

Океанология

- Д.П. Ковалев, П.Д. Ковалев, А.С. Борисов, К.В. Кириллов.* Волны в морской акватории вблизи мыса Свободный (юго-восточная часть о. Сахалин) 201

Петрология, вулканология

ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

- А.В. Дегтерев.* Полевые тэфростратиграфические работы на о. Итуруп (Южные Курильские острова) в 2024 г. 212

Экология. Биология

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

- А.К. Ежкин, Ф.А. Романюк.* Лишайники восточного склона вулкана Берутарубе, о. Итуруп (Курильские острова, Дальний Восток России) 219

НАУЧНЫЕ КОЛЛЕКЦИИ

- А.К. Ежкин, В.В. Каганов.* Гербарий лишайников Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (САК): первые результаты инвентаризации 228

Хроника научной жизни

ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЕ УЧЕНЫЕ

- Комплексные вулканологические исследования на Курильских островах под руководством А.В. Рыбина. *А.В. Дегтерев, М.В. Чибисова.* 244

ЮБИЛЕИ

- Олег Васильевич Веселов 255

Geophysics. Seismology

- A.S. Zakupin, A.I. Kazakov, N.S. Stovbun, S.A. Gulyakov, M.Yu. Andreeva, O.A. Zherdeva.* On the possible relationship between magnetic storms and earthquakes in certain tectonic conditions (using the example of Sakhalin) 161
N.A. Sycheva. Seismotectonic deformations and stress drop of earthquakes of Central Tien Shan 174

Oceanology

- D.P. Kovalev, P.D. Kovalev, A.S. Borisov, K.V. Kirillov.* Waves in the marine area near Cape Svobodny (south-eastern part of Sakhalin Island) 201

Petrology and volcanology

FIELD STUDY

- A.V. Degtrev.* Tephrostratigraphic fieldwork on Iturup Island (the South Kuril Islands) in 2024. 212

Ecology. Biology

SHORT REPORT

- A.K. Ezhkin, F.A. Romanyuk.* Lichens of the eastern slope of Berutarube volcano, Iturup Island (the Kuril Islands, Far East of Russia). 219

SCIENTIFIC COLLECTIONS

- A.K. Ezhkin, V.V. Kaganov.* Lichen Herbarium of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS (SAK): preliminary results of the inventory 228

Current scientific events

FAR EASTERN SCIENTISTS

- Complex volcanological studies in the Kuril Islands under the leadership of Aleksander V. Rybin. *A.V. Degtrev, M.V. Chibisova.* 244

ANNIVERSARY

- Oleg Vasil'evich Veselov 255

© The Authors, 2024.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

UDK 550.343(571.642)



© Авторы, 2024 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.161-173>
<https://www.elibrary.ru/nbfges>
<http://journal.imgg.ru/web/full/f2024-3-1.pdf> (In Russian)

On the possible relationship between magnetic storms and earthquakes in certain tectonic conditions (using the example of Sakhalin)*

Aleksander S. Zakupin[@], Artem I. Kazakov, Nikolai S. Stovbun, Sergei A. Gulyakov,
Marina Yu. Andreeva, Olga A. Zherdeva

[@]E-mail: a.zakupin@imgg.ru

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

Abstract. The paper considers topical issues of geophysics related to the possible influence of disturbances in the magnetosphere on seismicity. The study was conducted based on a detailed catalog of seismic events in southern Sakhalin for the period from 2003 to 2023. The paper aims to test the assumption that such an influence can manifest itself in individual seismogenic zones during their proximity to discharge. The testing was carried out in randomly selected segments of the West Sakhalin (WSF) and Central Sakhalin (CSF) faults. The coincidence of the moments of some seismic events (with $M > 2.7$) and magnetic storms with a high index (G1 and higher) was revealed in these segments. The LURR (load-unload response ratio) method was used to identify periods when fault segments were in a subcritical stress-strain state. It was shown that the main part of the coincidences occurred during the periods of increased abnormal activity of the LURR parameter.

Keywords: earthquake, magnetic storm, LURR, correlation, fault segment

О возможной связи между магнитными бурями и землетрясениями в определенных тектонических условиях (на примере о. Сахалин)**

A. C. Закупин[@], A. И. Казаков, Н. С. Стоббун, С. А. Гуляков,
М. Ю. Андреева, О. А. Жердева

[@]E-mail: a.zakupin@imgg.ru

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

Резюме. В работе рассмотрены актуальные вопросы геофизики, связанные с возможным влиянием возмущений в магнитосфере на сейсмичность. Исследование проведено на детальном каталоге сейсмических событий южного Сахалина для периода с 2003 по 2023 г. В работе поставлена задача проверить предположение о том, что такое влияние может проявиться в отдельных сейсмогенных зонах в период их близости к разрядке. Проверка осуществлена в произвольно взятых сегментах Западно-Сахалинского (ЗСР) и Центрально-Сахалинского (ЦСР) разломов. В них выявлены совпадения моментов некоторых сейсмических событий (с $M > 2.7$) и магнитных бурь с высоким индексом (G1 и выше). Для выделения периодов, когда сегменты разломов находятся в субкритическом напряженно-деформированном состоянии, используется метод LURR (load-unload response ratio). Показано, что основная часть совпадений выпала на периоды повышенной аномальной активности параметра LURR.

Ключевые слова: землетрясение, магнитная буря, LURR, корреляция, сегмент разлома

*The translation from Russian: Закупин А.С., Казаков А.И., Стоббун Н.С., Гуляков С.А., Андреева М.Ю., Жердева О.А. О возможной связи между магнитными бурями и землетрясениями в определенных тектонических условиях (на примере о. Сахалин). Геосистемы переходных зон, 2024, т. 8, № 3. [Electronic resource]. <http://journal.imgg.ru/web/full/f2024-3-1.pdf>. Translated by Anastasiya Chera.

**Полный текст статьи на русском языке см. на сайте журнала «Геосистемы переходных зон»: <http://journal.imgg.ru/web/full/f2024-3-1.pdf>

For citation: Zakupin A.S., Kazakov A.I., Stovbun N.S., Gulyakov S.A., Andreeva M.Yu., Zherdeva O.A. On the possible relationship between magnetic storms and earthquakes in certain tectonic conditions (using the example of Sakhalin Island). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, no. 3, pp. 161–173. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.161-173>; <https://www.elibrary.ru/nbfges> [The translation from Russian: Закупин А.С., Казаков А.И., Стобун Н.С., Гуляков С.А., Андреева М.Ю., Жердева О.А. О возможной связи между магнитными бурями и землетрясениями в определенных тектонических условиях (на примере о. Сахалин). Геосистемы переходных зон, 2024, т. 8, № 3. [Electronic resource]. <http://journal.imgur.ru/web/full/f2024-3-1.pdf>].

Introduction

The question of the relationship between the magnetosphere and the Earth's elastic field, changes in which lead to the destruction of the geosphere and movements occurring in the form of seismic vibrations, has always been on the agenda and has not lost its relevance to this day. The result of such studies is mostly determined by the quality and sampling size of seismic events. We shall address the state of this field by analyzing recent publications.

An interesting result was obtained in the study [1]. The authors tested the hypothesis about the existence of a relationship between earthquakes ($M = 4\text{--}4.9$) and solar activity for the period from 2006 to 2012. The earthquake data were taken from the ANNS database (California), and the daily solar activity and magnetospheric data were taken from OMNIWeb (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>). The authors constructed generalized autoregressive models with exogenous variables (GARX), with exogenous variables being the parameters reflecting potential triggers of earthquakes (interplanetary magnetic field, Dst index, solar wind speed, sunspot number, and Earth's electric field) to find the relationship. As a result of a mathematical algorithm, the coefficient of determination and the Schwarz criterion were obtained, the parameters of which indicate a relationship between solar activity and earthquakes with magnitude $M = 4\text{--}4.9$. However, the authors note that the results of this algorithm in the processing of earthquakes with magnitude $M > 5$ give the opposite result, i.e., no connection with solar activity.

Guglielmi et al. [2] studied earthquakes all over the planet from 1973 to 2010 with magnitudes $M \geq 5$ based on the data from the catalog of the National Earthquake Information Center of the U.S. Geological Survey (USGS). (We would like to note that we consider the decision to use

such old data on earthquakes with small magnitudes unobvious.) A total of 405 earthquakes were analyzed, which occurred within 1 h before and 1 h after 1113 magnetic storms with a sudden commencement (SSC, storm sudden commencement, a sudden increase in the H component of the geomagnetic field that occurs almost simultaneously over the entire Earth). The active phase of the geomagnetic storms themselves was not analyzed in this paper. As a result, an empirical confirmation of the connection between earthquakes and SSC was found, specifically, a decrease in global seismicity after SSC. The authors claim, however, that there is no theoretical interpretation of the relationship between SSC and earthquakes.

In the study [3], the authors searched for the relationship between geomagnetic disturbances (Dst index, absolute value of the field disturbance $|\Delta X|$, and absolute value of the field variability $|dX/dt|$) and earthquakes for the Alaska region (geomagnetic station "College") in the period from 2014 to 2016. The U.S. Geological Survey catalog of seismic events was used as the basis of the study. Firstly, the statistics of geomagnetic variations before and after earthquakes of different classes – strong ($M > 5$), weak minor ($3 < M < 5$, $H < 5$ km), weak near-surface ($3 < M < 5$, $H = 5\text{--}10$ km), and weak shallow ($3 < M < 5$, $H > 10$ km) – were studied, as well as randomly selected earthquakes. Another approach was to study the number of earthquakes of different classes before and after substorm onset. Both approaches did not confirm the hypothesis about the trigger effect of magnetic storms on earthquakes. It was also noted that such an effect can occur only with a combination of unique favorable factors, which are difficult to identify in statistics. Regarding unique factors, it should be added that the article was published in 2020, and the authors simply did not know that in 2021 there would be

a megathrust earthquake with $M = 8.2$ in Alaska. Moreover, the trigger seismicity (e.g., from geomagnetic activity), which is of such interest to the authors [3], could occur during the period of unstable development of the seismic process, and according to our data (using the LURR method) obtained in [4], this period has only occurred since August 2019.

In the study [5], a relationship between Dst index and earthquakes with $M \geq 7$ (USGC) was found using a superposed epoch analysis and a Z-test. The result showed a higher number of geomagnetic storms before seismic events than after them, and a stronger correlation with shallow earthquakes was observed. Yet there is no precise explanation for such a phenomenon. This may be due to the special aspects of the manifestation of the inverse piezoelectric effect in the near-surface layer.

The authors [6] claim that they were able to find a correlation between the solar wind and strong earthquakes with $M > 5.6$. The ISC-GEM catalog was used for the earthquakes, and the solar wind data were taken from the SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) catalog. During the analysis, it was found that solar activity triggers high-intensity seismic events when structures are critically stressed or when other effects, such as inverse piezoelectric effects, co-occur.

In the paper [7], the strongest magnetic storms ($K_p > 7$, Ap index) and all 935 earthquakes ($M \geq 6.5$) in the world in the period from 1994 to 2017 (USGS) were compared. Out of the 49 strongest storms during this period, 17 cases were identified in which seismic events occurred at the same time as the storm or the following day. Of these, 14 occurred near Japan and in the southwest Pacific, but were almost absent in continental Asia, North America, and South America. The authors suggest that this may be related to the less stable lithosphere of the eastern hemisphere.

Another study [8] confirms the absence of a correlation between solar activity (Dst index) and global seismicity ($M \geq 4$) from 1996 to 2016 (USGS). Having found no correlation over a longer period, the authors [8] analyzed shallow earthquakes ($M \geq 4$, $H \leq 70$ km) and Dst index level separately for 2004, where no correlation was also found. On the other hand, a sample of seismical-

ly active periods in different local zones (southeastern Indonesia, Taiwan, eastern Japan, southern Alaska, western Mexico, and western Chile) shows a drastic change in the Dst index level in periods of increased earthquakes. The biggest change was recorded in Indonesia during the period of seismic activity on November 9–13, 2004: the Dst index level fell to $-373 \mu\text{T}$. The weakest change ($-124 \mu\text{T}$) was found during the sudden increase in the number of earthquakes on September 8, 2007, in Mexico.

Thus, numerous examples from the literature indicate the absence of correlation rather than its presence. However, we can also see that the considered studies have different sampling approaches, and the comparison of the results will not necessarily provide an objective evaluation. There is a general tendency towards globalization (covering a longer period and larger regions), but it should be taken into account that the paradigm “the larger the sample of earthquakes, the more significant the statistics” may not work here. It is obvious that magnetic storms can act as triggers for earthquakes but in no way generate them. Most publications only statistically analyze the relationship between geomagnetic activity and seismic events, while the mechanism of impact remains unresolved.

The authors [9, 10] presented a theoretical model and calculations of electric field disturbance, electric current, and heat generation in the lithosphere. It was found that the density of telluric currents generated by solar flares is comparable to the current density from artificial sources (MHD generator “Pamir-2,” ERGU-600) [11], which impacted the seismicity of the Pamir Mountains and Northern Tian Shan [12]. It was also noted that the trigger effect depends not only on the stress-strain state of the earthquake formation area but also on the time of growth of the flare front as well as the level of conductivity in the lithosphere layer. To confirm such an idea (of the trigger effect on seismicity) in the case of solar flares, a statistical analysis of global (USGS catalog, $M \geq 4$) and regional (Greece, EMCS catalog, $M \geq 3$) seismicity during the X9.3 solar flare on September 6, 2017, was performed [13]. The number of earthquakes (± 10 days from the solar flare) increased relative

to the baseline by 68 % for global seismicity and by 120 % for regional seismicity. An important question about the state of the geosphere and the degree of its preparation for effective interaction with an external source for the dissipation of previously accumulated energy arises. It was shown in the study [14] that in the interaction of electromagnetic and elastic fields, trigger effects in rocks are only possible in the region of inelastic deformation at levels of about 85 % and higher of the maximum level of resistance to the applied load. In the same range (beyond the point of proportionality), the trigger response of the medium to an external impact is assumed for the scale of the Earth's crust in general. For example, such an approach is implemented in the method of identifying areas with near-critical stress state and intermediate-term LURR earthquake prediction. Moreover, the hypothesis about the zones that are in the subcritical stress-strain state and sensitive to the influence of geomagnetic field pulsations has already been expressed earlier and partially confirmed in the study [15]. This study shows the response of seismicity in the aftershock zones of strong earthquakes, where subcritical stress zones constantly appear due to the rearrangement of the stress-strain state of the crust after the main shock.

At different scales (planetary or regional), a single sample may contain earthquakes that occur simultaneously but in different zones: in relaxing zones (with significant aftershock activity), neutral zones (moderate seismicity in foci at the stage of stress accumulation), and, finally, in focal zones that are in an unstable state (near-critical stress levels). In a single sample, the presence of all these different stages of earthquakes is possible, but only in an evolutionary form when one state replaces another, and this requires working in separate seismogenic zones. However, a problem is that it is not always easy to perfectly isolate such zones geometrically. It is also impossible to tell whether a focal zone is completely independent. Fault zones can be not only extended up to hundreds of kilometers but can also be physically in contact with other faults along their length. Yet there are areas with the largest number of earthquakes on seismic activity maps ("dark" spots), so

they can be considered "almost" independent focal areas. In our recent paper [16], we conducted a study within such a separate seismogenic zone. It was found that in one of the segments of the Aprelovsky fault (south of Sakhalin Island), all earthquakes (two out of two) with $M > 3$ in almost three months (from July to October 2023) occurred during periods of magnetic storms of G1 and above or after X-class flares. In total, geomagnetic disturbances only occurred on 9 days out of 80, and it is clear that the statistics here are definitely in favor of the existence of a connection. Moreover, in the study [17], we also showed how the formation of one of these two earthquakes is manifested in the changes in the electrotelluric potentials. Therefore, it is of interest to identify possible connections between geomagnetic activity and earthquakes under certain conditions. To this end, it is proposed, among other things, to use methods for identifying time periods in which the focal zone could be in a state sensitive to external influences.

Methods

The LURR method is proposed as a basis for evaluating the stress-strain state in the seismogenic zone. The LURR (Load/Unload Response Ratio) method was developed by Chinese seismologists in the 1990s [18]. The method is based on consistent models of the theory of elasticity (model of an absolutely rigid Earth) and fracture mechanics (Mohr–Coulomb criterion). The key point is that beyond the elastic deformation of the medium, the load response does not correspond to the unload response (and the relative response ratio becomes different from one). With time, this discrepancy only intensifies up to the loss of stability of the collapsing object. The method suggests solving the elasticity theory equations to determine the components of the stress tensor at the site where the slip vector is located. Calculations are performed for each earthquake in the catalog. The displacements from tidal influence at a given point (the earthquake epicenter) are calculated. The use of lunar-solar tides in the method is justified by the fact that it is impossible to find another such perfect calibrated load/unload indicator in the

geoenvironment. Tectonic and lithostatic components are not taken into account because their rates of change differ significantly from the tidal ones. To divide earthquakes into “loading” and “unloading” earthquakes, the Mohr–Coulomb criterion is calculated. The earthquake occurring during the increasing value of this criterion is defined as “positive,” otherwise “negative”. The studied parameter (LURR) is identified with the ratio of the total Benioff strain of all positive earthquakes to the same parameter of negative earthquakes for a certain period of time (in mathematical processing, it is the sliding window value). In elastic-plastic media, before fracture, a phenomenon of fluidity is observed when, under constant stresses, the strain continues to grow. Clearly, in such circumstances, the calculation of the ratio of the load response to the unload response makes no sense (there is no response as such), and mathematically, the LURR parameter again becomes close to one. In the area of transition from elastic to inelastic deformation, this parameter starts to grow and reaches its maximum values near the fracture of the medium. That is why in the medium where brittle fracture is realized, the main (predicted) event can be expected after the curve reaches its maximum values, and in the medium where plastic effects are possible, the parameter returns to the background level and some delay (time lag from the moment of determination of the predicted feature, LURR variation) in time occurs. It is obvious that this delay depends on geologic conditions. The LURR method is described in great detail in the original papers [18], so we have limited ourselves to a qualitative description. It should be noted that our studies allow us to positively evaluate the possibilities of this method (refer, for example, to the review [19]).

Before studying the relationships in separate seismogenic zones (which is the main goal of this paper), we present a general analysis of seismicity for southern Sakhalin in comparison with geomagnetic activity. Recognizing that in this case the seismogenic zones of the two main lineaments (West Sakhalin fault (WSF) and Central Sakhalin fault (CSF)) will be in the same sample, we will not search for relationships with geomagnetic activity for specific earthquakes. It would be ap-

propriate here to simply note characteristic points in the change in the series and to identify (if any) trends. Geomagnetic activity in space will be constant for any seismic sample, and we will estimate it by the intensity (Kp index). The geomagnetic index (Kp) is provided on the website of the Laboratory of solar astronomy of the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences and the Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (https://xras.ru/magnetic_storms.html). The histograms given there contain information on the dynamics of changes in the planetary Kp index. Based on this index, the G scale of the geomagnetic storm intensity is also calculated.

To study separate seismogenic zones, we used the areas of the WSF and CSF as objects, which are depicted as rectangles on the fault map in Fig. 1. The study was carried out in the following order: First, a curve characterizing the periods of instability was constructed using the LURR method, and then the correlation of significant levels of the Kp index with earthquakes in time was checked. We considered it evidence of a connection if the earthquake occurred at the time of the storm or a day later. One day is a conventional period for the expected trigger effect (which should manifest itself in the shortest time possible). We chose this period, despite the probability of a delay from several days to several weeks (as estimated by various authors), primarily because these delays are only a product of statistics in certain studies and have no confirmed physical mechanisms behind them. In the LURR method, which, however, has not escaped criticism [21], a direct transition is used (all within the scope of mechanical phenomena), and the evaluation of the trigger effect from the tidal factor is made de facto at the moment of displacement, which, at least, does not make our choice completely unreasonable.

Now, to the question of sampling, i.e., earthquakes with which characteristics should be taken into account. It would be logical to select earthquakes with minimum magnitude according to the level of representativeness of the catalog (to improve statistics), but it only reflects the network capabilities. We would like to have a physi-

cal justification for the choice of threshold. If we assume that the influence of storms is only significant at the stage of unstable focus (with a high level of internal energy), we can also follow the analogy with the LURR methodology, where the parameter correlated well with the formation of

strong earthquakes ($M > 5$). Applying this method, we used moderate seismicity with $M = 3.3\text{--}5$ for calculations, and in most cases the lowering of the threshold to $M = 3$ did not worsen the result. Therefore, there are several possible options for the evaluation of storms and earthquakes, and the

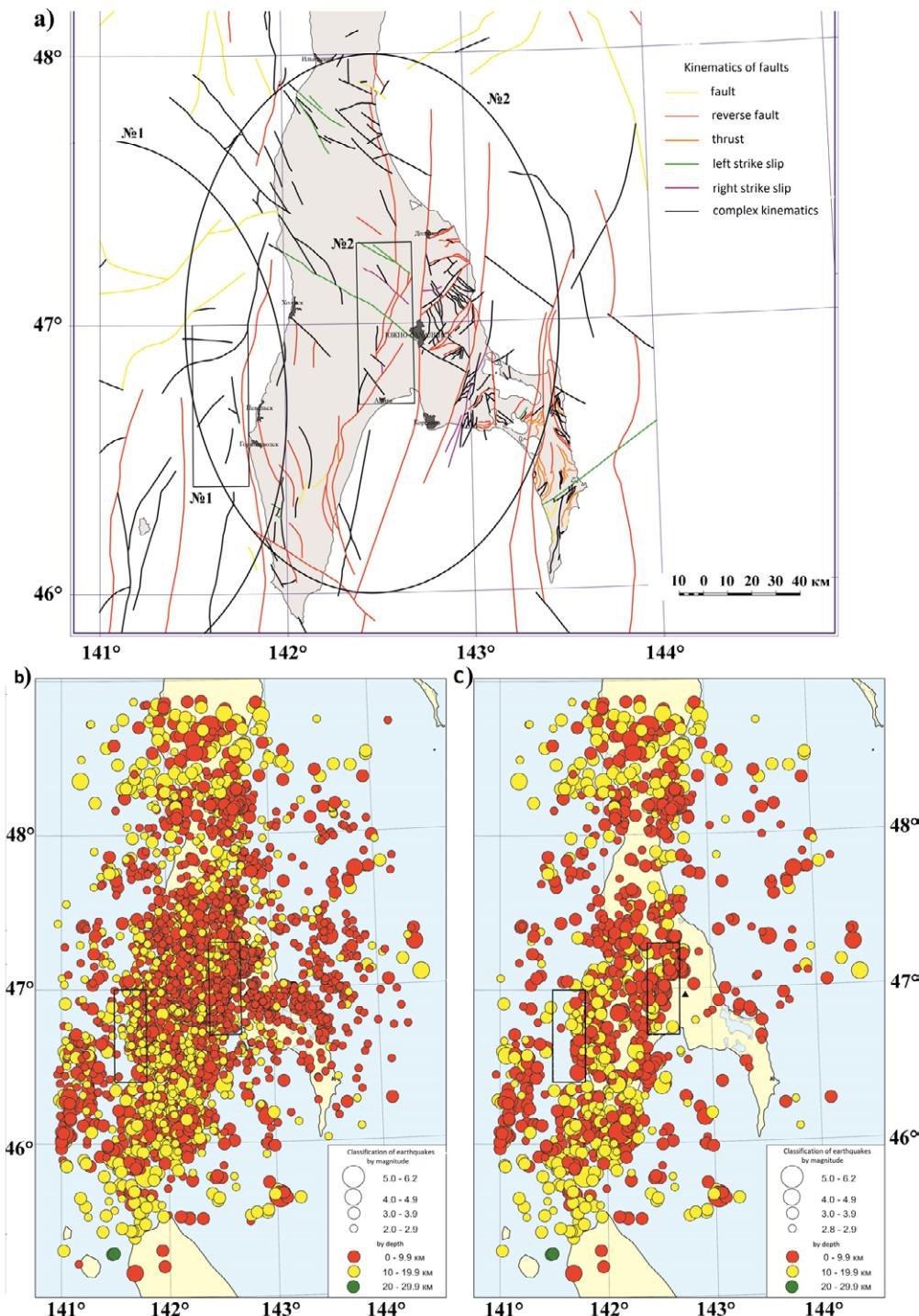


Fig. 1. a) Map of faults according to [20] indicating study zones (No. 1, segment of the WSF; No. 2, Aprelovsy fault of the CSF); circles (one partially) indicate LURR calculation areas in accordance with the zone index; b), c) earthquakes in the south of Sakhalin from 2003 to 2023 from the full catalog (b), with $M > 2.7$ (c). Rectangles indicate study zones. Zone coordinates (corners of rectangles): No. 1, 46.7N, 142.4E – 47.3N, 142.7E; No. 2, 46.4N, 141.5E – 47N, 141.8E.

lower threshold can be taken with a margin (several options with $M < 3$). In the study we considered five options, where the samples included earthquakes with magnitudes $M \geq 2.7/2.8/2.9/3/3.1$.

To analyze the correlations between seismicity and geomagnetic activity, we used the catalog of earthquakes in the south of Sakhalin from 2003 to 2023, which is compiled at the Institute of Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences on the basis of the official annual collections of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences. In this study, we also declustered the catalog using the program described in the paper [22]. The local intensity ratio (LIR) method [23] is incorporated in the program algorithm. In the declustered catalog, 6179 events remained out of 10 771 events.

Results and discussion

It is of interest to plot seismic activity graphs for the entire period for the entire sample, i.e., for all of southern Sakhalin, and then compare it with the activity graph of the geomagnetic Kp index. Over a twenty-year period, there were at least two 11-year maximums of solar activity and, of course, seismicity activation (there were 4 earthquakes with $M > 5$ on southern Sakhalin from 2003 to 2023). The seismic activity graphs were plotted for the original and declustered catalogs.

The seismic activity tends to increase after the geomagnetic activity peaks on a decreasing trend. The strongest seismic event for this period (the Nevelsk earthquake of August 2, 2007, $M = 6.2$) occurred after the strongest activation of the magnetosphere in 2004–2005, when 138 magnetic storms were recorded in two years (during this period there was a peak of 11-year solar activity). It should be noted that the declustering program deforms the activity of 2007–2008, and it is better to draw conclusions from the original catalog. The observed increase in the average background activity since 2011 can be explained by the fact that since 2011 the seismic network became fully digital and the number of stations increased, which led to an increase in the number of minor events in the catalog. Overall, the graphs in

Fig. 2 do not explicitly reveal the presence or absence of a relationship between earthquakes and magnetic storms.

Now for the samples for separate zones No. 1 (WSF segment) and No. 2 (Aprelovsy fault). We are particularly interested in the periods when the LURR parameter is in the abnormal range (> 3). To draw LURR graphs, the samples within the zones outlined by rectangles are insufficient, and the calculation was carried out in circular areas with a radius of one degree (Fig. 1a). The circle in the WSF area is off-set to the west of the WSF to avoid the influence of the CSF, whereas there are no off-setting options for the second circle, so the influence of the WSF is likely to be observed anyway. The graphs are shown in Fig. 3.

Now we calculate coincidences of times of earthquakes with the moments of the strongest magnetic storms (the moment of the storm and the day after). The results are presented for five sam-

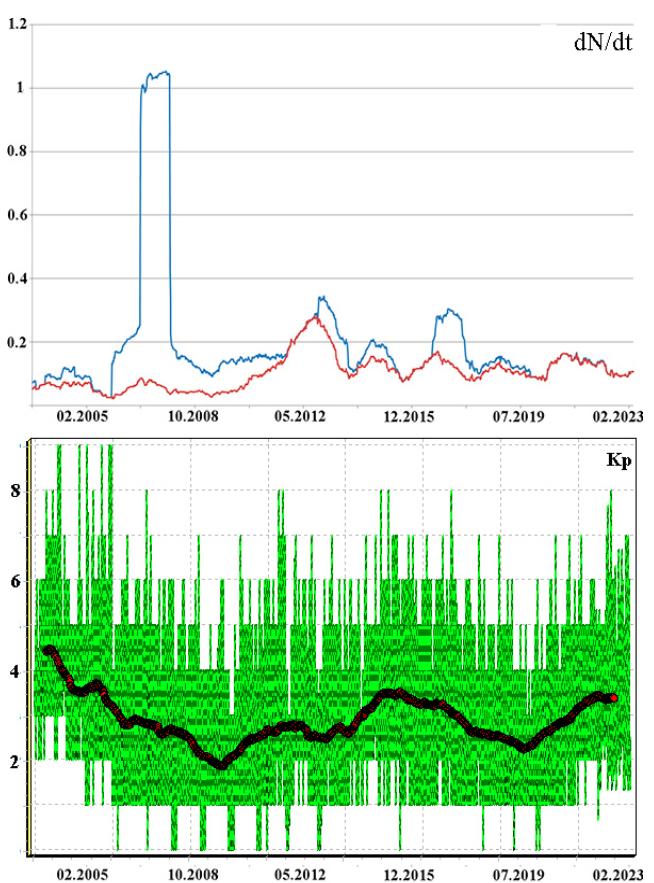


Fig. 2. Time distribution (mm.yyyy) of the accumulation rate of the number of earthquakes N (seismic activity, dN/dt) (blue line denotes original catalogue, red line denotes declustered catalogue) and geomagnetic index Kp in the period from 2003 to 2023.

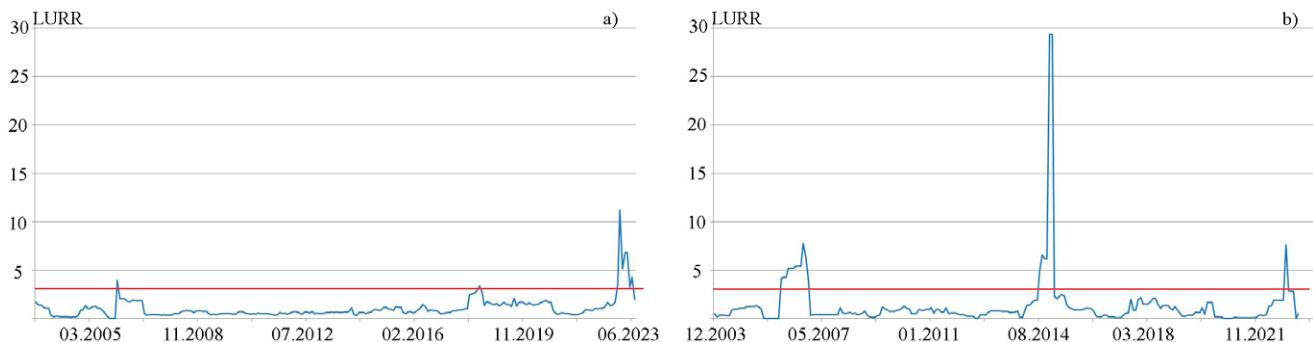


Fig. 3. Graphs of LURR parameter changes in circular calculation areas with a radius of one degree and coordinates: (a) 47E, 142.5N (for zone No. 2); (b) 46.7E, 141N (for zone No. 1). The red line indicates the anomaly cutoff threshold equal to 3.

ples of earthquakes (see the table). There were no earthquakes in 2003 in both samples.

The most important events over the entire study period should be highlighted. Thus, the geomagnetic activity maxima in terms of the number of extreme storms are observed in 2004–2006, 2015–2017, and will probably be expected in 2026–2028, which reflects the 11-year cycle of solar activity (see the table). Anomalies of the LURR parameter in the Aprelovsky fault region were observed in June 2023 (Fig. 4a), while in the WSF region in May 2007, July 2015, and June 2023 (Fig. 4b). We shall note the coincidence of the anomalies for the two lineaments in 2023 and will return to this later. For the WSF, the LURR anomalies in 2007 and in 2015 are forerunners of important seismic events: the Nevelsk earthquake, August 2, 2007, $M = 6.2$; the Onor earthquake, August 16, 2016, $M = 5.8$; and the Krilyon earthquake, April 23, 2017, $M = 5$. While the former

occurred directly in the selected area, the Onor and Krilyon earthquakes were north and south within this lineament, and the 2015–2016 anomalies were observed throughout the entire area of the WSF across Sakhalin [19]. Despite the large number of earthquakes in 2007 (see the table), all of them occurred after August 2 and did not coincide with the anomaly in May. The coincidences of 2006 and 2007 in zone No. 1 occurred in the active phase of the aftershock activity after the Gornozavodsk (August 17, 2006, $M = 5.6$) and Nevelsk earthquakes. The other coincidences from the table occurred in 2013–2015, as well as once in 2020. The coincidences were observed mainly for earthquakes of small magnitude, and while for $M > 2.7$ there were nine of them in 20 years, for $M > 3.1$ their number is almost four times less. Therefore, in 2006–2007, a small number of coincidences with high seismic activity (including aftershocks) still occurred during the LURR anom-

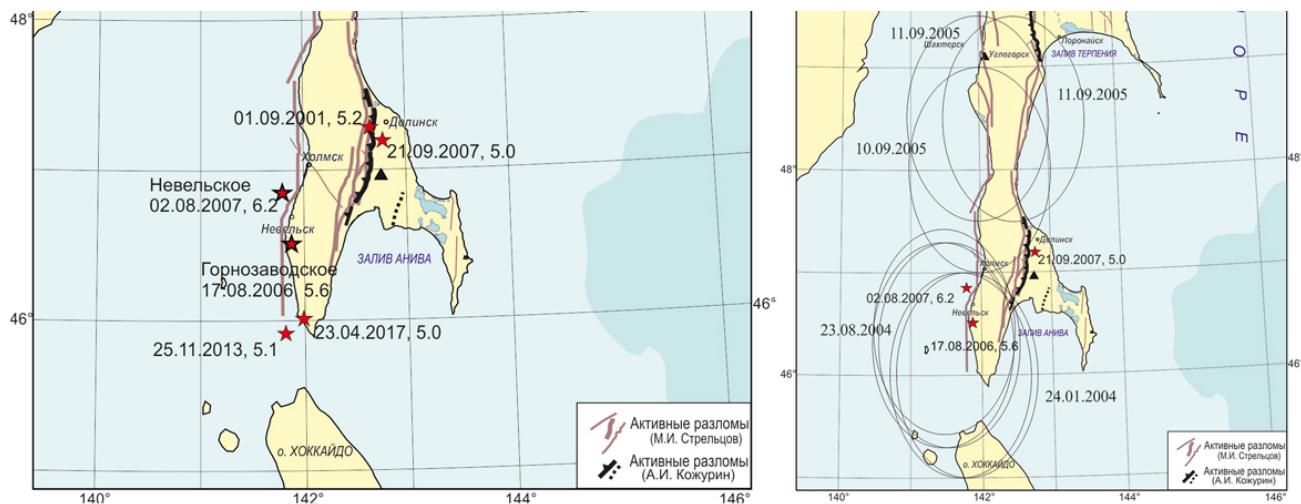


Fig. 4. a) Map of the strongest earthquakes in the south of Sakhalin from 1997 to 2019; b) map with anomalous LURR areas in the south of Sakhalin from 2004 to 2005.

Table. The ratio of the number of earthquakes (numerator) coinciding in time with the moments of magnetic storms (denominator)

Year	G1 storms and higher	$M > 2.7$	$M > 2.8$	$M > 2.9$	$M > 3$	$M > 3.1$
Zone 1						
2004	63	3 / 0	2 / 0	2 / 0	1 / 0	1 / 0
2005	75	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0
2006	43	5 / 1	4 / 0	1 / 0	1 / 0	1 / 0
2007	35	337 / 3	282 / 3	247 / 3	198 / 2	173 / 0
2008	23	25 / 0	20 / 0	18 / 0	14 / 0	12 / 0
2009	4	10 / 0	7 / 0	6 / 0	4 / 0	3 / 0
2010	20	15 / 0	13 / 0	11 / 0	6 / 0	6 / 0
2011	31	2 / 0	1 / 0	1 / 0	0 / 0	0 / 0
2012	36	7 / 0	5 / 0	3 / 0	2 / 0	1 / 0
2013	24	11 / 2	6 / 2	3 / 1	2 / 1	2 / 1
2014	27	3 / 1	2 / 0	1 / 0	1 / 0	1 / 0
2015	81	4 / 1	4 / 1	3 / 1	3 / 1	1 / 0
2016	67	1 / 0	1 / 0	1 / 0	0 / 0	0 / 0
2017	66	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0
2018	26	11 / 0	10 / 0	6 / 0	4 / 0	3 / 0
2019	18	3 / 0	2 / 0	2 / 0	2 / 0	0 / 0
2020	12	3 / 1	2 / 1	2 / 1	2 / 1	2 / 1
2021	30	5 / 0	4 / 0	2 / 0	1 / 0	1 / 0
2022	61	3 / 0	2 / 0	2 / 0	2 / 0	1 / 0
2023	45	1 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0
Total	449 / 9	367 / 7	311 / 6	243 / 5	208 / 2	
Zone 2						
2004	63	5 / 2	4 / 2	3 / 2	3 / 2	3 / 2
2005	75	2 / 1	2 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1
2006	43	23 / 0	21 / 0	17 / 0	16 / 0	13 / 0
2007	35	13 / 3	11 / 3	9 / 1	4 / 0	2 / 0
2008	23	10 / 4	10 / 4	10 / 4	8 / 2	7 / 2
2009	4	2 / 0	2 / 0	2 / 0	1 / 0	1 / 0
2010	20	4 / 0	3 / 0	1 / 0	1 / 0	1 / 0
2011	31	4 / 0	4 / 0	3 / 0	2 / 0	2 / 0
2012	36	4 / 0	4 / 0	3 / 0	2 / 0	1 / 0
2013	24	23 / 5	18 / 4	14 / 4	13 / 4	12 / 4
2014	27	5 / 0	5 / 0	4 / 0	4 / 0	1 / 0
2015	81	4 / 0	4 / 0	3 / 0	2 / 0	2 / 0
2016	67	3 / 0	3 / 0	2 / 0	1 / 0	1 / 0
2017	66	5 / 0	5 / 0	4 / 0	3 / 0	3 / 0
2018	26	4 / 0	4 / 0	2 / 0	2 / 0	2 / 0
2019	18	5 / 0	5 / 0	4 / 0	3 / 0	3 / 0
2020	12	5 / 0	4 / 0	4 / 0	3 / 0	2 / 0
2021	30	4 / 0	3 / 0	2 / 0	2 / 0	1 / 0
2022	61	3 / 1	1 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0
2023	45	5 / 3	5 / 3	3 / 2	2 / 2	1 / 1
Total	137 / 21	121 / 19	93 / 16	74 / 12	60 / 11	

Note. Years when earthquakes coincided in time with the moments of magnetic storms are highlighted.

lous period for the selected fragment of the WSF (Fig. 4). The largest percentage of coincidences for zone No. 1 is observed in 2013–2015, and this coincides not only with the maximum of solar activity but also with the strongest LURR anomaly (Fig. 4).

The seismic activity of the selected area No. 2 is three times less than in the WSF area. There is a high percentage of coincidences in 2003–2005, and in most cases these are events with magnitude $M > 3.1$. There is also a high percentage of coincidences in 2022 and 2023, but the magnitude of the coinciding earthquakes is lower. In 2007 and 2008, the percentage of coincidences is much lower due to the increased seismicity after the Nevelsk earthquake and probably due to the redistribution of the load in the CSF structures, which includes the Aprelovsy fault. Coincidences in 2013 are mainly caused by high seismic activity, and we should primarily note the swarm of earthquakes from May 15 to 25 (this period included the storm of May 18), during which there were nine earthquakes with $M = 2.8\text{--}3.9$ alone. This is almost half of the number given in the table. As a matter of fact, the declustering programs, if they do not remove earthquakes in swarms completely, corrupt the catalogs with them very strongly, which is why we used the original catalog to search for coincidences instead of the seismic activity graphs, where both variants were present (Fig. 2). From 2013 to 2022, there were no coincidences at all,

while for 2022–2023, there were 4 out of 8, or 50 %. The only anomaly of the LURR parameter in zone No. 2 was observed in 2023, which is interesting from the point of view of the considered problem of selective sensitivity of the medium to external influences. The question arises as to the absence of anomalies in 2003–2005 on the LURR graph (Fig. 3), since the percentage of coincidences in these years is the same (see the table). The probable answer is given in Fig. 4, which shows the maps from the study [19]. Anomalies in circular areas in 2004–2005 seem to bypass the Aprelovsy fault. However, the zone apparently had a certain energy reserve. This explains the fact that after the unloading of the West Sakhalin Fault segment near Nevelsk in 2006 and 2007, the Aprelovsy fault generated a strong earthquake with $M = 5$ almost immediately after the load redistribution in September 2007. The WSF and CSF are located at a short distance, and many processes occur in the same way, although sometimes in a different order. For example, the Takoye swarm in 2001 in the Aprelovsy fault region occurred a year after the Uglegorsk earthquake in 2000 (CSF), whereas after the Nevelsk earthquake (CSF), an earthquake with $M = 5$ occurred a month later in the same region (Aprelovsy fault). The opposite was observed in 2013: the swarm in May 2013 in the Aprelovsy fault region preceded the earthquake in the WSF in November 2013 (Fig. 4a).

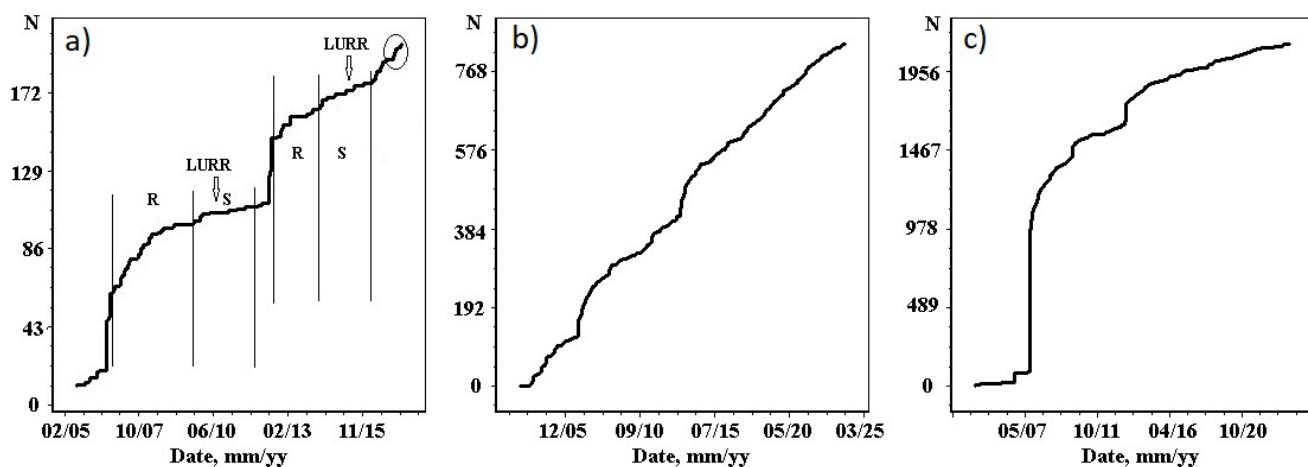


Fig. 5. Period accumulation curves (N , number of seismic events) for the epicentral area of the Krilyon earthquake from 2005 to 2017 (a), for segments of the CSF (Aprelovsy fault) (b) and WSF (c) from 2003 to 2023. R, attenuation process of seismic activity (relaxation); S, process of stationary activity; arrow indicates anomaly of the LURR parameter.

The coincidence of LURR anomalies for the two lineaments in the middle of 2023 is quite unusual and first such case during the study period. This raises the question of the likely consequences for the seismic process in southern Sakhalin as a result of such manifestations.

Important events in the seismic process are also well represented in the period accumulation curves (activity analog). The most typical example is the graph for Cape Krillyon, where the WSF and CSF not only are maximally close but also share a common intersecting lateral fault (Fig. 5a). In this area, strong earthquakes occurred in 2006 and 2013 (Fig. 4a), and the graph accurately reflects the stages of focal development: stationary mode of earthquake accumulation, main event, and relaxation.

It can also be seen here that the curve goes from accumulation to growth before the Krillyon earthquake in 2017. But this is an illustrative example to which everything fits well, including the moments of LURR anomalies. The graph for the selected Aprelovsky fault zone (see Fig. 1) is shown in Figure 5b, and the stages are less pronounced here due to the absence of strong earthquakes. However, they are present in September 2006 and May 2013, which indicates the coordinated involvement of both lineaments in a single process. Moreover, in the first case there was a reaction to the Gornozavodsk earthquake, and in the second case in 2013, the swarm occurred six months before the earthquake of 2013 in the La Perouse Strait in the WSF (Fig. 4a). Since 2014, the accumulation is present here, which is unusual because the Aprelovsky fault “operates” predominantly in swarms (September 2001, Tako耶 swarm; September 2006; May 2013) with moderate magnitudes on a relatively regular basis. The only relatively large magnitude event ($M = 5$) that was not part of a swarm occurred in September 2007, just one month after the Nevelsk earthquake. It should be noted that the Nevelsk earthquake in southern Sakhalin is the strongest earthquake in the last fifty years. And this is by the most conservative measures, because the Moneron earthquake (September 6, 1971, $M = 7.5$), which is geographically not far from Sakhalin, does not belong to the WSF structures. Thus, it

is not surprising that the earthquake of 2007 had an effect on the structures adjacent to the West Sakhalin fault. The selected segment of the WSF is currently in the accumulation stage (Fig. 5c). The main events in the WSF in 2007 and 2013 are also identified here. According to the graphs (Fig. 5), the earthquake in April 2017 (Krillyon earthquake, $M = 5$), the epicenter of which was located on the sub-latitudinal intersecting fault between the WSF and the CSF, did not impact the considered segments and its effect was highly localized. This allows us to assume that the release of seismogenerating zones on both faults in 2024–2025 is highly probable.

Conclusion

The present study is valid for a relatively small seismically active area. In randomly selected segments of the West Sakhalin and Central Sakhalin faults in 2003–2023, the coincidences of the moments of separate seismic events (with $M > 2.7$) and magnetic storms with high index (G1 and higher) are observed.

Most of the coincidences occur during periods of increased anomalous activity of the LURR parameter and precede strong earthquakes. Thus, the coincidences of events in certain time periods, which are significant for both processes (geomagnetic and seismic), are observed. Even in the most favorable condition for the coincidence, when the number of days with storms reaches a quarter of the days in the year, the probability of each earthquake to coincide with them is very low. This probability is even closer to zero for the Aprelovsky fault region (zone No. 2) in 2023, when a storm occurred every 10th day and there were only five earthquakes in the sample. However, in 2023, we obtained the most striking result that excludes the behavior of both parameters as independent, and, apparently, we should return to this issue in a year or two.

One of the results of the study is also considered to be obtaining an unfavorable prediction of an earthquake with a magnitude greater than 5 for the CSF–WSF pair in the southern part of Sakhalin Island for 2024–2025 (the magnitude can be significantly higher for the WSF).

References

1. Qin P., Yamasaki T., Nishii R. **2014**. Statistical detection of the influence of solar activities to weak earthquakes. *Pacific Journal of Mathematics for Industry*, 6(6). <https://doi.org/10.1186/s40736-014-0006-9>
2. Guglielmi A.V., Lavrov I.P., Sobisevich A.L. **2015**. Sudden onsets of magnetic storms and earthquakes. *Solar-Terrestrial Physics*, 1(1): 98–103. <https://doi.org/10.12737/5694>; EDN: VHATNJ
3. Kozyreva O.V., Pilipenko V.A. **2020**. On the relationship between geomagnetic disturbance and seismic activity for the Alaska region. *Geophysical Research*, 21(1): 33–49. <https://doi.org/10.21455/gr2020.1-3>
4. Zakupin A.S., Boginskaya N.V. **2022**. Medium-term earthquake forecasts by the LURR method on the example of the strongest earthquakes of the 21st century. *Lithosphere*, 22(6): 872–881. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-872-881>
5. Chen H., Wang R., Miao M., et al. **2020**. Statistical study of the correlation between geomagnetic storms and $M \geq 7.0$ global earthquakes during 1957–2020. *Entropy*, 22(11), 1270. <https://doi.org/10.3390/e22111270>
6. Marchitelli V., Harabaglia P., Troise C., et al. **2020**. On the correlation between solar activity and large earthquakes worldwide. *Scientific Reports*, 10, 11495. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67860-3>
7. Sobolev G.A. **2021**. The influence of large magnetic storms on the occurrence of large earthquakes. *Physics of the Earth*, 1: 24–40. <https://doi.org/10.31857/S0002333721010087>; EDN: XHEZYW
8. Takla E.M.H., Samwel S.W. **2023**. Possible connection between solar activity and local seismicity. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 34(9). <https://doi.org/10.1007/s44195-023-00042-6>
9. Novikov V.A., Sorokin A.K., Yashchenko A.K. **2019**. [Can a solar flare trigger an earthquake?]. *Vestnik Obyedinennogo instituta vysokikh temperatur*, 2(3): 15–21. <https://doi.org/10.33849/2019203>; EDN: IYEHAP
10. Novikov V.A., Sorokin V.M., Yashchenko A.K., Mushkarev G.Yu. **2023**. Physical model and numerical estimates of telluric currents generated by X-ray radiation of a solar flare. *Dynamic Processes in Geospheres*, 1(15): 23–44. https://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_1_23; EDN: MEMWRN
11. Tarasov N.T., Tarasova N.V. **2004**. Spatial-temporal structure of seismicity of the North Tien Shan and its change under effect of high energy electromagnetic pulses. *Annals of Geophysics*, 1(47): 199–212. <https://doi.org/10.4401/ag-32722013>
12. Zeigarnik V.A., Bogomolov L.M., Novikov V.A. **2022**. Electromagnetic initiation of earthquakes: field observations, laboratory experiments, and physical mechanisms (review). *Physics of the Earth*, 1: 35–66. <https://doi.org/10.31857/S0002333722010100>; EDN: MEMWRN
13. Novikov V., Ruzhin Y., Sorokin V.M., Yaschenko A. **2020**. Space weather and earthquakes: possible triggering of seismic activity by strong solar flares. *Annals of Geophysics*, 64(5): 554. <https://doi.org/10.4401/ag-7975>
14. Zakupin A.S. **2006**. *Issledovaniye elektrostimulirovannykh variatsiy akusticheskoy emissii pri deformirovaniyu obraztsov geomaterialov* [Study of electrically stimulated variations of acoustic emission during deformation of geomaterial samples]: extended abstr. of diss. ... Cand. Sci. (Phys. and Math.). Moscow, NS RAS in Bishkek. EDN: NOKZRZ
15. Sorokin V., Novikov V. **2024**. Possible interrelations of space weather and seismic activity: An implication for earthquake forecast. *Geosciences*, 14(5), 116. <https://doi.org/10.3390/geosciences14050116>
16. Zakupin A.S., Stovbun N.S., Gulyakov S.A., et al. **2024**. The manifestation of geomagnetic activity (solar flares and storms) in the change of electrotelluric potentials according to measurements at the Yuzhno-Sakhalinsk geophysical test site. *Geosystems of Transition Zones*, 8(2): 91–103. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.2.091-103>
17. Zakupin A.S., Dudchenko I.P., Bogomolov L.M., et al. **2024**. Short-term variations of the electrotelluric field near the source of the earthquake on the Sakhalin Island. *Bull. of KRAESC. Physical and Mathematical Sciences*, 46(1): 134–164. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-46-1-134-164>; EDN: FIGWJO
18. Yin X.C. Chen X.Zh., Song Zh.P., Yin C. **1995**. A new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 145: 701–715. <https://doi.org/10.1007/bf00879596>
19. Zakupin A.S., Boginskaya N.V. **2021**. Mid-term earthquake forecasts using the LURR method on Sakhalin: a summary of retrospective studies for 1997–2019 and new approaches. *Geosystems of Transition Zones*, 5(1): 27–45. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.027-045>; EDN: PBJTCV
20. Kamenev P.A., Degtyarev V.A., Zherdeva O.A., Kosetrov Yu.V. **2024**. Kinematics of Sakhalin faults based on geological and seismological data. *Geosystems of Transition Zones*, 8(1): 37–46. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.1.037-046>
21. Rebetsky Yu.L. **2021**. To the theory of deterministic earthquake forecasting using the LURR method. *Geosystems of Transition Zones*, 5(3): 192–222. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.3.192-208.208-222>
22. Smirnov V.B. **1997**. Experience in assessing the representativeness of earthquake catalog data. *Volcanology and Seismology*, 4: 93–105.
23. Molchan G.M., Dmitrieva O.E. **1993**. A targeted approach to the problem of aftershock identification. In: *Seismicity and Seismic Zoning of Northern Eurasia*. Moscow: OIEP RAS, vol. 1: 62–69.

About the Authors

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

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

Andreeva, Marina Yu. (<https://orcid.org/0000-0002-7851-3311>), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, andreeva-mu@mail.ru

Zherdeva, Olga A. (<https://orcid.org/0000-0003-4814-0865>), Senior Engineer, o.zherdeva@imgg.ru

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, Department for research of geophysical fields and physical properties of geomaterials at the Center for collective use:

Kazakov, Artem I. (<https://orcid.org/0000-0002-1378-185X>), Leading Engineer, legn@inbox.ru

Stovbun, Nikolai S. (<https://orcid.org/0009-0004-1927-798X>), Junior Researcher, nikolay19972016@gmail.com

Gulyakov, Sergei A. (<https://orcid.org/0009-0001-7924-6972>), Junior Researcher, gulyakov_97@mail.ru

Об авторах

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

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

Андреева Марина Юрьевна (<https://orcid.org/0000-0002-7851-3311>), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, andreeva-mu@mail.ru

Жердева Ольга Андреевна (<https://orcid.org/0000-0003-4814-0865>), старший инженер, o.zherdeva@imgg.ru

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, отдел исследования геофизических полей и физических свойств геоматериалов Центра коллективного пользования:

Казаков Артем Иванович (<https://orcid.org/0000-0002-1378-185X>), ведущий инженер, legn@inbox.ru

Стовбун Николай Сергеевич (<https://orcid.org/0009-0004-1927-798X>), младший научный сотрудник, nikolay19972016@gmail.com

Гуляков Сергей Александрович (<https://orcid.org/0009-0001-7924-6972>), младший научный сотрудник, gulyakov_97@mail.ru

Received 17 May 2024

Accepted 6 July 2024

Поступила 17.05.2024

Принята к публикации 06.07.2024

© Автор, 2024 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.34



© The Author, 2024.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.174-200>
<https://www.elibrary.ru/lmyvyk>

Сейсмотектонические деформации и сброшенные напряжения землетрясений Центрального Тянь-Шаня

H. A. Сычева

E-mail: ivtran@mail.ru

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

Резюме. На основе данных о тензорах сейсмического момента (TCM) 270 землетрясений Центрального Тянь-Шаня, произошедших с 1978 по 2021 г. (63 события из каталога Global Centroid Moment Tensor и 207 событий из работ А.Д. Костюка и Н.А. Сычевой) рассчитаны параметры очагов землетрясений (STD, кинематические и динамические параметры, радиус очага и сброс касательных напряжений). Расчет STD выполнен на основе подходов, предложенных в работах Ю.В. Ризниченко и С.Л. Юнга. Для рассматриваемой территории характерны такие режимы деформации, как сжатие, транспрессия, переходный режим от вертикального сдвига к сжатию и косой сдвиг. Рассчитано и построено распределение коэффициента Лоде–Надаи. Значительная часть исследуемой территории характеризуется деформациями простого сжатия, преобладания простого сжатия и простого сдвига. Для расчета сброшенных касательных напряжений использовались значения скалярного сейсмического момента M_0 , которые определяются при расчете TCM, и радиусы очагов, рассчитанные на основе теоретических и экспериментальных моделей зависимости радиуса очага от моментной магнитуды. Радиусы и сброшенные касательные напряжения рассчитаны для двух моделей очагов землетрясений – Брюна и Мадариаги–Канеко–Ширера. Сформирован каталог динамических параметров. Проведено сравнение кинематических и динамических параметров землетрясений и установлена связь сброшенных напряжений с типом подвижки в очаге, а также с распределением коэффициентом Лоде–Надаи. Результаты, полученные в работе, могут быть полезными для специалистов других областей знания – геодезии, геологии, геофизики.

Ключевые слова: сейсмичность, землетрясение, фокальный механизм, сейсмотектонические деформации, коэффициент Лоде–Надаи, тензор сейсмического момента, скалярный сейсмический момент, радиус очага, сброс касательных напряжений

Seismotectonic deformations and stress drop of earthquakes of Central Tien Shan

Naylya A. Sycheva

E-mail: ivtran@mail.ru

Schmidt Institute of Earth Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Based on the seismic moment tensor (SMT) data of 270 earthquakes in the Central Tien Shan, which occurred from 1978 to 2021 and include 63 events from the Global Centroid Moment Tensor catalog and 207 events from the works of Aleksander D. Kostyuk and Naylya A. Sycheva, the focal parameters (seismotectonic deformations (STD), kinematic and dynamic parameters, source radius, and stress drop) were calculated. The STD calculation was based on the approaches proposed in the studies of Yuriy V. Riznichenko and Sergei L. Yunga. The area under consideration is characterized by such deformation modes as thrust, transpression, underpressure, and oblique. The distribution of the Lode–Nadai coefficient was calculated and plotted. A significant part of the study area is characterized by simple compression deformation, dominated by simple compression and simple shear. To calculate the stress drop $\Delta\sigma$, the values of the scalar seismic moment M_0 , which are determined in the SMT calculation, and the source radii r , which are calculated on the basis of theoretical and experimental models of the dependence of the source radius on the moment magnitude, were used. The radii r and stress drops $\Delta\sigma$ were calculated for two models of earthquake sources: the Brune model and the Madiariaga–Kaneko–Shearer model. A catalog of dynamic parameters was compiled. The comparison of the kinematic and

dynamic parameters of earthquakes was carried out, and the relationship of the dropped stresses with the type of movement in the source, as well as with the Lode–Nadai coefficient, was established. The results obtained in the study can be useful for specialists in other fields of knowledge – geodesy, geology, and geophysics.

Keywords: seismicity, earthquake, focal mechanism, seismotectonic deformation, Lode–Nadai coefficient, seismic moment tensor, scalar seismic moment, source radius, stress drop

Для цитирования: Сычева Н.А. Сейсмотектонические деформации и сброшенные напряжения землетрясений Центрального Тянь-Шаня. Геосистемы переходных зон, 2024, т. 8, № 3, с. 174–200. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.174-200>; <https://www.elibrary.ru/lmyvyk>

Финансирование

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (№ 122040600089-4).

For citation: Sycheva N.A. Seismotectonic deformations and stress drop of earthquakes of Central Tien Shan. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, No. 3, pp. 174–200. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.174-200>; <https://www.elibrary.ru/lmyvyk>

Funding

The work was carried out within the framework of the state task of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS (No. 122040600089-4).

Введение

Тянь-Шань – область внутриконтинентального горообразования. Геологическое строение Тянь-Шаня и его активную сейсмичность можно объяснить следствием столкновения тектонических плит Индостана и Евразии. Движение Индостана на север обуславливает утолщение и укорочение коры на большой территории [1]. С севера Тянь-Шань ограничен Туранской плитой, с юга – Таримской впадиной на востоке и Таджикской депрессией на западе, соединенными между собой Алайской долиной и долиной р. Сурхоб. На юге литосфера Тарима поддвигается под литосферу Тянь-Шаня и литосфера Памира надвигается на литосферу Тянь-Шаня, а на севере литосфера Казахского щита поддвигается под литосферу Тянь-Шаня, навстречу литосфере Тарима [2].

В регионе много разломов, активных в позднечетвертичное время. Кайнозойские складки и разломы Тянь-Шаня описаны в многочисленных публикациях [3–9 и др.].

В Тянь-Шане выделяют Западную, Центральную и Восточную провинции. Западный Тянь-Шань расположен к западу от Таласо-Ферганского разлома. Территория Центрального Тянь-Шаня находится между Таласо-Ферганским разломом на западе и меридианом 80° на востоке (рис. 1). Восточный Тянь-Шань простирается от меридиана 80° на западе до Джунгарского (Борохоро) разлома на востоке. Восточный и Джунгарский Тянь-Шань на нашей карте не представлены.

Центральный Тянь-Шань занимает обширную территорию, окаймленную хребтами: Фер-

ганским на западе, Заилийским, Киргизским, Таласским Алатау на севере, Меридиональным на востоке и Кокшал-Тоо – на юге [10]. Киргизский хребет ограничивает Центральный Тянь-Шань с севера. Межгорные и предгорные впадины Центрального Тянь-Шаня: Аксайская, Аксуская, Атбашийская (Атбашинская), Джумгальская, Кашийская (Кашгарская), Кетмень-Тюбинская, Кочкорская, Нарынская, Сусамырская, Текесская, Тоюнская мульда и Чуйская.

Горная система Тянь-Шань один из сейсмически активных районов Земли. Очаги землетрясений Тянь-Шаня являются внутриплитовыми и размещаются главным образом в верхних слоях земной коры. В работе [11] отмечено, что подавляющее большинство очагов землетрясений Тянь-Шаньского региона находятся на глубинах до 15 км, реже встречаются очаги с глубиной 16–20 км и еще реже 25 км. Очаги с глубиной до 30 км наблюдаются очень редко, т.е. землетрясения Тянь-Шаня являются коровыми, и их очаги располагаются в домезозойском основании.

На территории Тянь-Шаня отмечены многочисленные землетрясения с $M \sim 7$ и даже $M > 8$. Основная масса эпицентров сильных землетрясений с $M \geq 5$ закономерно вытягивается в виде двух сейсмогенных зон – Северо-Тянь-Шаньской и Гиссаро-Кокшальской (Южно-Тянь-Шаньской), тяготеющих, соответственно, к северным и южным участкам контрастного сочленения орогена и ограничивающих его с севера Туранской плитой и Казахским щитом, а с юга Таримской платформой. Гиссаро-Кокшальская зона является

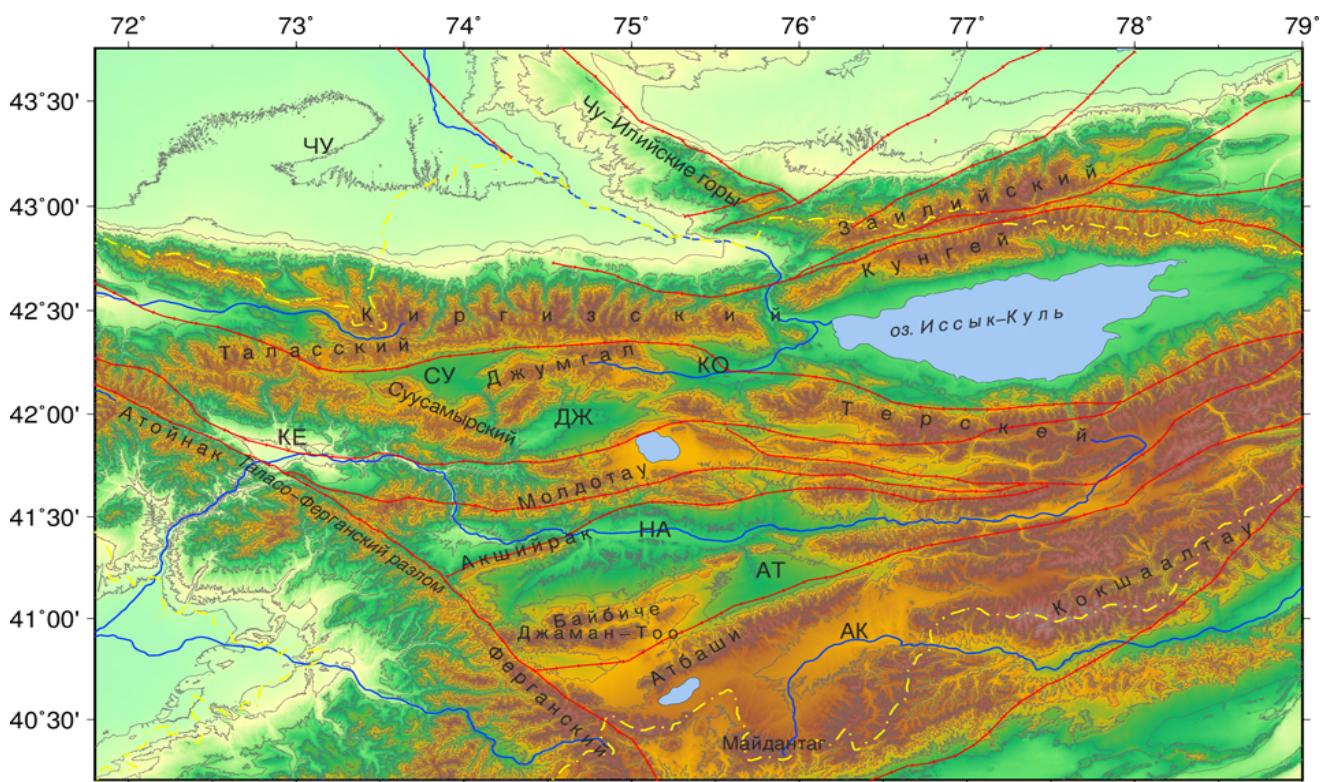


Рис. 1. Горные хребты и долины Центрального Тянь-Шаня. Межгорные и предгорные впадины: АК – Аксайская, АТ – Атбашинская (Атбасинская), ДЖ – Джумгальская, КЕ – Кетмень-Тюбинская, КО – Кочкорская, НА – Нарынская, СУ – Суусамырская, ЧУ – Чуйская (по [10]). Красными линиями обозначены региональные разломы (по [8]). Желтая штрихпунктирная линия – граница Киргизии.

Fig. 1. Mountain ranges and valleys of the Central Tien Shan. Intermontane and piedmont basins: AK, Aksay; AT, At-Bashi; DJ, Jumgal; KE, Ketmen-Tyube; KO, Kochkor; NA, Naryn; SU, Suusamyr; CHU, Chuy (according to [10]). Red lines mark regional faults (according to [8]). The yellow dash-dotted line marks the border of Kyrgyzstan.

высокосейсмичной на участке сочленения Памира и Тянь-Шаня.

Эти две крупные зоны, называемые сейсмоактивными швами первой категории, являются границами между крупными блоками Туран–Тянь-Шань–Тарим. В пределах этих сейсмоактивных швов возможны предельные для земной коры магнитуды землетрясений – $M > 8$ [5].

Современный уровень исследований деформационных процессов в тектоносфере Земли невозможен без информации о действующих в ней полях тектонических напряжений, которые можно выявить, изучая очаговые параметры землетрясений. Информацию о полях тектонических напряжений получают в основном при анализе очаговых параметров землетрясений, к которым относятся фокальные механизмы очагов. Немаловажную роль играют и динамические параметры: радиус очага r , скалярный сейсмический момент M_0 , сброс касательных напряжений $\Delta\sigma$ (далее сброс на-

пряжений), излученная сейсмическая энергия и др. Динамические параметры умеренных землетрясений Северного Тянь-Шаня рассмотрены в нашей работе [12], составлен банк данных. Данная работа предполагает расширение этого набора данных за счет рассмотрения землетрясений, для которых известен тензор сейсмического момента (TCM), а значит, и скалярный сейсмический момент M_0 . Для расчета радиуса очага предлагается использовать модели зависимости радиуса очага от магнитуды, определенные на основе теоретических или экспериментальных данных. На основе скалярного сейсмического момента и радиуса очага можно рассчитать сброс напряжений.

Для землетрясений с известными ТСМ предполагается и наличие данных о фокальных механизмах, которые можно использовать для оценки напряженно-деформированного состояния земной коры. Это позволяет исследовать связь между динамическими и кинематическими параметрами землетрясений.

В настоящей статье выполнена оценка напряженно-деформированного состояния земной коры на основе метода СТД и построены карты распределения некоторых параметров СТД. Рассчитаны динамические параметры (радиус очага r и сброс напряжений $\Delta\sigma$) 270 землетрясений Центрального Тянь-Шаня. Рассмотрена связь между типом подвижки в очаге с уровнем сброшенных напряжений и проведено сравнение уровня сброшенных напряжений с распределением коэффициента Лоде–Надаи.

Исходные данные

Рассматриваются землетрясения на территории Центрального Тянь-Шаня, для которых рассчитан тензор сейсмического момента (TCM) и скалярный сейсмический момент. Источником таких данных является каталог CMT (Global Centroid Moment Tensor catalog, <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>) и работы [13, 14], где по методу волновой

инверсии [15] получены тензоры сейсмического момента на основе данных сети KNET (Kyrgyz net). Каталог СМТ включает 63 землетрясения с $M_w = 4.6\text{--}7.2$, произошедших на территории Центрального Тянь-Шаня с 1978 по 2022 г. В работах [13, 14] TCM определены для 334 землетрясений с $M_w \geq 2.8$ на территории Центрального Тянь-Шаня с 1996 по 2021 г. Из 334 землетрясений было выбрано 207 событий, для которых TCM определены по количеству компонент (записей землетрясения) 8 и более (OBS, observation, см. легенду к рис. 2). Для рассматриваемых событий ($63 + 207 = 270$) наряду с компонентами тензора сейсмического момента известны значения скалярного сейсмического момента M_0 , моментной магнитуды M_w и параметры нодальных плоскостей фокального механизма (strike, dip, slip). На рис. 2 представлены TCM этих землетрясений. Цвет «пляжного мячика» на карте зависит от источника данных и коли-

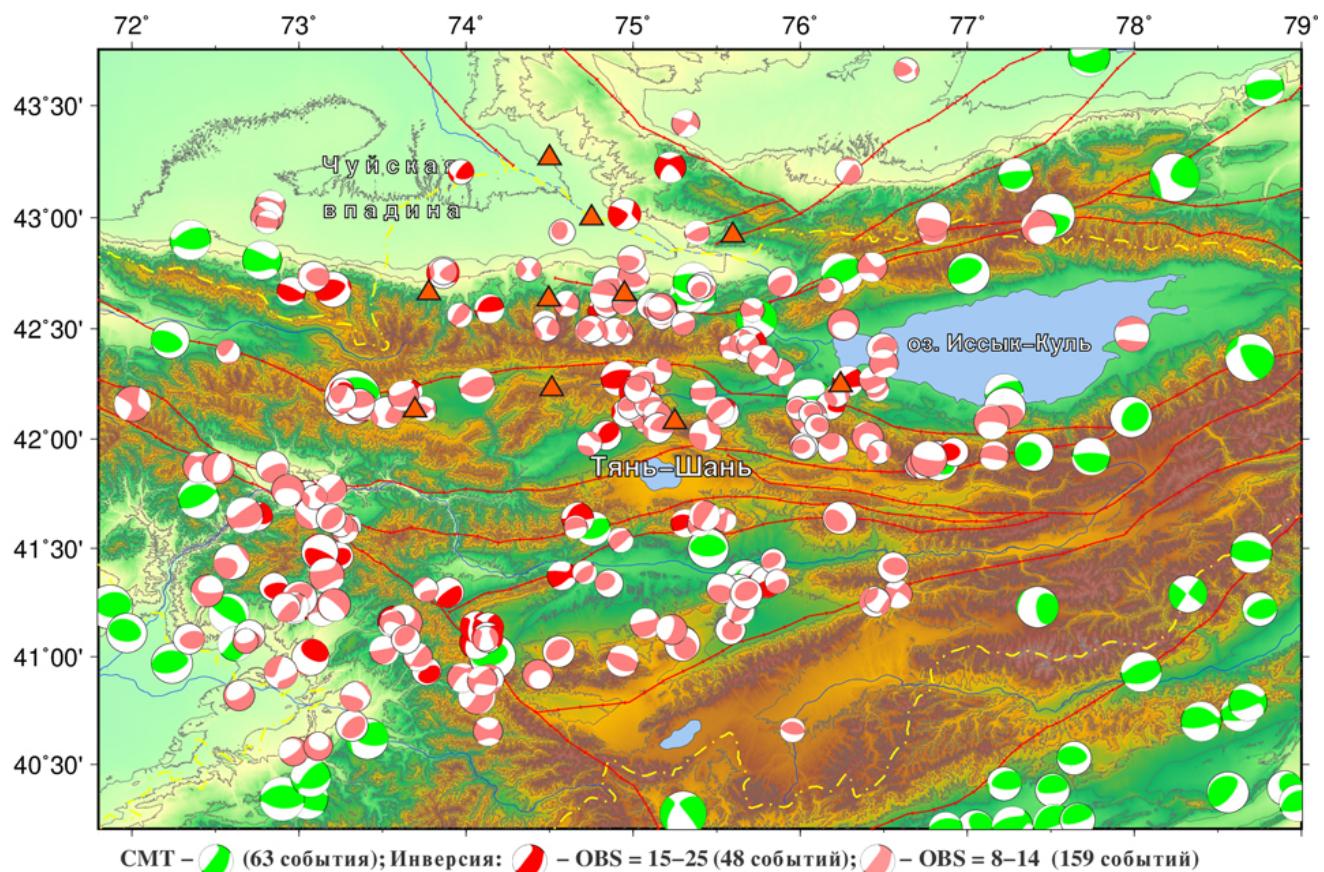


Рис. 2. Тензоры сейсмического момента 270 землетрясений Центрального Тянь-Шаня. Красными линиями обозначены региональные разломы. Положение станций сети KNET отмечено треугольниками. OBS – число наблюдений (записей) землетрясения.

Fig. 2. Seismic moment tensors of 270 earthquakes in the Central Tien Shan. Red lines indicate regional faults. The location of KNET stations are showed with triangles. OBS mark number earthquake observations (records).

чества компонент, участвующих в определении ТСМ по методу волновой инверсии [15] (см. легенду к рис. 2). Землетрясения, ТСМ для которых взяты с сайта CMT, в основном расположены в восточной и западной части рассматриваемой территории, а землетрясения из работ [13, 14] – в центральной части и вдоль Таласо-Ферганского разлома, они находятся на расстоянии 1–2° от станций сети KNET (обозначены треугольниками на рис. 2).

Некоторые количественные характеристики 270 землетрясений представлены на рис. 3. Большая часть событий имеет магнитуду $M_W = 3\text{--}5$ (рис. 3 а), основная часть землетрясений произошла на глубине до 20 км (рис. 3 с). Большая часть событий выборки произошла после 2000 г. (рис. 3 б), до 1996 г. данные взяты из каталога СМТ.

На рис. 4 показаны диаграммы направлений главных осей напряжений – сжатия (рис. 4 а) и растяжения (рис. 4 б). Согласно

диаграммам, для большинства событий рассматриваемые механизмы имеют северо-северо-западное направление оси сжатия (что характеризует состояние исследуемой территории как напряжение сжатия). Для осей растяжения при многообразии направлений незначительно выделяются восточное и северо-восточное (что дополнительно характеризует региональный характер напряженного состояния). Количественная зависимость числа землетрясений от угла погружения главных осей напряжений (относительно горизонтальной плоскости) представлена на рис. 4 с: ~75 % осей сжатия имеют угол погружения до 30° (близгоризонтальное положение), для ~45 % осей растяжения угол превышает 60° (близвертикальное положение).

Для определения количественного соотношения землетрясений по типу подвижки в очаге (рис. 5) использовались данные об углах погружения главных осей напряжений

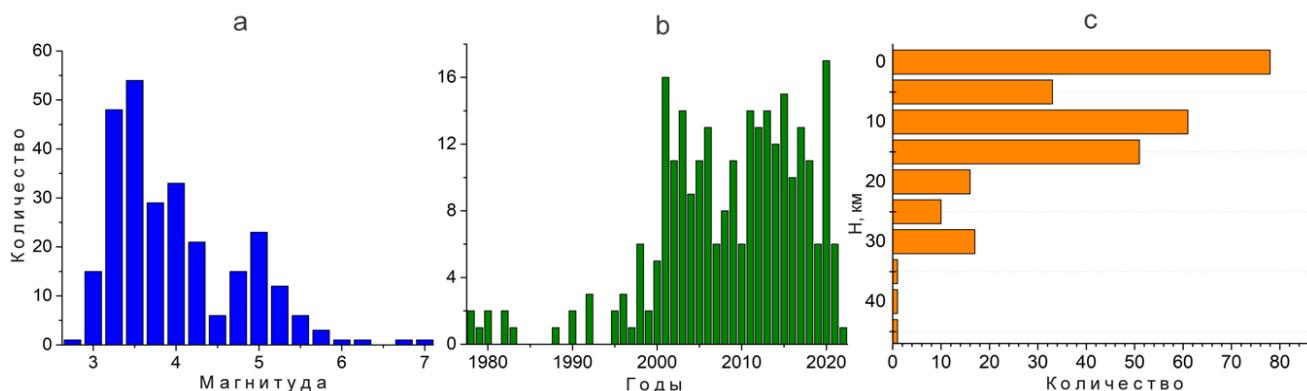


Рис. 3. Количествоное распределение рассматриваемых землетрясений (270 событий): а – по магнитуде; б – по годам; в – по глубине.
Fig. 3. Quantitative distribution of the earthquakes under consideration (270 events): a, by magnitude; b, by year; c, by depth.

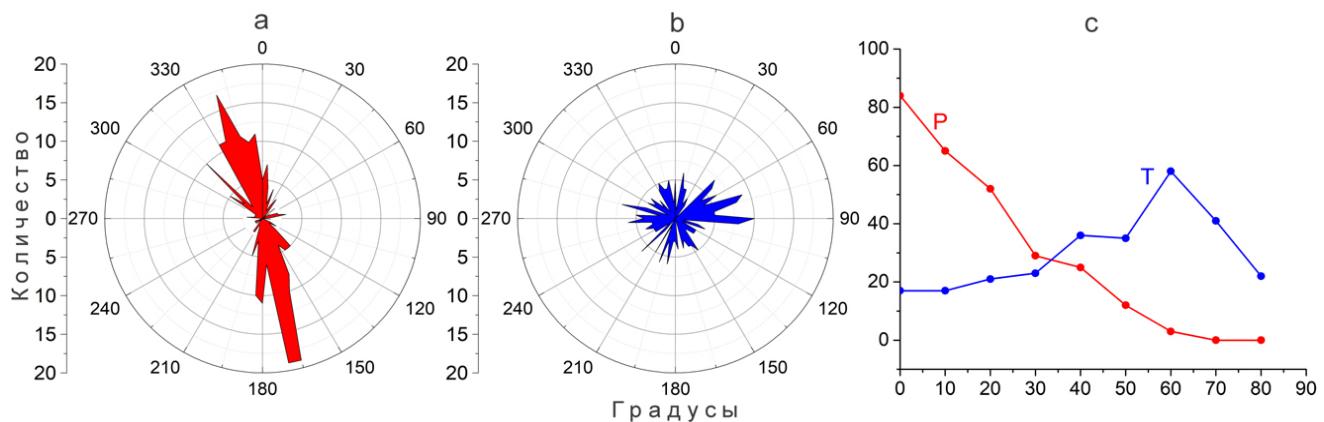


Рис. 4. Диаграммы распределения азимутов осей сжатия *P* (а), растяжения *T* (б) и зависимость числа землетрясений от угла погружения главных осей напряжений (с).
Fig. 4. Diagrams of the distribution of azimuths of the compression axes *P* (a) and tension axes *T* (b) and the dependence of the number of earthquakes on the plunge angle of the main stress axes (c).

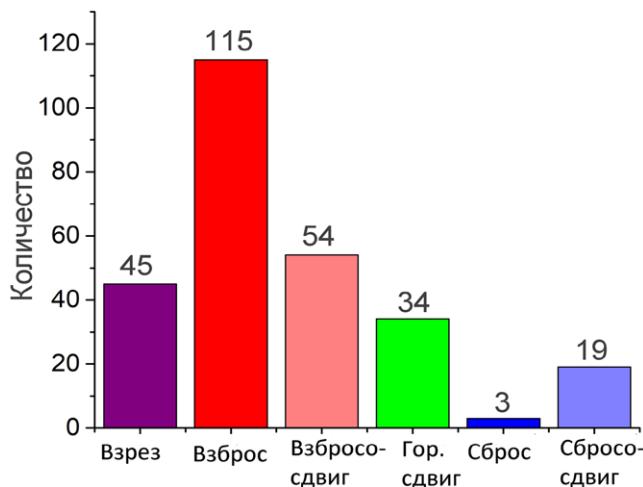


Рис. 5. Количественное распределение землетрясений (270 событий) по типу механизма очага.

Fig. 5. Quantitative distribution of earthquakes (270 events) by focal mechanism type.

(P_{pl}, T_{pl}) . Согласно полученным данным, ~17 % от общего числа событий составляют взрезы ($30^\circ \leq P_{pl} \leq 60^\circ$, $30^\circ \leq T_{pl} \leq 60^\circ$), ~63 % – взбросы ($P_{pl} < 30^\circ$, $T_{pl} > 60^\circ$) и взбросо-сдвиги ($P_{pl} < 30^\circ$, $30^\circ \leq T_{pl} \leq 60^\circ$), ~13 % – горизонтальные сдвиги ($P_{pl} < 30^\circ$, $T_{pl} < 30^\circ$), ~7 % в сумме составляют сбросы ($P_{pl} > 60^\circ$, $T_{pl} < 30^\circ$) и сбросо-сдвиги ($30^\circ \leq P_{pl} \leq 60^\circ$, $T_{pl} < 30^\circ$). Для рассматриваемой территории наиболее характерны землетрясения с типом подвижки взбросы, взбросо-сдвиги и взрезы (70 % событий).

Методика

Сейсмоконтактные деформации. Для оценки напряженно-деформированного состояния используется метод СТД, который основан на подходах, предложенных в работах Ю.В. Ризниченко и С.Л. Юнга, и использует данные о фокальных механизмах землетрясений. Методика расчета СТД описана во многих работах (в частности, см. подробное описание в [16, 17]) и здесь не приводится.

Однако стоит отметить, что расчет СТД выполняется суммированием матриц индивидуальных механизмов в пределах каждой элементарной подобласти. Вклад каждого землетрясения определялся на основе региональной весовой функции (см. [16]). Выбор узловых точек осуществлен по сетке с шагом 0.25° (~25 км), при этом рассматривает-

ся область вокруг узловой точки с радиусом $R = 0.35^\circ$ (~35 км). Некоторое пересечение элементарных областей позволяет получить сглаженную картину. Глубина исследуемого слоя 30 км. Для каждой узловой точки рассчитывался коэффициент соответствия κ (каппа), т.е. интенсивность результирующей матрицы, и в дальнейшем учитывались те области осреднения, в которых κ превышает значение из табл. 4 в работе [18, с. 88–89] для соответствующей количественной выборки. При расчете использовалось значение κ , соответствующее кумулятивной вероятности 95 %. Для некоторых объемов выборки данные из указанного источника приведены в табл. 1.

Сброшенные напряжения. Подробная методика расчета динамических параметров (ДП) землетрясений Северного Тянь-Шаня на основе построения очагового спектра приведена в работе [12]. Определение основных параметров очагового спектра – угловой частоты f_0 и спектральной плотности Ω_0 – позволяет рассчитать две важные характеристики: скалярный сейсмический момент M_0 и радиус очага r .

Скалярный сейсмический момент согласно [19]:

$$M_0 = 4\pi\rho RV_S^3\Omega/\Psi_0 \quad (1)$$

где R – расстояние от очага станции или до референтной точки, где определяется спектр, V_S – скорость S -волны, ρ – плотность пород

Таблица 1. Мода M и критические значения параметра κ , соответствующие разным кумулятивным вероятностям и объему выборки (N) [18]

Table 1. Mode M and critical values of the parameter κ corresponding to different cumulative probabilities and sample sizes (N) [18]

N	M	κ 90 %	κ 95 %
5	0.40	0.60	0.65
7	0.35	0.51	0.55
10	0.28	0.42	0.46
15	0.23	0.35	0.38
20	0.20	0.3	0.337
35	0.16	0.23	0.25
55	0.11	0.18	0.20
100	0.09	0.14	0.15
700	0.04	0.08	0.09
1000	0.03	0.05	0.05

в области очага, Ψ_0 – фактор направленности излучения из очага (для источника, описываемого скачком смещения на плоскости разрыва), среднее значение этого фактора принимается 0.64 [20].

Радиус очага вычисляется на основе выражения [21–23]:

$$r = kV_s/f_0, \quad (2)$$

где k – численный коэффициент, зависящий от модели разрыва в очаге.

Для определения динамических параметров очага по параметрам спектров чаще других используются две модели: ставшая почти классической модель Брюна [24, 25] и модель Мадариаги [26, 27]. При использовании простейшей модели Брюна $k = k_B = 0.37$ из выражения (2) определяют так называемый радиус Брюна, $r = r_B$. Усовершенствованная модель Мадариаги–Канеко–Ширера может считаться предпочтительной по отношению к другим моделям [12]. Соответствующее этой модели значение $k_{KS} = 0.26$ (весьма близкое к общефизической оценке) можно использовать как «эффективное», k_{ef} , для проведения массовых расчетов по формуле (2). Отличие оценок сброса напряжений, получаемых для других моделей разрыва (Брюна, Мадариаги, Сато и др.), от ре-

зультатов расчета $\Delta\sigma$ с использованием значения $k_{ef} = 0.26$ не превышает 2.9 раза [12].

Зная две характеристики землетрясения, рассчитанные по выражениям (1) и (2), можно рассчитать сброс касательных напряжений [21, 24, 25, 28]:

$$\Delta\sigma = 7M_0 / 16r^3. \quad (3)$$

Построение очагового спектра связано со значительными временными затратами, и в настоящей работе, согласно [29], предлагается для расчета $\Delta\sigma$ использовать сейсмические события, для которых известен сейсмический момент M_0 (например, из каталога CMT), а радиус очага определять на основе теоретических моделей зависимости радиуса очага от магнитуды землетрясения, описанных, например, в работах [20, 30, 31 и др.], или использовать зависимость, полученную на основе анализа экспериментальных данных (построение очагового спектра) в работе [12] для землетрясений Северного Тянь-Шаня.

Стоит отметить следующее. В работе [12] рассматриваются землетрясения с $M_w = 2.5–5.5$, а в данной работе – с $M_w = 2.8–7.2$, поэтому использование зависимости из работы [12] для расчета радиуса очага с $M_w \geq 4$ не является корректным: полученное этим способом выраже-

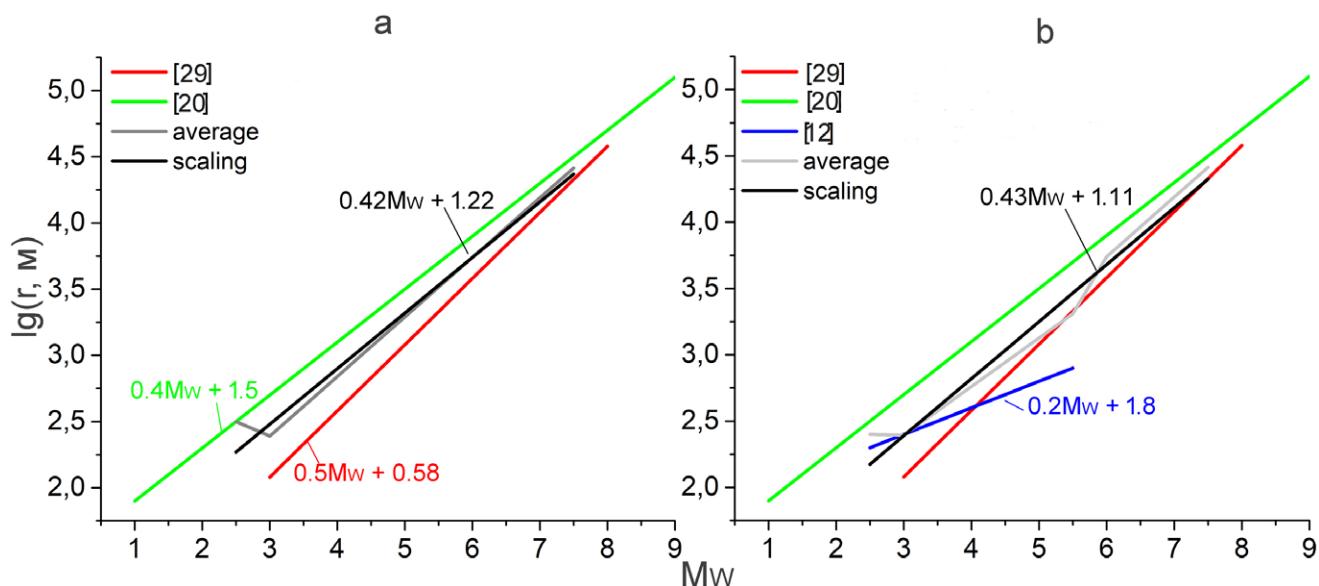


Рис. 6. Зависимость логарифма радиуса очага r_B от моментной магнитуды M_w для рассматриваемых моделей; среднее значение логарифма радиуса очага по рассматриваемым моделям (серая линия) и регрессия, построенная по распределению среднего значения логарифма радиуса очага (черная линия): а – модели из работ [20] и [30]; б – модели из работ [20], [30], и [12].

Fig. 6. Dependence of the source radius r_B on the moment magnitude M_w for the models under consideration; the average value of the logarithm of the radius of the source for the models (gray line) and the regression calculated on the distribution of the average value of the logarithm of the radius of the source (black line): a, models from [20] and [30]; b, models from [20], [30], and [12].

Таблица 2. Логарифмические значения радиуса по Брюну, $\lg(r_B, \text{м})$, в зависимости от магнитуды M_w для рассматриваемых моделей, а также среднее значение логарифма радиуса по рассматриваемым моделям и значения логарифма радиуса очага, рассчитанные по построенным регрессиям распределения средних значений

Table 2. Logarithmic values of the radius according to Brun, $\lg(r_B, \text{m})$, depending on the magnitude M_w for the models under consideration, as well as the average value of the logarithm of the radius for the models under consideration and the values of the logarithm of the radius of the source, calculated from the constructed regressions of the distribution of average values

M_w	$\lg(r, \text{м})$			Модели 1 и 2		Модели 1–3	
	1	2	3	C3	CM	C3	CM
1.0	1.90						
1.5	2.10						
2.0	2.30						
2.5	2.50	2.30	2.50	2.27	2.40	2.18	
3.0	2.08	2.70	2.40	2.39	2.48	2.39	2.39
3.5	2.33	2.90	2.50	2.62	2.69	2.58	2.61
4.0	2.58	3.10	2.60	2.84	2.90	2.76	2.82
4.5	2.83	3.30	2.70	3.07	3.11	2.94	3.04
5.0	3.08	3.50	2.80	3.29	3.32	3.13	3.25
5.5	3.33	3.70	2.90	3.52	3.53	3.31	3.47
6.0	3.58	3.90		3.74	3.74	3.74	3.68
6.5	3.83	4.10		3.96	3.95	3.97	3.90
7.0	4.08	4.30		4.19	4.16	4.19	4.11
7.5	4.33	4.50		4.42	4.37	4.42	4.33
8.0	4.58	4.70					
8.5		4.90					
9.0		5.10					

Примечание. 1 – $0.5 \cdot M_w + 0.58$ [30], 2 – $0.4 \cdot M_w + 1.50$ [20], 3 – $0.2 \cdot M_w + 1.80$ [12]; С3 – среднее значение по рассматриваемым моделям, CM – значение по уравнению регрессии распределения С3. Выделены строки в диапазоне магнитуд рассматриваемых землетрясений $M_w = 2.8\text{--}7.2$.

Note. 1, $0.5 \cdot M_w + 0.58$ [30]; 2, $0.4 \cdot M_w + 1.50$ [20]; 3, $0.2 \cdot M_w + 1.80$ [12]; C3, average value for the models under consideration; CM, value for the regression equation of the average value distribution. Rows in the magnitude range of the earthquakes under consideration $M_w = 2.8\text{--}7.2$ are highlighted.

ние имеет дефицит данных о землетрясениях с $M_w \geq 4$. Какую же модель выбрать для расчета радиуса очага? Используем два подхода к выбору моделей.

На рис. 6 представлены зависимости радиуса очага (модель Брюна) от моментной магнитуды M_w для моделей из работ [20, 30, 12]. Каждая модель показана в границах магнитуд, для которых был определен радиус очага. На рис. 6 а показаны модели из работ [20] и [30], а также среднее значение по двум моделям и ее регрессия (первый подход), а на рис. 6 б к первым двум моделям добавлена модель из работы [12] (второй подход). Среднее значение рассчитывалось для диапазона магнитуд рассматриваемых землетрясений 2.8–7.2 (табл. 2). Для первых двух моделей (рис. 6 а) по усреднен-

ным данным получено уравнение регрессии $\lg(r_B, \text{м}) = 0.42M_w + 1.22$; по сумме трех моделей (рис. 6 б) – $\lg(r_B, \text{м}) = 0.43M_w + 1.1$. Эти выражения отличаются друг от друга незначительно. Радиус очага по модели Брюна рассчитывали на основе выражения, полученного по сумме трех моделей (рис. 6 б), т.е. с учетом модели, полученной по землетрясениям Северного Тянь-Шаня (второй подход). Наряду с радиусом очага по модели Брюна рассчитан радиус очага по модели Мадариаги–Канеко–Ширера: при его расчете радиус по Брюну умножается на отношение коэффициентов k_{KS} и k_B (0.26/0.37), которые описаны выше. Сброс напряжений тоже рассчитан для двух моделей – Брюна и Мадариаги–Канеко–Ширера. Результаты расчетов представлены в табл. I (см. приложение).

Результаты

Карта СТД

На рис. 7 представлена карта СТД, где режимы СТД определены для 215 узловых точек. Для 99 точек решения получены по 2–5 землетрясениям, а для остальных по 6–32. Режим СТД обозначается значком, представляющим прямоугольник с перпендикулярными к нему стрелками из его центра. Направление прямоугольника и стрелок на горизонтальной поверхности позволяет судить, соответственно, об азимутальном направлении осей укорочения и удлинения (азимут ноль градусов – на-

правление на север). Цвет фигуры определяет режим деформации, длина прямоугольника и стрелок – величину компоненты СТД (собственное значение) вдоль соответствующей главной оси.

На исследуемой территории поле деформации по СТД имеет мозаичную структуру. Проявляются следующие режимы деформации: переходный режим от вертикального сдвига к сжатию (восточная часть хр. Молдо-Тоо), сжатие (по бортам Нарынской, Суусамырской впадин, Киргизский хр., центральная часть Таласо-Ферганского разлома, хр. Терской-

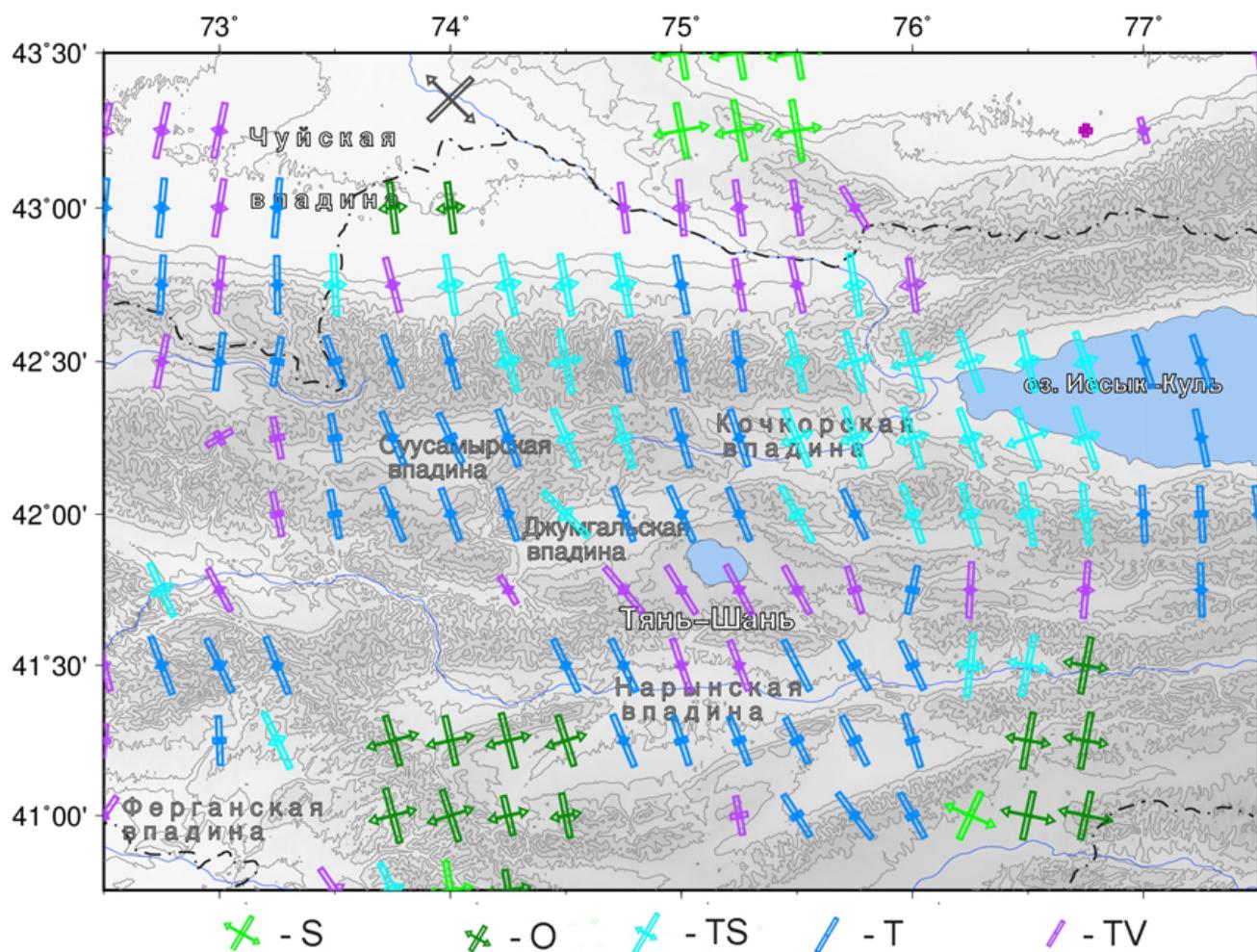


Рис. 7. Карта распределения режимов СТД на исследуемой территории, построенная по сетке с шагом 0.25° и с радиусом круговой области $R = 0.35^\circ$. Количество узловых точек – 215. Штрихпунктирные линии – государственные границы. Режимы СТД: S – горизонтальный сдвиг, O – косой сдвиг, T – сжатие, TS – транспрессия, TV – переходный режим от вертикального сдвига к сжатию (согласно схеме классификации [32]). Длина прямоугольника и стрелок определяет величину компоненты СТД (собственное значение) вдоль соответствующей главной оси (масштаб собственного значения отмечен на карте серым значком вверху).

Fig. 7. Map of the STD modes in the study area constructed on a grid with a step of 0.25° and a radius of the circular area $R = 0.35^\circ$. The number of nodal points is 215. Dash-dotted lines are state boundaries. Classification of STD modes: S, strike-slip fault; O, oblique; TS, transpression; T, thrust; TV, underpressure (according to the classification scheme [32]). The length of the rectangle and arrows determines the magnitude of the STD component (eigenvalue) along the corresponding main axis (the scale of the eigenvalue is marked on the map with a gray icon).

Алатау), транспрессия (юго-западная часть Иссык-Кульской котловины, центральная часть Киргизского хребта), косой сдвиг (южная часть Таласо-Ферганского разлома и область, где восточная окраина Нарынской впадины соединяется с хр. Нарын) и горизонтальный сдвиг (Чу-Илийские горы). При всей неоднородности (мозаичности) поля деформации, на исследуемой территории преобладают типы деформации, которые относятся к режиму сжатия с различающимися долями сдвиговой составляющей. Для осей укорочения преобладает северо-северо-западное направление, в отдельных точках юго-восточной области – северо-северо-восточное, а в северной части Таласо-Ферганского разлома – северо-западное направление.

Коэффициент Лоде–Надаи

На рис. 8 представлено площадное распределение коэффициента Лоде–Надаи, который является инвариантной характеристикой и позволяет судить о деформации в целом. Центральная и восточная части Киргизского хребта, западный борт Иссык-Кульской котловины, западная часть хр. Терскей-Алатау и западная часть хр. Нарын характеризуются режимом простого сжатия. Режим преобладания простого сжатия проявляется в центральной части Таласо-Ферганского разлома и в восточной части хр. Молдо-Тоо. Режим преобладания простого растяжения – на юго-восточных бортах Нарынской и западных бортах Суусамырской впадины. Большой частью режим простого сжатия проявляется в северной части Центрального Тянь-Шаня.

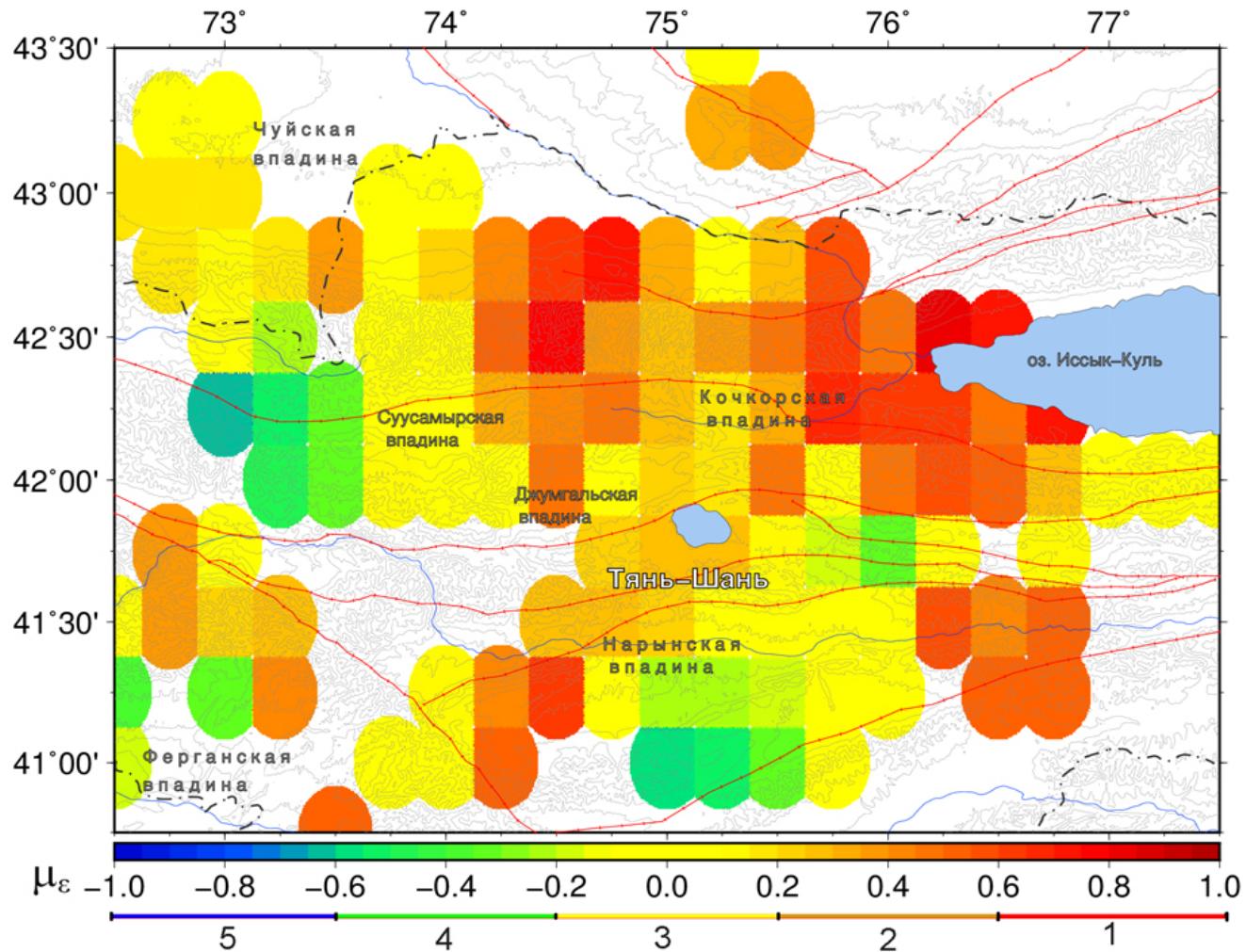


Рис. 8. Площадное распределение коэффициента Лоде–Надаи, μ_ε : 1 – простое сжатие, 2 – преобладание простого сжатия, 3 – простой сдвиг, 4 – преобладание простого растяжения, 5 – простое растяжение.

Fig. 8. Areal distribution of the Lode–Nadai coefficient μ_ε : 1, simple compression; 2, predominance of simple compression; 3, simple shear; 4, predominance of simple tension; 5, simple tension.

Сброс напряжений

Значения сброса напряжений получены для двух моделей радиуса очага (см. табл. I, приложение).

На рис. 9 представлено эпицентральное положение исследуемых землетрясений. Показан уровень сброшенных напряжений, рассчитанных для модели Мадариаги–Канеко–Ширера. Сброшенные напряжения для рассматриваемых землетрясений варьируют в диапазоне от 10 до 250 бар. Максимальный сброс напряжений (250 бар) произошел при Суусамырском землетрясении 19 августа 1992 г. с $M_w = 7.2$. Магнитуда землетрясений, для которых сброс напряжений более 120 бар (120–202), находится в диапазоне $M_w = 5.3$ –6.9. Решения ТСМ этих землетрясений опубликованы на сайте СМТ. Максимальный сброс напряжений для землетрясений, где ТСМ опре-

делены по данным сети KNET, составляет 74 бар, и магнитуда этих землетрясений не превышает 4.7. Землетрясения со значительным уровнем сброса напряжений сосредоточены в восточной части рассматриваемой территории и по бортам Ферганской впадины. В северной части выделяется группа землетрясений, произошедших вдоль Иссык-Атинского разлома в восточной части Киргизского хребта, – для них сброс напряжений превышает 100 бар.

Для построения площадного распределения сброшенных напряжений для каждой рассматриваемой ячейки (размер ячейки $0.25^\circ \times 0.25^\circ$) используется выражение

$$\Delta\sigma_w = \frac{7(\sum M_{0i})}{16(\sum r_i^3)}, \quad (4)$$

которое аналогично выражению (3), используемому для единичного землетрясения, с той

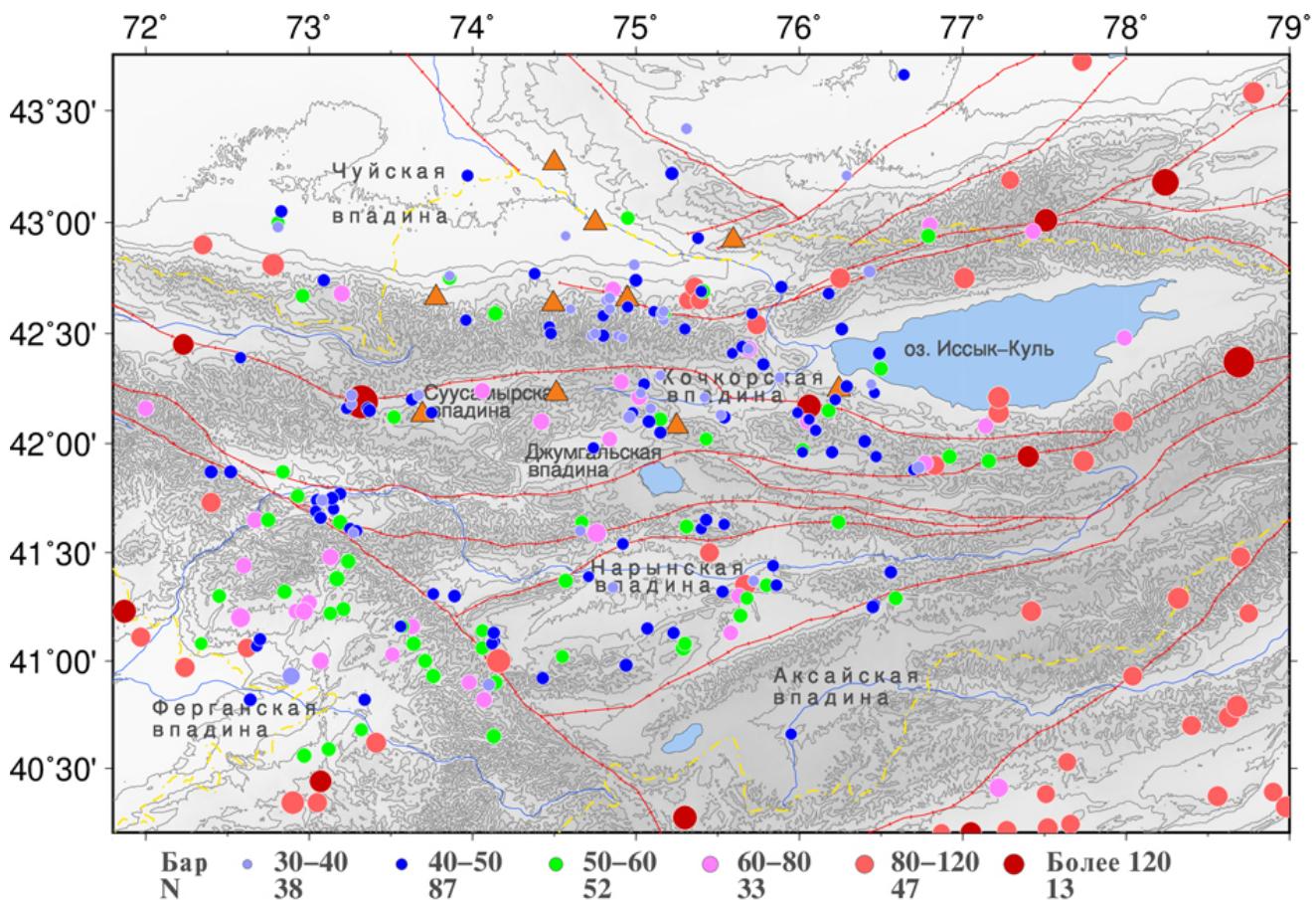


Рис. 9. Эпицентральное положение исследуемых землетрясений (270 событий). В легенде указаны величины сброшенных напряжений, рассчитанные для модели Мадариаги–Канеко–Ширера, и количество землетрясений (N), которое соответствует этим величинам.

Fig. 9. Epicentral position of the studied earthquakes (270 events). The color of the dots depends on the value of the stress drops calculated for the Madariaga–Kaneko–Shearer model (see the legend at the bottom of the map). N, the number of earthquakes that correspond to these values.

разницей, что оно применяется для ячейки исследования, т.е. в ячейке сначала суммируются сейсмические моменты всех землетрясений, значения радиусов в третьей степени, а затем вычисляются сброшенные напряжения. Предложенный метод усреднения, с помощью которого введено $\Delta\sigma_w$, аналогичен методу перехода к «средневзвешенному механизму очага», который предложен в работе [18], а механизм расчета весовой функции хорошо представлен в [16].

Площадное распределение логарифма сброшенных напряжений ($\lg \Delta\sigma_w$, бар), рассчитанное по выражению (4), представлено на рис. 10. Логарифмический масштаб позволяет более ярко выделить участки с минимальным значением сброшенных напряжений. Наибольшим уровнем $\Delta\sigma_w$ характеризуется ячейка, в которой расположена очаговая область Суусамырского землетрясения (количество событий 5, $\Delta\sigma_w = 251$ бар). В юго-восточной части Кочкорской впадины (очаговая область Кочкорского землетрясения 25.12.2006,

$K = 14.8$) сброс напряжений составляет $\Delta\sigma_w = 144$ бара (6 событий). Значительные величины $\Delta\sigma_w$ проявляются в отдельных ячейках Киргизского хребта, Терской и Кунгей Алатоо, Таласо-Ферганского разлома ($\Delta\sigma_w \sim 125$ бар). На Иссык-Атинском разломе, в восточной части Киргизского хребта, отмечаются ячейки с $\Delta\sigma_w \sim 80$ бар. Такого же уровня сброс напряжений отмечается в ячейках, расположенных восточнее асейсмической Аксайской впадины (хр. Кокшалтау, Южно-Тянь-Шаньская сейсмогенная зона, данные СМТ). Для большей части рассматриваемой территории уровень сброшенных напряжений $\Delta\sigma_w$ составляет ~ 65 бар (этому соответствуют ячейки зеленого цвета). В ячейках голубого цвета сброс напряжений соответствует 30–40 бар.

Сравнение кинематических и динамических параметров

Результаты анализа величины сброса напряжений в зависимости от типа подвиж-

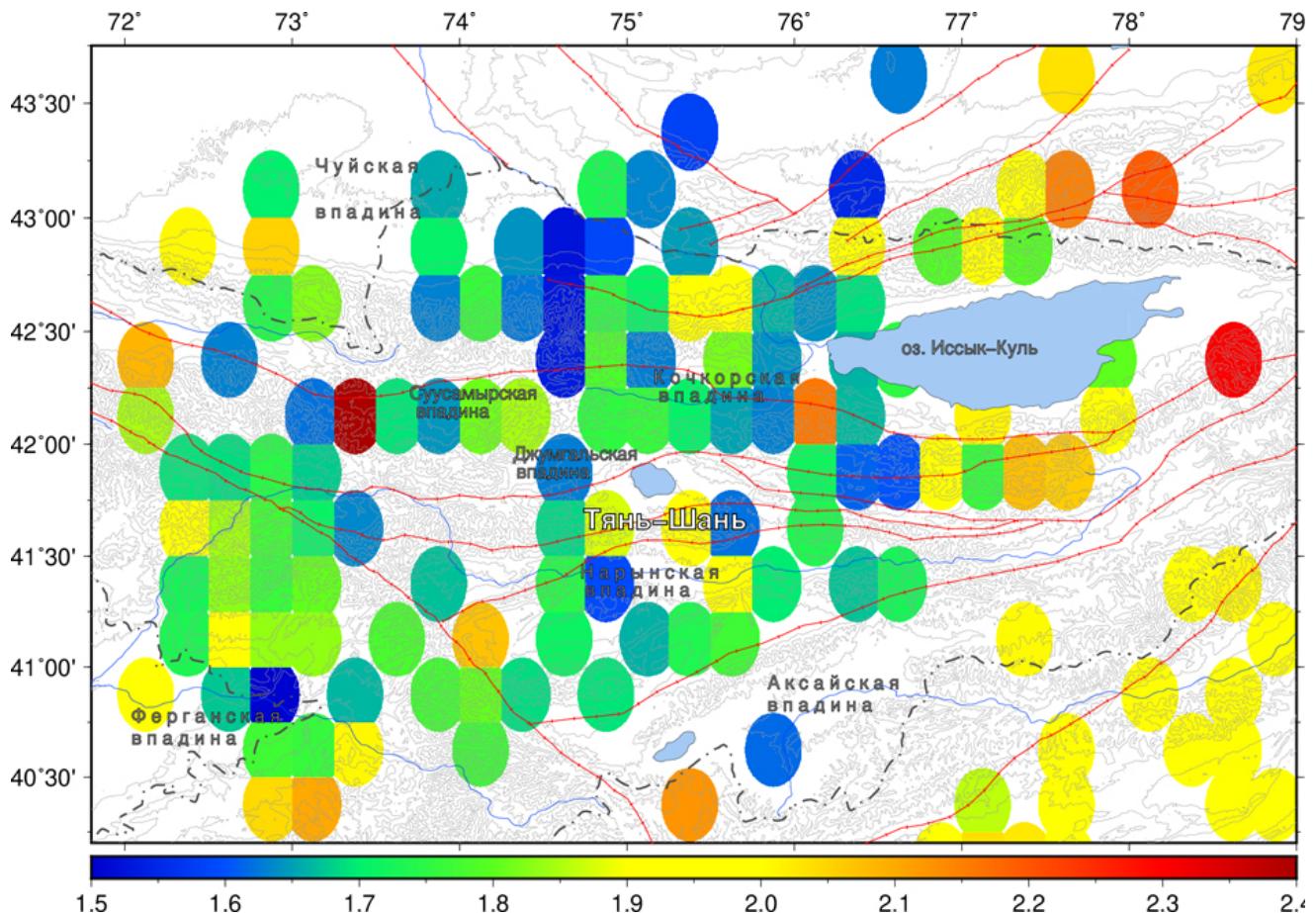


Рис. 10. Площадное распределение логарифма сброшенных напряжений, рассчитанных для модели Мадариаги–Канеко–Ширера.
Fig. 10. Areal distribution of the logarithm of stress drops calculated for the Madariaga–Kaneko–Shearer model.

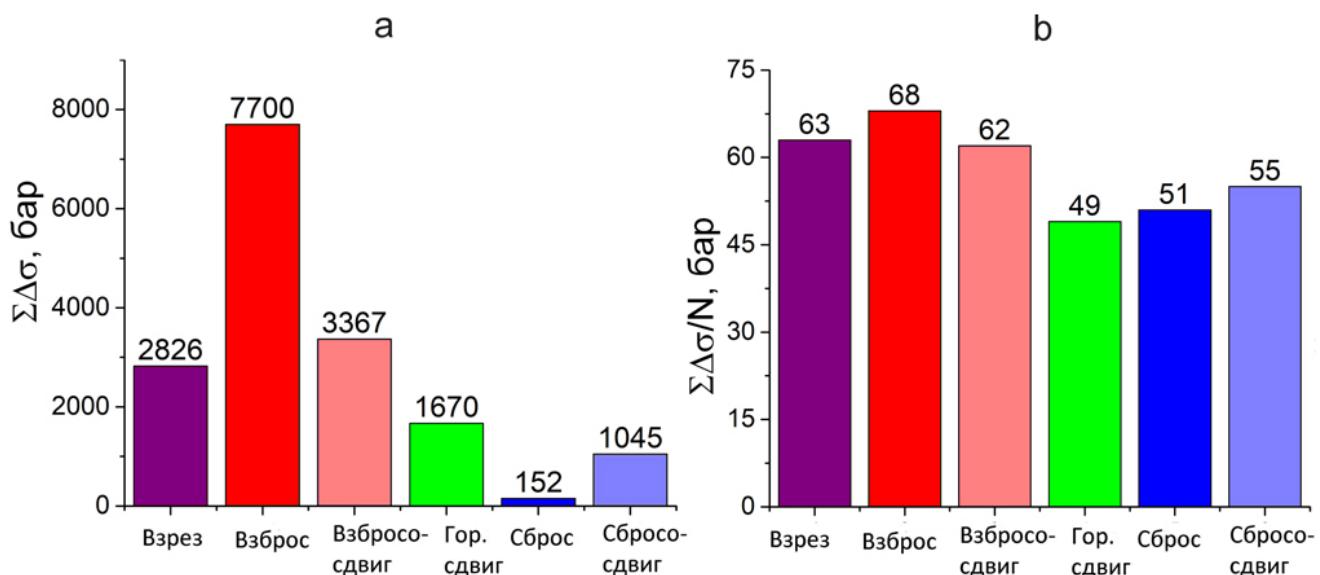


Рис. 11. Зависимость суммы (а) и среднего значения сброса напряжений (б) от типа подвижки в очаге землетрясения.

Fig. 11. Dependence of the sum (a) and average value of stress drop (b) on the type of slip in the earthquake source.

ки в очаге землетрясения представлены на рис. 11 (количественное распределение землетрясений по типу механизма очага см. на рис. 5). Максимальный суммарный сброс напряжений произошел при землетрясениях взбросового типа, минимальный – при сбросах. Сброс напряжений при взрезах, взбросах и взбросо-сдвигах в сумме составляет 83 % от всей величины сброса напряжений. Максимальное среднее значение сброса напряжений соответствует типу механизма взброс, минимальное – типу горизонтальный сдвиг.

Ранее анализ связи уровня сброса напряжений в зависимости от механизма очага для землетрясений Северного Тянь-Шаня был рассмотрен в работах [12, 33]. В работе [33] рассматривалось 87 землетрясений с $K = 9.5–13.7$, в [12] банк данных по ДП был расширен до 183 событий с $K = 8.7–14.8$. В [33] определена связь вида подвижки от уровня сброшенных напряжений, установлено, что события взбросового типа вносят значительный вклад в уровень падения напряжений. В [12] сопоставление сброшенных напряжений и типов фокальных механизмов показало, что для событий одного класса, имеющих взбросовый механизм, средний уровень сброшенных напряжений выше, чем для событий того же класса с другими фокальными механизмами. Результаты исследования сброшенных напряжений для 270 землетрясений Центрального

Тянь-Шаня с $M_w = 2.8–7.2$ ($K \sim 9–17$) (рис. 10) свидетельствуют о том же и подтверждают ранее полученные результаты.

Для сравнения величины сброшенных напряжений с распределением коэффициента Лоде–Надаи на исследуемой территории построена совместная карта рассматриваемых параметров (рис. 12). Сравнение указанных параметров проведено в пределах территории, для которой получено распределение коэффициента Лоде–Надаи (см. рис. 8). Из рассматриваемых событий в выделенную область попало 204 землетрясения. Посчитано количество событий и суммарный сброс напряжений для землетрясений в областях с разным режимом деформации, который определяется величиной коэффициента Лоде–Надаи. В табл. 3 представлены некоторые количественные характеристики сравнительного анализа.

По данным табл. 3, 100 (~50 %) землетрясений локализованы в области деформации простого сжатия и преобладания простого сжатия, суммарный сброс напряжений составил 5032 бара. В области простого сдвига находится 84 (41 %) землетрясения. Малочисленны землетрясения (20 событий, 9 %) в области преобладания простого растяжения с суммарным сбросом напряжений 1329 бар. Очаговая зона Суусамырского землетрясения расположена в области с режимом преобладания простого растяжения. Это связано с тем,

Таблица 3. Результаты сравнения распределения величины сброшенных напряжений $\Delta\sigma$ и коэффициента Лоде–Надай μ_e

Table 3. Results of comparison of the distribution of the value of stress drops $\Delta\sigma$ and the Lode–Nadai coefficient μ_e

Показатель	Режим деформации				
	простое сжатие	преобладание простого сжатия	простой сдвиг	преобладание простого растяжения	простое растяжение
μ_e	$0.6 \leq \mu_e \leq 1.0$	$0.2 < \mu_e < 0.6$	$-0.2 \leq \mu_e \leq 0.2$	$-0.6 < \mu_e < -0.2$	$-1.0 \leq \mu_e \leq -0.6$
$\Sigma\Delta\sigma$, бар	1280	3752	5558	1329	0
N	24	76	84	20	0

что в нее попали землетрясения с такими механизмами очагов, как взбросы (2 события), взбросо-сдвиги (2 события) и взрезы (4 события). В целом можно отметить преобладающее количество землетрясений в области с $\mu_e > 0.2$, соответствующей режиму деформации простого сжатия и преобладания простого сжатия.

Сравнительный анализ кинематических и динамических параметров землетрясений не только подтвердил выводы, полученные при сравнении землетрясений Северного Тянь-Шаня, но и подкрепил их количественными оценками.

Предложенный в данной работе подход к расчету радиуса очага позволил рассчитать

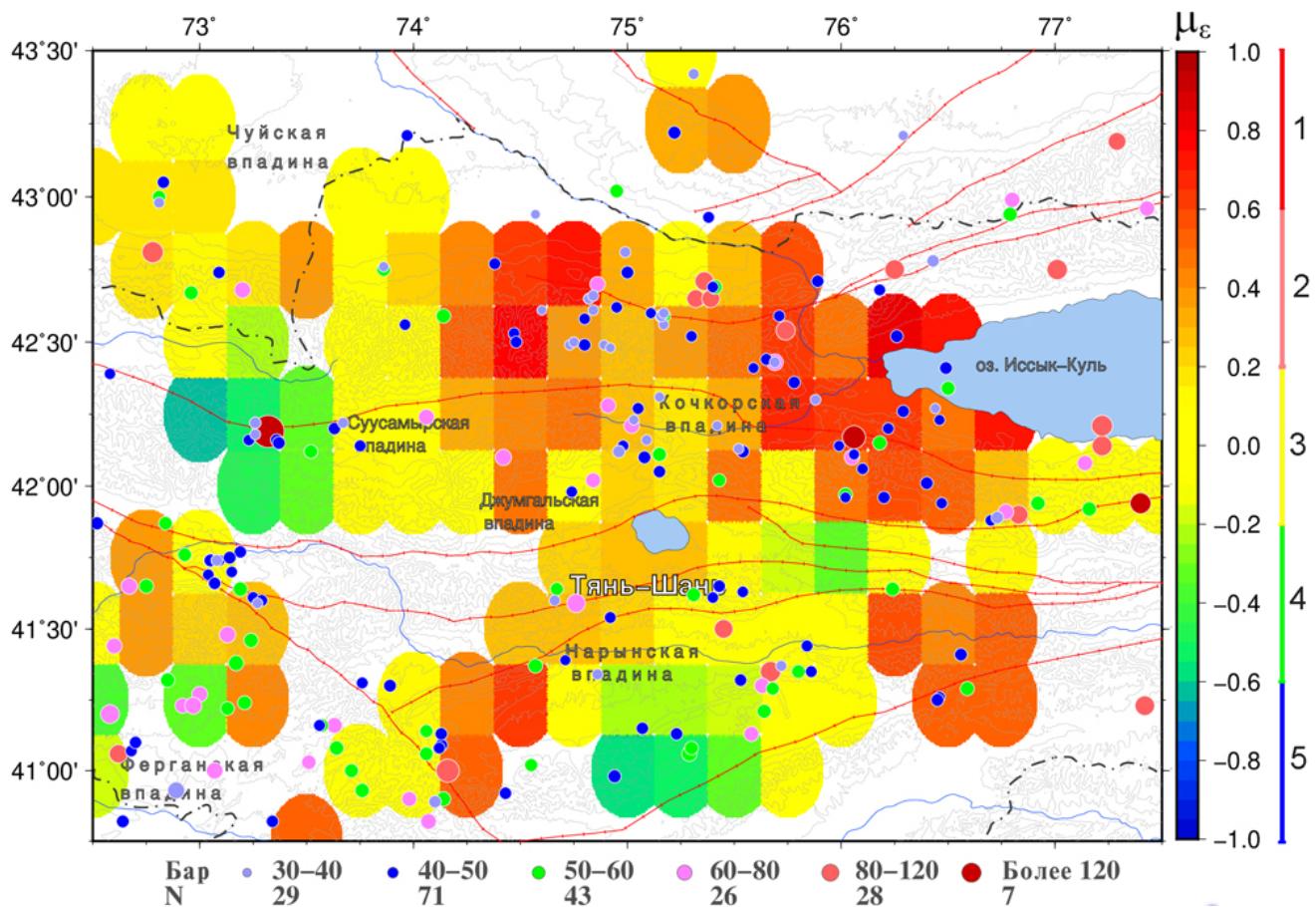


Рис. 12. Распределение коэффициента Лоде–Надай и эпицентральное положение исследуемых землетрясений. Цвет кружка отражает величину сброшенного напряжения.

Fig. 12. Distribution of the Lode–Nadai coefficient and the epicentral location of the study earthquakes. The color of the circle shows the value of the stress drops.

сброс напряжений для 270 землетрясений, произошедших на территории Центрального Тянь-Шаня. Вполне вероятно, что такой подход не дает точной оценки радиуса очага и, соответственно, сброса напряжений. Можно полагать, что оценки параметров землетрясений в большой степени не точны или даже условны. Например, расчет радиуса очага по выражению (2), где участвует угловая частота f_0 , определяемая из очагового спектра, может быть выполнен лишь приближенно, что связано прежде всего с трудностями построения очагового спектра, которое требует применения различных поправок и т.д.

Заключение

На основе данных о тензорах сейсмического момента 270 землетрясений, произошедших с 1978 по 2022 г. на территории Центрального Тянь-Шаня, проведен анализ напряженно-деформированного состояния земной коры и рассчитаны динамические параметры сейсмических событий. Источником данных о ТСМ землетрясений служили сайт СМТ (63 землетрясения) и данные, опубликованные в работах А.Д. Костюка и Н.А. Сычевой (207 землетрясений). Моментная магнитуда рассматриваемых событий $M_w = 2.8\text{--}7.2$. Проведен анализ фокальных механизмов рассматриваемых событий.

Для исследуемой территории характерны землетрясения с взбросовым (врез, взброс, взбросо-сдвиг) типом подвижки. Значительная часть осей сжатия имеет северо-северо-западное направление. Для 75 % землетрясений оси сжатия имеют угол погружения не более 30° (близгоризонтальное). Для оценки параметров напряженно-деформированного состояния исследуемой территории применен метод СТД. Построены карты СТД, а также карты распределения коэффициента Лоде–Надаи. По картам СТД определены режимы деформации и направление осей укорочения. На рассматриваемой территории наблюдаются следующие режимы деформационных обстановок (согласно классификации режимов СТД по Юнга С.Л.): сжатие, транспрессия, горизонтальный сдвиг и переходный режим от вертикального сдвига к сжатию. Согласно значениям коэффициента Лоде–Надаи, для исследуемой территории ха-

рактерны такие режимы деформации земной коры, как простое сжатие, преобладание простого сжатия и простой сдвиг.

В работе используется подход к расчету радиуса очага на основе осреднения теоретических и экспериментальных моделей зависимости радиуса очага от магнитуды, опубликованных в работах по исследованию динамических параметров. Рассчитаны радиусы очага для модели Брюна и Мадариаги–Канеко–Ширера и соответствующие данным радиусам очага сброшенные напряжения. Составлен каталог динамических параметров 270 землетрясений, произошедших на территории Центрального Тянь-Шаня.

Проведено сравнение уровня сброшенных напряжений (динамических параметров) с типом подвижки в очаге и распределением коэффициента Лоде–Надаи (кинематические параметры). Установлено, что события взбросового типа вносят значительный вклад в уровень падения напряжений, наименьшие значения сброса напряжений снимаются при горизонтальном сдвиге. Значительное количество землетрясений Центрального Тянь-Шаня располагается в областях с $\mu_e > 0.2$, с режимом деформации, соответствующим простому сжатию и преобладанию простого сжатия.

Данные, полученные в этой работе, отражают приближенную картину сброса напряжений на исследуемой территории и могут быть учтены при решении задач сейсмического районирования.

Список литературы

1. Molnar P., Tapponnier P. **1975.** Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision: Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision. *Science. New Series*, 189(4201): 419–426. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419>
2. Omuralieva A., Nakajima J., Hasegawa A. **2009.** Three-dimensional seismic velocity structure of the crust beneath the central Tien Shan, Kyrgyzstan: Implications for large- and small-scale mountain building. *Tectonophysics*, 465(1): 30–44. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.10.010>
3. Макаров В.И. **1977.** Новейшая тектоническая структура Центрального Тянь-Шаня. М.: Наука, 171 с.
4. Садыбакасов И.С. **1990.** Неотектоника Высокой Азии. М.: Наука, 1990. 176 с.

5. Современная геодинамика областей внутренне-континентального коллизионного горообразования (Центральная Азия). 2005. М.: Научный мир, 400 с.
6. Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А. 2002. Современная геодинамика Алтайско-Гималайского коллизионного пояса. М.: ГЕОС, 224 с.
7. Трофимов А.К., Удалов Н.Ф., Уткина Н.Г., Фортунатова А.Б., Чедия О.К., Язовский В.М. 1976. Геология кайнозоя Чуйской впадины и ее горного обрамления. Ленинград: Наука, 128 с.
8. Чедия О.К. 1986. Морфоструктуры и новейший тектогенез Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 313 с.
9. Шульц С.С. 1948. Анализ новейшей тектоники и рельеф Тянь-Шаня. Москва: Географгиз, 224 с.
10. Буртман В.С. 2012. Тянь-Шань и Высокая Азия: Геодинамика в кайнозое. М.: ГЕОС, 186 с.
11. Юдахин Ф.Н. 1983. Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 246 с.
12. Сычева Н.А., Богомолов Л.М. 2020. О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии. Геосистемы переходных зон, 4(4): 393–416. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.393-416.417-446>
13. Костюк А.Д., Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Яги Ю. 2010. Деформация земной коры Северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической геодезии. Физика Земли, 3: 52–65.
14. Сычева Н.А. 2020. Тензор сейсмического момента и динамические параметры землетрясений Центрального Тянь-Шаня. Геосистемы переходных зон, 4(2): 178–191. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.178-191.192-209>
15. Yagi Y. 2004. Determination of focal mechanism by moment tensor inversion. Tsukuba: IISEE Lecture Note. 51 p.
16. Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Кузиков С.И. 2020. Вычислительные технологии в сейсмологических исследованиях (на примере сети KNET, Северный Тянь-Шань). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 358 с.
17. Sycheva N.A., Mansurov A.N. 2020. Seismotectonic deformation of the lithosphere in the Pamir and adjacent territories. *Geodynamics & Tectonophysics*, 11(4): 785–805. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2020-11-4-0507>
18. Юнга С.Л. 1990. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М.: Наука, 191 с.
19. Аки К., Ричардс П. 1983. Количественная сейсмология. Теория и методы. М.: Мир. Т. 1–2. 880 с.
20. Ризниченко Ю.В. 1985. Проблемы сейсмологии: Избранные труды. М.: Наука, 408 с.
21. Scholz C.H. 2002. *The Mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge: Cambridge University Press, 496 p.
22. Abercrombie R.E., Rice J.R. 2005. Can observations of earthquake scaling constrain slip weakening? *Geophysical Journal International*, 162: 406–424. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2005.02579.x>
23. Scuderi M.M., Marone C., Tinti E., Di Stefano G., Colletti C. 2016. Precursory changes in seismic velocity for the spectrum of earthquake failure modes. *Nature Geoscience*, 9(9): 695–700. <https://doi.org/10.1038/ngeo2775>
24. Brune J.N. 1971. Corrections. *J. of Geophysical Research*, 76: 5002.
25. Brune J.N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 75(26): 4997–5009. <https://doi.org/10.1029/jb075i026p04997>
26. Madariaga R. 1976. Dynamics of an expanding circular fault. *Bull. of the Seismological Society of America*, 66: 639–666.
27. Madariaga R. 1979. On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity. *J. of Geophysical Research*, 84: 2243–2250. <https://doi.org/10.1029/jb084ib05p02243>
28. Eshelby J.D. 1957. The determination of elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems. *Proceedings of the Royal Society of London*, A241(1226): 376–396. <https://doi.org/10.1098/rspa.1957.0133>
29. Сычева Н.А., Богомолов Л.М. 2024. Динамические параметры землетрясений Алтае-Саянской горной области. В кн.: Проблемы геодинамики и геоэкологии внутренне-континентальных орогенов: IX Междунар. симп., 24–28 июня 2024 г., Бишкек: Тез. докл. Бишкек, с. 123.
30. Boore D. 2003. Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*, 160: 635–676. <https://doi.org/10.1007/pl00012553>
31. Bormann P., Liu R., Xu Z., Ren K., Zhang L., Wendt S. 2009. First application of the New IASPEI teleseismic magnitude standards to data of the China National Seismographic Network. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(3): 1868–1891. <https://doi.org/10.1785/0120080010>
32. Юнга С.Л. 1997. О классификации тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу. *Доклады Российской Академии наук*, 352(2): 253–255.
33. Сычева Н.А., Богомолов Л.М. 2016. Закономерности падения напряжений при землетрясениях Северного Тянь-Шаня. *Геология и геофизика*, 57(11): 2071–2083.

References

1. Molnar P., Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision: Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision. *Science. New Series*, 189(4201): 419–426. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419>

2. Omuralieva A., Nakajima J., Hasegawa A. **2009**. Three-dimensional seismic velocity structure of the crust beneath the central Tien Shan, Kyrgyzstan: Implications for large- and small-scale mountain building. *Tectonophysics*, 465(1): 30–44. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.10.010>
3. Makarov V.I. **1977**. *Recent tectonic structure of the Central Tien Shan*. Moscow: Nauka, 172 p. (In Russ.).
4. Sadybakasov I.S. **1990**. *Neotectonics of High Asia*. Moscow: Nauka, 176 p. (In Russ.).
5. [Modern geodynamics of intracontinental collisional mountain formation (Central Asia)]. **2005**. Moscow: Nauchnyi Mir [Scientific world], 400 p.
6. Trifonov V.G., Soboleva O.V., Trifonov R.V., Vostrikov G.A. **2002**. [Modern geodynamics of the Alpine-Himalayan collision belt]. Moscow: GEOS, 224 p. (In Russ.).
7. Trofimov A.K., Udalov N.F., Utkina N.G., Fortuna A.B., Chediya O.K., Yazovskii V.M. **1976**. *Geologiya kainozoya Chuiskoi vpadiny i ee gornogo obramleniya* [Geology of Cenozoic of the Chuya basin and its mountainous frame]. Leningrad: Nauka, 128 p. (In Russ.).
8. Chediya O.K. **1986**. [Morphostructures and recent tectogenesis of the Tien Shan]. Frunze: Ilim, 315 p. (In Russ.).
9. Shul'ts S.S. **1948**. [Analysis of recent tectonics and relief of the Tien Shan]. Moscow: Geographgiz, 224 p. (In Russ.).
10. Burtman V.S. **2012**. *Tian Shan and High Asia: Geodynamics in the Cenozoic*. Moscow: GEOS, 188 p. (In Russ.).
11. Yudakhin F.N. **1983**. [Geophysical fields, deep structure, and seismicity of the Tien Shan]. Frunze: Ilim, 246 p. (In Russ.).
12. Sycheva N.A., Bogomolov L.M. **2020**. On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 417–446. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.393-416.417-446>
13. Kostyuk A.D., Sycheva N.A., Yunga S.L., Bogomolov L.M., Yagi Y. **2010**. Deformation of the Earth's crust in the Northern Tien Shan according to the earthquake focal data and satellite geodesy. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 46(3): 230–243. <https://doi.org/10.1134/s1069351310030055>
14. Sycheva N.A. **2020**. Seismic moment tensor and dynamic parameters of earthquakes in the Central Tien Shan. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(2): 192–209. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.178-191.192-209>
15. Yagi Y. **2004**. *Determination of focal mechanism by moment tensor inversion*. Tsukuba: IISEE Lecture Note. 51 p.
16. Sycheva N.A., Bogomolov L.M., Kuzikov S.I. **2020**. Computational technologies in seismological studies (on the example of KNET, Northern Tian Shan). Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG DVO RAN, 358 p. (In Russ.). <https://dx.doi.org/10.30730/978-5-6040621-6-6.2020-2>
17. Sycheva N.A., Mansurov A.N. **2020**. Seismotectonic deformation of the lithosphere in the Pamir and adjacent territories. *Geodynamics & Tectonophysics*, 11(4): 785–805. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2020-11-4-0507>
18. Yunga S.L. **1990**. [Methods and results of study of seismotectonic deformations]. Moscow: Nauka, 191 p. (In Russ.).
19. Aki K., Richards P. **1983**. *Quantitative seismology: Theory and methods*. Vol. 1–2. Moscow: Mir, 880 p.
20. Riznichenko Yu.V. **1985**. [Problems of seismology]. Moscow: Nauka, 408 p. ([Selected works]). (In Russ.).
21. Scholz C.H. **2002**. *The Mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge: Cambridge University Press, 496 p.
22. Abercrombie R.E., Rice J.R. **2005**. Can observations of earthquake scaling constrain slip weakening? *Geophysical Journal International*, 162: 406–424. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2005.02579.x>
23. Scuderi M.M., Marone C., Tinti E., Di Stefano G., Collettini C. **2016**. Precursory changes in seismic velocity for the spectrum of earthquake failure modes. *Nature Geoscience*, 9(9): 695–700. <https://doi.org/10.1038/ngeo2775>
24. Brune J.N. **1971**. Corrections. *J. of Geophysical Research*, 76: 5002.
25. Brune J.N. **1970**. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 75(26): 4997–5009. <https://doi.org/10.1029/jb075i026p04997>
26. Madariaga R. **1976**. Dynamics of an expanding circular fault. *Bull. of the Seismological Society of America*, 66: 639–666.
27. Madariaga R. **1979**. On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity. *J. of Geophysical Research*, 84: 2243–2250. <https://doi.org/10.1029/jb084ib05p02243>
28. Eshelby J.D. **1957**. The determination of elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems. *Proceedings of the Royal Society of London*, A241(1226): 376–396. <https://doi.org/10.1098/rspa.1957.0133>
29. Sycheva N.A., Bogomolov L.M. **2024**. [Dynamic parameters of earthquakes in Altai-Sayan mountain region]. In: *Problems of geodynamics and geoecology of intracontinental orogens: IX Intern. Symp.*, 24–28 June, Bishkek: Abstracts. Bishkek, p. 123.
30. Boore D. **2003**. Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*, 160: 635–676. <https://doi.org/10.1007/pl00012553>
31. Bormann P., Liu R., Xu Z., Ren K., Zhang L., Wendt S. **2009**. First application of the New IASPEI teleseismic magnitude standards to data of the China National Seismographic Network. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(3): 1868–1891. <https://doi.org/10.1785/0120080010>
32. Yunga S.L. **1997**. On the classification of seismic moment tensors based on their isometric mapping onto a sphere. *Doklady Akademii Nauk*, 352(2): 253–255. (In Russ.).
33. Sycheva N.A., Bogomolov L.M. **2016**. Patterns of stress drop in earthquakes of the Northern Tien Shan. *Russian Geology and Geophysics*, 57(11): 1635–1645. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.10.009>

Таблица I. Каталог динамических параметров 270 землетрясений Центрального Тянь-Шаня
Table I. Catalog of dynamic parameters of 270 earthquakes in the Central Tien Shan

№ п/п	Дата	Время	Координаты		H , км	M_w	M_0 , Н·м	OBS	Брюна		r_M , м	$\Delta\sigma$, бар	$\Delta\sigma$, бар	Модель Мадариаги–Канеко–Ширера	Тип подвижки в очаге
			φ, °	λ, °					r_B , м	$\Delta\sigma$, бар					
1	24.03.1978	21:05:55.80	42.37	78.69	35	6.9	$2.54 \cdot 10^{19}$	CMT	11668	70	8168		204		B3-СД
2	14.04.1978	06:11:34.40	41.50	75.45	33	5.0	$4.15 \cdot 10^{16}$	CMT	1778	32	1245		94		B3
3	06.04.1979	18:30:11.00	41.92	77.74	19	5.3	$1.24 \cdot 10^{17}$	CMT	2393	40	1675		115		B3-СД
4	05.07.1980	20:25:30.20	41.94	77.40	15	5.4	$1.74 \cdot 10^{17}$	CMT	2642	41	1850		120		B3-СД
5	06.12.1980	02:45:32.00	40.37	78.56	15	5.2	$7.80 \cdot 10^{16}$	CMT	2168	34	1517		98		B3-СД
6	06.05.1982	15:42:27.20	40.26	71.42	15	5.7	$4.77 \cdot 10^{17}$	CMT	3556	46	2489		135		B3
7	31.12.1982	19:46:49.70	42.75	77.01	15	5.3	$9.73 \cdot 10^{16}$	CMT	2393	31	1675		91		B3
8	05.04.1983	06:50:35.30	40.27	75.30	15	5.8	$6.39 \cdot 10^{17}$	CMT	3926	46	2749		135		СБ-СД
9	17.06.1988	13:30:47.10	43.01	77.51	15	5.6	$3.72 \cdot 10^{17}$	CMT	3221	49	2255		142		ВЗР
10	12.11.1990	12:28:58.60	43.18	78.24	15	6.3	$3.29 \cdot 10^{18}$	CMT	6442	54	4509		157		ВЗ-СД
11	01.12.1990	18:09:31.60	40.62	73.41	32	5.2	$8.28 \cdot 10^{16}$	CMT	2168	36	1517		104		ВЗ-СД
12	19.08.1992	02:04:45.80	42.19	73.32	17	7.2	$7.68 \cdot 10^{19}$	CMT	15704	87	10993		253		B3
13	06.11.1992	07:21:58.70	41.20	72.58	19	5.0	$3.49 \cdot 10^{16}$	CMT	1778	27	1245		79		B3
14	24.12.1992	05:09:47.20	42.45	72.23	26	5.3	$1.32 \cdot 10^{17}$	CMT	2393	42	1675		123		B3
15	20.02.1995	08:07:43.20	41.73	72.40	33	5.1	$4.81 \cdot 10^{16}$	CMT	1963	28	1374		81		B3
16	08.10.1995	08:55:53.00	41.23	71.87	20	5.7	$4.30 \cdot 10^{17}$	CMT	3556	42	2489		122		B3
17	18.01.1996	09:33:57.00	42.10	77.98	20	5.2	$7.89 \cdot 10^{16}$	CMT	2168	34	1517		99		B3
18	09.01.1997	13:43:35.30	41.00	74.16	15	5.8	$5.66 \cdot 10^{17}$	CMT	3926	41	2749		119		B3
19	29.05.1998	22:49:40.00	41.35	75.67	32	5.3	$1.00 \cdot 10^{17}$	CMT	2393	32	1675		93		B3
20	07.06.1998	00:05:35.30	41.23	77.42	33	5.2	$8.14 \cdot 10^{16}$	CMT	2168	35	1517		102		ВЗР
21	06.12.1999	07:33:15.20	42.75	76.25	33	5.2	$6.86 \cdot 10^{16}$	CMT	2168	29	1517		86		B3
22	08.08.2000	01:15:9.40	41.90	76.83	33	5.0	$3.64 \cdot 10^{16}$	CMT	1778	28	1245		83		B3
23	05.05.2003	06:34:47.00	40.97	72.24	46	5.1	$5.87 \cdot 10^{16}$	CMT	1963	34	1374		99		B3
24	22.05.2003	18:11:57.37	42.81	72.78	28	5.5	$2.22 \cdot 10^{17}$	CMT	2917	39	2042		114		ВЗ-СД
25	26.09.2003	23:35:42.01	40.20	77.05	15	5.3	$1.31 \cdot 10^{17}$	CMT	2393	42	1675		122		ВЗР
26	16.01.2004	09:06:22.85	42.65	75.39	30	4.8	$2.37 \cdot 10^{16}$	CMT	1459	33	1021		97		B3

№ п/п	Дата	Время	Координаты		H , км	M_w	M_0 , Н·м	OBS	Модель			Тип подвижки в очаге	
			φ, °	λ, °					r_{B} , м	$\Delta\sigma$, бар	r_{M} , м		
27	07.10.2004	16:14:18.12	40.38	77.51	17	4.8	$2.12 \cdot 10^{16}$	CMT	1459	30	1021	87	B3Р
28	06.04.2005	08:45:2.15	41.48	78.70	30	5.1	$6.11 \cdot 10^{16}$	CMT	1963	35	1374	103	B3
29	08.06.2006	11:34:59.53	40.53	77.64	30	4.8	$2.36 \cdot 10^{16}$	CMT	1459	33	1021	97	B3
30	06.09.2006	07:51:47.14	40.20	76.87	32	4.7	$1.53 \cdot 10^{16}$	CMT	1321	29	925	85	B3
31	08.11.2006	02:21:31.06	42.65	75.32	24	4.8	$2.07 \cdot 10^{16}$	CMT	1459	29	1021	85	B3
32	25.12.2006	20:01:4.65	42.17	76.06	19	5.8	$6.99 \cdot 10^{17}$	CMT	3926	51	2749	147	B3-СД
33	06.06.2007	11:09:29.37	42.71	75.36	28	5.0	$3.80 \cdot 10^{16}$	CMT	1778	30	1245	86	B3
34	26.12.2007	04:45:32.39	40.34	73.05	25	5.1	$5.82 \cdot 10^{16}$	CMT	1963	34	1374	98	B3
35	31.12.2007	18:23:38.94	41.11	71.97	20	5.0	$3.81 \cdot 10^{16}$	CMT	1778	30	1245	86	B3
36	01.01.2008	06:32:32.66	40.34	72.90	20	5.6	$2.91 \cdot 10^{17}$	CMT	3221	38	2255	111	B3
37	01.08.2008	01:29:30.69	41.52	71.21	18	4.8	$1.97 \cdot 10^{16}$	CMT	1459	28	1021	81	B3
38	20.02.2009	10:02:32.06	40.74	78.63	17	5.3	$9.45 \cdot 10^{16}$	CMT	2393	30	1675	88	B3
39	19.04.2009	04:08:20.25	41.29	78.32	26	5.4	$1.43 \cdot 10^{17}$	CMT	2642	34	1850	99	ГР-СД
40	22.04.2009	09:26:6.03	40.21	77.27	16	5.0	$4.72 \cdot 10^{16}$	CMT	1778	37	1245	107	B3
41	26.04.2009	23:54:15.78	41.06	72.62	36	4.9	$3.07 \cdot 10^{16}$	CMT	1611	32	1127	94	B3
42	27.04.2009	20:04:15.66	42.90	72.35	20	5.0	$4.52 \cdot 10^{16}$	CMT	1778	35	1245	103	B3
43	29.04.2009	18:53:11.84	41.62	71.26	20	4.8	$1.83 \cdot 10^{16}$	CMT	1459	26	1021	75	B3
44	02.03.2010	01:55:40.45	42.54	75.74	26	5.1	$5.01 \cdot 10^{16}$	CMT	1963	29	1374	84	СБ-СД
45	17.03.2011	15:34:33.81	40.39	78.90	17	4.9	$2.91 \cdot 10^{16}$	CMT	1611	30	1127	89	В3-СД
46	01.05.2011	02:31:31.77	43.72	77.73	25	5.1	$6.47 \cdot 10^{16}$	CMT	1963	37	1374	109	B3Р
47	19.07.2011	19:35:48.49	40.28	71.36	29	6.2	$2.12 \cdot 10^{18}$	CMT	5834	47	4084	136	B3
48	05.02.2012	07:10:20.43	41.59	74.76	31	4.9	$2.50 \cdot 10^{16}$	CMT	1611	26	1127	76	B3
49	30.05.2012	21:20:58.68	43.58	78.78	27	5.4	$1.54 \cdot 10^{17}$	CMT	2642	37	1850	106	B3
50	11.03.2013	03:01:41.44	40.22	77.52	12	5.2	$6.76 \cdot 10^{16}$	CMT	2168	29	1517	85	B3Р
51	01.12.2013	08:34:27.83	40.32	78.98	12	5.3	$9.71 \cdot 10^{16}$	CMT	2393	31	1675	90	B3
52	15.08.2014	21:42:33.43	43.19	77.29	27	4.8	$2.35 \cdot 10^{16}$	CMT	1459	33	1021	97	B3
53	14.11.2014	01:24:18.53	42.21	77.22	24	5.4	$1.56 \cdot 10^{17}$	CMT	2642	37	1850	108	B3
54	10.01.2015	06:51:1.79	40.19	77.21	15	5.1	$5.14 \cdot 10^{16}$	CMT	1963	30	1374	87	B3Р
55	17.11.2015	17:29:39.51	40.44	73.07	23	5.5	$2.64 \cdot 10^{13}$	CMT	2917	47	2042	136	В3-СД

№ п/п	Дата	Время	Координаты		H , км	M_w	M_0 , Н·м	OBS	Модель		Тип подвижки в очаге	
			φ , °	λ , °					$r_{\text{B}}\text{, м}$	$\Delta\sigma$, бар		
56	12.08.2016	18:00:59.38	40.70	78.40	21	5.0	$3.94 \cdot 10^{16}$	CMT	1778	31	1245	89
57	12.04.2018	10:41:53.69	40.41	77.22	22	4.9	$2.40 \cdot 10^{16}$	CMT	1611	25	1127	73
58	03.11.2018	21:36:22.89	40.24	77.66	12	4.9	$2.72 \cdot 10^{16}$	CMT	1611	28	1127	83
59	27.10.2019	05:29:49.09	41.22	78.75	12	4.9	$2.80 \cdot 10^{16}$	CMT	1611	29	1127	85
60	09.05.2020	15:36:3.33	40.79	78.68	31	5.4	$1.43 \cdot 10^{17}$	CMT	2642	34	1850	99
61	06.11.2020	07:38:56.16	40.27	71.56	24	4.8	$2.00 \cdot 10^{16}$	CMT	1459	28	1021	82
62	26.12.2020	10:28:37.98	40.27	71.48	28	4.9	$3.28 \cdot 10^{16}$	CMT	1611	34	1127	100
63	02.07.2022	22:02:14.34	40.93	78.04	12	5.0	$3.83 \cdot 10^{16}$	CMT	1778	30	1245	87
64	14.01.1996	18:16:26.66	42.70	74.86	8	4.27	$3.21 \cdot 10^{15}$	CMT	13	863	22	604
65	12.06.1996	03:39:58.59	42.15	73.37	14	3.79	$5.93 \cdot 10^{14}$	CMT	12	537	17	376
66	13.02.1998	13:27:1.23	42.12	73.52	18	3.92	$9.56 \cdot 10^{14}$	CMT	9	610	18	427
67	16.05.1998	22:36:6.41	42.56	73.96	11	3.47	$2.02 \cdot 10^{14}$	CMT	10	391	15	274
68	02.11.1998	00:57:37.10	42.10	75.08	16	3.71	$4.50 \cdot 10^{14}$	CMT	12	496	16	347
69	21.11.1998	11:46:9.44	42.24	74.06	21	4.37	$4.45 \cdot 10^{15}$	CMT	13	953	22	667
70	27.02.1999	17:28:41.23	41.29	76.59	0	4.06	$1.51 \cdot 10^{15}$	CMT	12	701	19	491
71	01.07.2000	20:33:58.86	41.16	73.63	0	4.43	$5.46 \cdot 10^{15}$	CMT	10	1011	23	708
72	14.07.2000	08:22:46.84	41.38	73.17	0	4.30	$3.04 \cdot 10^{15}$	CMT	13	889	19	622
73	28.07.2000	08:56:26.91	42.58	74.80	16	3.40	$1.69 \cdot 10^{14}$	CMT	15	365	15	255
74	09.10.2000	10:38:23.34	40.82	72.64	10	3.71	$4.55 \cdot 10^{14}$	CMT	8	496	16	347
75	21.02.2001	12:15:16.40	42.74	75.00	2	3.72	$4.67 \cdot 10^{14}$	CMT	14	501	16	351
76	13.03.2001	17:46:41.90	41.70	73.15	15	3.49	$2.14 \cdot 10^{14}$	CMT	8	399	15	279
77	10.04.2001	00:13:24.43	41.77	73.19	0	3.67	$4.01 \cdot 10^{14}$	CMT	10	477	16	334
78	09.05.2001	11:14:16.23	41.74	73.08	0	3.40	$1.34 \cdot 10^{14}$	CMT	19	365	12	255
79	22.05.2001	15:02:33.55	42.15	76.18	13	4.08	$1.61 \cdot 10^{15}$	CMT	17	715	19	501
80	08.07.2001	11:51:52.68	42.14	74.98	14	3.41	$1.60 \cdot 10^{14}$	CMT	10	368	14	258
81	20.08.2001	01:27:5.74	42.14	74.98	7	3.41	$1.64 \cdot 10^{14}$	CMT	11	368	14	258
82	28.08.2001	00:32:48.76	40.65	74.13	0	4.12	$1.91 \cdot 10^{15}$	CMT	11	744	20	521
83	02.09.2001	20:25:15.88	41.00	73.07	0	4.60	$9.84 \cdot 10^{15}$	CMT	23	1197	25	838
84	05.09.2001	08:18:22.88	40.68	73.32	11	3.83	$7.00 \cdot 10^{14}$	CMT	9	558	18	391

№ п/п	Дата	Время	Координаты		H , км	M_w	M_0 , Н·м	OBS	Модель			Тип подвижки в очаге	
			φ, °	λ, °					r_{B} , м	$\Delta\sigma$, бар	r_{M} , м		
85	11.09.2001	07:13:42.81	42.41	75.59	6	3.38	$1.48 \cdot 10^{14}$	8	358	14	250	41	ВЗ-СД
86	13.09.2001	12:00:30.35	41.30	75.63	1	4.35	$4.22 \cdot 10^{15}$	8	934	23	654	66	В3
87	09.10.2001	00:24:30.84	42.01	76.40	0	3.74	$5.07 \cdot 10^{14}$	8	511	17	358	49	СБ-СД
88	18.11.2001	01:28:55.44	42.59	74.14	7	4.14	$2.00 \cdot 10^{15}$	15	759	20	531	58	В3
89	22.11.2001	02:59:14.04	40.93	72.89	33	4.69	$5.66 \cdot 10^{15}$	8	1308	11	916	32	СБ-СД
90	13.12.2001	02:11:8.63	40.82	74.07	33	4.44	$5.75 \cdot 10^{15}$	12	1021	24	715	69	ВЗР
91	25.02.2002	12:52:43.00	41.22	73.13	0	3.96	$1.09 \cdot 10^{15}$	14	635	19	445	54	В3
92	26.02.2002	01:37:22.48	42.74	73.09	0	3.69	$4.23 \cdot 10^{14}$	11	486	16	340	47	ВЗ-СД
93	28.03.2002	22:36:21.12	41.60	73.29	5	3.58	$2.94 \cdot 10^{14}$	14	436	16	305	45	СБ-СД
94	10.05.2002	15:35:2.00	42.10	74.42	-1	4.53	$7.72 \cdot 10^{15}$	10	1117	24	782	71	В3
95	17.06.2002	21:03:47.98	42.14	73.75	8	3.54	$2.56 \cdot 10^{14}$	14	419	15	293	44	ВЗ-СД
96	04.07.2002	01:33:27.37	41.16	73.56	22	3.58	$2.94 \cdot 10^{14}$	10	436	16	305	45	ВЗР
97	11.07.2002	21:02:44.80	41.63	75.54	14	3.41	$1.65 \cdot 10^{14}$	11	368	14	258	42	ВЗ-СД
98	31.08.2002	17:46:38.13	41.59	73.27	10	3.21	$8.03 \cdot 10^{13}$	8	302	13	212	37	ВЗ-СД
99	17.10.2002	10:44:20.70	42.22	73.67	13	3.36	$1.34 \cdot 10^{14}$	15	351	14	245	40	В3
100	25.10.2002	14:30:10.50	41.34	74.86	13	3.32	$1.19 \cdot 10^{14}$	9	337	14	236	40	ВЗ-СД
101	08.12.2002	22:10:39.77	41.87	72.40	0	3.80	$6.20 \cdot 10^{14}$	11	542	17	379	50	СБ-СД
102	21.02.2003	10:35:22.15	42.53	74.47	13	3.49	$2.10 \cdot 10^{14}$	8	399	15	279	42	В3
103	09.03.2003	00:32:5.75	41.23	72.97	0	4.65	$1.17 \cdot 10^{16}$	19	1257	26	880	75	ГР-СД
104	11.03.2003	22:08:31.22	40.93	73.76	12	4.11	$1.81 \cdot 10^{15}$	21	737	20	516	58	В3-СД
105	22.05.2003	19:34:47.18	43.05	72.83	7	3.63	$3.53 \cdot 10^{14}$	10	458	16	321	47	В3-СД
106	23.05.2003	00:16:4.86	43.00	72.81	6	3.87	$8.07 \cdot 10^{14}$	14	581	18	407	53	В3-СД
107	25.05.2003	22:44:22.26	42.98	72.81	12	3.30	$1.11 \cdot 10^{14}$	9	330	13	231	39	В3
108	28.07.2003	04:57:29.84	41.64	74.67	3	3.82	$6.75 \cdot 10^{14}$	16	553	17	387	51	В3-СД
109	26.08.2003	18:58:17.38	40.98	74.94	1	3.82	$6.59 \cdot 10^{14}$	11	553	17	387	50	В3
110	06.10.2003	02:51:34.14	41.25	76.45	0	3.75	$5.34 \cdot 10^{14}$	12	516	17	361	50	ГР-СД
111	06.10.2003	16:42:13.93	42.50	74.48	16	3.50	$2.19 \cdot 10^{14}$	13	403	15	282	43	ГР-СД
112	18.11.2003	06:49:56.55	41.26	76.46	0	3.48	$2.07 \cdot 10^{14}$	9	395	15	276	43	ГР-СД
113	09.04.2004	18:05:34.39	40.56	72.97	33	4.13	$1.98 \cdot 10^{15}$	10	751	20	526	60	ВЗР

№ п/п	Дата	Время	Координаты		$H, \text{км}$	M_w	$M_0, \text{Н}\cdot\text{м}$	OBS	Модель		Тип подвижки в очаге	
			$\phi, {}^\circ$	$\lambda, {}^\circ$					$r_{\text{бр}} \text{ м}$	$\Delta\sigma, \text{бар}$		
114	25.04.2004	04:15:18.19	41.54	74.92	16	3.52	$2.39 \cdot 10^{14}$	10	411	15	288	B3
115	28.04.2004	00:02:41.22	41.00	73.71	1	4.04	$1.43 \cdot 10^{15}$	8	687	19	481	B3-СД
116	02.06.2004	17:15:10.82	42.28	74.91	18	4.31	$3.67 \cdot 10^{15}$	16	898	22	629	B3
117	15.10.2004	13:45:56.82	41.02	74.55	0	3.86	$7.78 \cdot 10^{14}$	8	575	18	403	B3
118	27.11.2004	12:42:54.30	42.61	74.84	15	3.25	$9.30 \cdot 10^{13}$	14	314	13	220	B3
119	29.11.2004	00:44:54.94	41.62	75.31	17	4.01	$1.29 \cdot 10^{15}$	19	667	19	467	B3-СД
120	20.04.2005	17:48:53.10	42.41	76.49	7	3.70	$4.43 \cdot 10^{14}$	13	491	16	344	B3
121	08.06.2005	21:05:21.44	42.16	75.09	17	3.26	$9.82 \cdot 10^{13}$	8	318	13	222	B3
122	20.06.2005	14:25:1.50	42.77	74.38	23	3.51	$2.33 \cdot 10^{14}$	14	407	15	285	ГР-СД
123	07.07.2005	19:22:5.42	42.66	74.84	12	3.34	$1.27 \cdot 10^{14}$	9	344	14	241	B3Р
124	07.07.2005	21:00:7.50	42.65	74.82	11	3.35	$1.32 \cdot 10^{14}$	12	347	14	243	B3
125	03.10.2005	09:28:26.24	42.65	74.82	12	3.21	$8.24 \cdot 10^{13}$	8	302	13	212	B3Р
126	08.10.2005	06:25:58.93	42.10	76.05	7	4.33	$3.82 \cdot 10^{15}$	13	916	22	641	B3
127	27.12.2005	00:55:30.54	42.71	75.89	6	3.64	$3.60 \cdot 10^{14}$	12	463	16	324	B3
128	28.12.2005	01:52:48.29	42.69	75.41	12	4.12	$1.92 \cdot 10^{15}$	12	744	20	521	B3
129	29.12.2005	08:50:32.76	42.69	75.40	6	3.39	$1.53 \cdot 10^{14}$	8	361	14	253	B3
130	05.02.2006	10:28:12.21	41.94	76.92	0	4.11	$1.79 \cdot 10^{15}$	18	737	20	516	B3
131	27.03.2006	09:49:33.57	42.16	73.23	0	3.47	$1.98 \cdot 10^{14}$	9	391	15	274	B3-СД
132	24.05.2006	13:17:54.27	42.67	72.96	13	4.03	$1.38 \cdot 10^{15}$	19	681	19	476	B3
133	12.06.2006	17:53:49.37	41.44	75.84	1	3.58	$2.93 \cdot 10^{14}$	11	436	15	305	B3
134	08.07.2006	18:58:20.37	41.61	73.25	14	3.52	$2.39 \cdot 10^{14}$	8	411	15	288	ГР-СД
135	30.07.2006	11:48:16.11	41.65	72.67	3	4.49	$6.81 \cdot 10^{15}$	11	1073	24	751	B3
136	13.08.2006	06:10:13.41	41.65	72.75	0	4.14	$2.04 \cdot 10^{15}$	17	759	20	531	B3-СД
137	15.08.2006	18:58:22.87	42.60	75.11	10	3.31	$1.17 \cdot 10^{14}$	10	334	14	234	B3
138	22.10.2006	11:01:32.21	42.16	73.36	7	3.64	$3.64 \cdot 10^{14}$	9	463	16	324	B3
139	27.05.2007	01:30:53.75	41.74	73.05	14	3.98	$1.16 \cdot 10^{15}$	18	648	19	453	ГР-СД
140	28.06.2007	08:26:37.90	41.87	72.52	16	3.80	$6.14 \cdot 10^{14}$	12	542	17	379	СБ
141	29.12.2007	21:27:22.05	42.94	76.79	3	4.13	$1.96 \cdot 10^{15}$	14	751	20	526	B3Р
142	03.02.2008	08:57:7.55	41.94	76.47	0	3.40	$1.57 \cdot 10^{14}$	8	365	14	255	41
												ГР-СД

№ п/п	Дата	Время	Координаты		H , км	M_w	M_0 , Н·м	OBS	Модель			Тип подвижки в очаге
			φ, °	λ, °					r_{B} , м	$\Delta\sigma$, бар	r_{M} , м	
143	25.06.2008	21:09:29.86	41.30	73.89	1	3.73	$4.96 \cdot 10^{14}$	18	506	17	354	49
144	04.07.2008	22:09:56.90	42.93	75.38	14	3.55	$2.67 \cdot 10^{14}$	12	423	15	296	45
145	21.08.2008	17:19:51.67	41.97	76.02	14	4.04	$1.44 \cdot 10^{15}$	19	687	19	481	56
146	21.08.2008	19:34:5.27	41.96	76.02	14	3.38	$1.45 \cdot 10^{14}$	8	358	14	250	40
147	03.12.2008	04:26:28.64	42.68	73.20	11	4.46	$6.17 \cdot 10^{15}$	19	1042	24	729	70
148	01.02.2009	11:25:38.02	42.75	73.86	15	3.91	$9.07 \cdot 10^{14}$	15	604	18	423	52
149	24.05.2009	00:08:40.93	42.61	74.60	13	3.01	$4.08 \cdot 10^{13}$	11	248	12	174	34
150	25.07.2009	14:57:10.42	42.59	75.71	12	3.45	$1.85 \cdot 10^{14}$	8	383	14	268	42
151	07.12.2009	18:05:51.07	41.35	75.86	0	3.50	$2.22 \cdot 10^{14}$	13	403	15	282	43
152	22.12.2009	05:54:31.37	41.75	73.14	0	3.74	$5.09 \cdot 10^{14}$	15	511	17	358	49
153	02.03.2010	04:17:40.13	42.44	75.65	20	3.50	$2.18 \cdot 10^{14}$	9	403	15	282	43
154	03.06.2010	10:36:14.15	41.88	76.70	2	3.44	$1.83 \cdot 10^{14}$	10	379	15	266	43
155	09.09.2010	18:31:50.35	42.31	75.15	19	3.14	$6.45 \cdot 10^{13}$	8	282	13	197	37
156	27.10.2010	04:48:2.87	41.46	73.24	11	4.14	$2.02 \cdot 10^{15}$	24	759	20	531	59
157	24.11.2010	03:44:2.48	41.13	75.58	4	4.20	$2.51 \cdot 10^{15}$	11	805	21	564	61
158	18.02.2011	22:15:22.30	41.10	72.70	7	3.68	$4.16 \cdot 10^{14}$	12	481	16	337	48
159	16.03.2011	04:09:23.89	41.66	73.07	12	3.87	$7.90 \cdot 10^{14}$	10	581	18	407	51
160	18.03.2011	09:36:26.66	43.02	74.95	16	3.95	$1.06 \cdot 10^{15}$	17	629	19	440	54
161	09.04.2011	12:30:24.93	42.02	74.84	21	4.24	$2.90 \cdot 10^{15}$	21	838	22	587	63
162	01.05.2011	23:27:43.77	43.21	76.29	11	3.14	$6.30 \cdot 10^{13}$	10	282	12	197	36
163	02.06.2011	21:06:46.42	42.48	77.99	11	4.29	$3.42 \cdot 10^{15}$	9	880	22	616	64
164	11.08.2011	08:38:44.85	41.66	73.07	10	3.66	$3.90 \cdot 10^{14}$	15	472	16	330	47
165	03.11.2011	11:49:7.49	42.23	76.46	11	3.38	$1.48 \cdot 10^{14}$	10	358	14	250	41
166	02.12.2011	00:24:2.64	42.52	76.26	0	3.77	$5.62 \cdot 10^{14}$	11	526	17	368	49
167	16.12.2011	03:14:40.13	42.30	75.88	13	3.26	$9.69 \cdot 10^{13}$	8	318	13	222	39
168	24.12.2011	09:20:7.10	41.64	73.19	11	4.15	$2.10 \cdot 10^{15}$	12	766	20	537	59
169	10.02.2012	06:49:17.11	42.94	74.57	16	3.02	$4.15 \cdot 10^{13}$	9	250	12	175	34
170	19.02.2012	05:23:3.04	43.66	76.64	2	3.49	$2.13 \cdot 10^{14}$	8	399	15	279	43
171	20.02.2012	02:23:56.17	41.48	73.13	0	4.48	$6.60 \cdot 10^{15}$	15	1063	24	744	70

№ п/п	Дата	Время	Координаты		$H, \text{км}$	M_w	$M_0, \text{Н}\cdot\text{м}$	OBS	Модель		$\Delta\sigma, \text{бар}$	Тип подвижки в очаге
			$\phi, {}^\circ$	$\lambda, {}^\circ$					$r_{\text{B}, \text{M}}$	$r_{\text{M}, \text{M}}$		
172	20.02.2012	04:18:7.52	41.32	72.85	0	4.16	$2.13 \cdot 10^{15}$	16	774	20	542	58
173	28.03.2012	12:54:1.43	42.49	74.73	17	3.08	$5.11 \cdot 10^{13}$	14	266	12	186	35
174	16.05.2012	03:26:40.57	42.48	74.92	16	3.01	$4.06 \cdot 10^{13}$	12	248	12	174	34
175	26.06.2012	00:32:40.44	41.37	74.57	13	4.11	$1.81 \cdot 10^{15}$	16	737	20	516	58
176	27.08.2012	00:24:59.09	41.32	75.53	3	3.67	$4.00 \cdot 10^{14}$	11	477	16	334	47
177	29.09.2012	21:35:4.01	41.69	73.04	9	3.48	$2.04 \cdot 10^{14}$	15	395	15	276	42
178	06.10.2012	11:41:23.18	42.21	75.42	14	3.06	$4.84 \cdot 10^{13}$	12	260	12	182	35
179	14.10.2012	16:30:8.24	40.90	74.14	0	4.16	$2.15 \cdot 10^{15}$	8	774	20	542	59
180	02.05.2013	04:52:25.03	42.20	73.63	6	3.63	$3.41 \cdot 10^{14}$	14	458	16	321	45
181	06.06.2013	03:03:7.42	42.27	76.44	23	3.15	$6.64 \cdot 10^{13}$	12	285	13	199	37
182	09.07.2013	07:43:22.67	42.39	72.58	0	3.46	$1.96 \cdot 10^{14}$	9	387	15	271	43
183	11.07.2013	08:45:31.37	40.90	73.98	43	4.20	$2.51 \cdot 10^{15}$	10	805	21	564	61
184	15.07.2013	18:19:8.03	42.49	74.89	14	2.95	$3.32 \cdot 10^{13}$	9	234	11	164	33
185	25.07.2013	03:39:16.67	41.37	75.72	9	3.28	$1.02 \cdot 10^{14}$	22	324	13	227	38
186	20.09.2013	16:28:25.99	42.34	76.50	7	4.06	$1.54 \cdot 10^{15}$	11	701	20	491	57
187	15.11.2013	06:57:13.40	40.59	73.12	33	4.08	$1.67 \cdot 10^{15}$	8	715	20	501	58
188	23.11.2013	00:14:30.51	42.43	75.69	8	3.30	$1.09 \cdot 10^{14}$	8	330	13	231	39
189	23.11.2013	09:42:6.75	42.43	75.69	10	4.60	$9.18 \cdot 10^{15}$	18	1197	23	838	68
190	26.12.2013	08:48:55.63	41.21	75.64	4	4.01	$1.31 \cdot 10^{15}$	14	667	19	467	56
191	26.12.2013	22:59:52.35	42.62	74.95	19	3.45	$1.88 \cdot 10^{14}$	12	383	15	268	43
192	21.01.2014	20:46:36.20	42.11	75.15	15	4.03	$1.38 \cdot 10^{15}$	14	681	19	476	56
193	19.03.2014	01:31:45.41	41.30	72.45	2	3.93	$9.86 \cdot 10^{14}$	9	616	18	432	54
194	12.04.2014	20:18:50.93	42.18	73.26	0	3.27	$1.01 \cdot 10^{14}$	9	321	13	224	39
195	13.05.2014	01:18:44.89	42.27	75.05	7	3.59	$2.99 \cdot 10^{14}$	13	440	15	308	45
196	24.05.2014	18:24:37.31	41.07	72.68	0	3.56	$2.72 \cdot 10^{14}$	13	427	15	299	44
197	28.05.2014	02:25:58.35	42.49	74.80	12	3.68	$4.10 \cdot 10^{14}$	15	481	16	337	47
198	25.09.2014	17:59:17.71	43.21	73.97	15	3.59	$3.06 \cdot 10^{14}$	19	440	16	308	46
199	30.10.2014	08:56:18.85	41.61	75.40	8	3.42	$1.69 \cdot 10^{14}$	8	372	14	260	42
200	14.11.2014	01:24:16.48	42.14	77.22	8	5.21	$8.13 \cdot 10^{16}$	10	2189	34	1532	99

№ п/п	Дата	Время	Координаты		H , км	M_w	M_0 , Н·м	OBS	Модель			Тип подвижки в очаге
			φ, °	λ, °					r_{B} , м	$\Delta\sigma$, бар	r_{M} , м	
201	16.12.2014	18:28:56.85	42.68	76.18	4	3.55	$2.63 \cdot 10^{14}$	9	423	15	296	44
202	22.01.2015	15:52:27.06	42.21	75.02	14	4.29	$3.44 \cdot 10^{15}$	17	880	22	616	64
203	03.03.2015	15:32:18.46	42.23	75.03	13	3.17	$7.13 \cdot 10^{13}$	8	290	13	203	37
204	15.03.2015	14:01:0.96	42.99	76.80	0	4.31	$3.65 \cdot 10^{15}$	11	898	22	629	64
205	08.06.2015	04:50:19.01	41.87	72.84	0	3.91	$9.22 \cdot 10^{14}$	12	604	18	423	53
206	21.06.2015	23:40:18.58	42.76	73.86	15	3.14	$6.99 \cdot 10^{13}$	13	282	14	197	40
207	10.07.2015	00:31:56.91	41.06	74.06	3	3.96	$1.07 \cdot 10^{15}$	19	635	18	445	53
208	10.08.2015	12:31:5.58	41.14	74.06	7	3.89	$8.64 \cdot 10^{14}$	16	593	18	415	53
209	10.08.2015	12:45:52.65	41.13	74.13	6	3.64	$3.55 \cdot 10^{14}$	21	463	16	324	46
210	28.08.2015	23:02:12.66	41.31	73.76	0	3.52	$2.39 \cdot 10^{14}$	9	411	15	288	44
211	05.09.2015	20:34:12.14	41.29	75.68	2	3.81	$6.46 \cdot 10^{14}$	14	547	17	383	50
212	20.09.2015	16:09:15.84	41.16	73.57	0	3.94	$9.95 \cdot 10^{14}$	17	623	18	436	53
213	01.10.2015	21:41:9.74	41.08	74.12	0	3.58	$2.92 \cdot 10^{14}$	14	436	15	305	45
214	04.10.2015	21:43:17.80	42.56	75.17	14	3.10	$5.58 \cdot 10^{13}$	8	271	12	190	36
215	09.04.2016	17:31:46.97	42.14	75.99	7	3.30	$1.22 \cdot 10^{14}$	8	330	15	231	43
216	23.04.2016	06:41:44.14	41.89	76.73	3	3.60	$2.69 \cdot 10^{14}$	13	445	13	311	39
217	26.04.2016	03:21:2.19	40.92	74.43	0	3.60	$3.38 \cdot 10^{14}$	12	445	17	311	49
218	05.05.2016	19:54:49.17	41.35	75.80	3	3.90	$9.11 \cdot 10^{14}$	22	598	19	419	54
219	27.05.2016	06:11:18.88	41.74	73.05	16	3.70	$3.84 \cdot 10^{14}$	18	491	14	344	41
220	01.08.2016	08:00:10.12	41.76	72.93	0	3.90	$1.00 \cdot 10^{15}$	9	598	20	419	60
221	18.11.2016	15:16:41.61	41.41	76.56	0	3.70	$4.44 \cdot 10^{14}$	12	491	16	344	48
222	18.12.2016	05:54:53.02	43.22	75.22	14	3.80	$5.42 \cdot 10^{14}$	15	542	15	379	43
223	18.12.2016	22:16:23.22	41.09	74.13	0	3.70	$4.14 \cdot 10^{14}$	15	491	15	344	45
224	21.04.2017	00:41:52.43	42.59	75.17	14	3.90	$9.72 \cdot 10^{14}$	19	598	20	419	58
225	21.04.2017	00:55:43.91	42.59	75.16	12	3.80	$7.21 \cdot 10^{14}$	14	542	20	379	58
226	21.04.2017	02:41:13.09	42.60	75.17	13	3.20	$8.18 \cdot 10^{13}$	9	299	13	209	39
227	22.04.2017	02:21:6.79	42.59	75.16	10	3.40	$1.40 \cdot 10^{14}$	17	365	13	255	37
228	28.04.2017	05:01:24.24	41.91	76.77	2	4.40	$5.48 \cdot 10^{15}$	11	982	25	687	74
229	16.05.2017	09:07:16.25	42.16	72.00	0	4.40	$5.29 \cdot 10^{15}$	8	982	24	687	71

№ п/п	Дата	Время	Координаты		H , км	M_w	M_0 , Н·м	OBS	Модель		$\Delta\sigma$, бар	Тип подвижки в очаге
			φ , °	λ , °					r_{B^*} , м	r_M , м		
230	24.05.2017	20:08:53.10	42.22	73.26	0	3.40	$1.51 \cdot 10^{14}$	20	365	14	255	40
231	23.06.2017	03:19:25.99	41.08	72.34	0	3.70	$5.07 \cdot 10^{14}$	9	491	19	344	55
232	05.07.2017	20:03:30.44	42.78	76.43	5	3.60	$2.71 \cdot 10^{14}$	13	445	13	311	39
233	23.07.2017	10:36:35.48	41.06	75.29	4	4.30	$3.03 \cdot 10^{15}$	11	889	19	622	55
234	29.07.2017	05:33:10.27	42.12	74.96	17	3.60	$2.64 \cdot 10^{14}$	25	445	13	311	38
235	13.08.2017	03:12:43.13	42.11	76.06	7	3.30	$1.22 \cdot 10^{14}$	9	330	15	231	43
236	05.10.2017	16:16:45.97	40.89	74.10	1	3.60	$2.66 \cdot 10^{14}$	9	445	13	311	39
237	03.02.2018	03:44:1.39	42.52	75.30	20	3.40	$1.62 \cdot 10^{14}$	12	365	15	255	43
238	11.07.2018	15:34:39.24	41.74	73.09	2	3.53	$2.43 \cdot 10^{14}$	13	415	15	290	43
239	14.07.2018	20:22:3.04	41.60	74.66	19	3.31	$1.13 \cdot 10^{14}$	10	334	13	234	39
240	07.08.2018	17:17:22.25	41.44	72.60	0	4.42	$5.37 \cdot 10^{15}$	8	1001	23	701	68
241	31.08.2018	12:21:27.94	42.96	77.43	15	4.29	$3.36 \cdot 10^{15}$	9	880	22	616	63
242	14.09.2018	22:15:3.65	41.92	77.16	7	4.10	$1.77 \cdot 10^{15}$	9	729	20	511	58
243	17.09.2018	22:57:31.33	42.81	74.99	14	3.28	$1.04 \cdot 10^{14}$	11	324	13	227	39
244	28.09.2018	22:40:13.93	41.39	74.71	16	3.36	$1.39 \cdot 10^{14}$	14	351	14	245	41
245	06.12.2018	05:05:9.42	41.15	75.07	0	3.64	$3.54 \cdot 10^{14}$	9	463	16	324	46
246	02.04.2019	01:41:7.17	41.64	76.24	2	4.03	$1.36 \cdot 10^{15}$	10	681	19	476	55
247	01.07.2019	11:15:19.12	41.98	74.74	16	3.46	$1.95 \cdot 10^{14}$	9	387	15	271	43
248	21.07.2019	22:23:41.15	41.96	76.20	13	3.62	$3.36 \cdot 10^{14}$	11	454	16	317	46
249	05.08.2019	16:53:38.42	40.66	75.95	0	3.45	$1.84 \cdot 10^{14}$	8	383	14	268	42
250	18.08.2019	23:37:28.79	41.13	75.23	0	3.68	$4.09 \cdot 10^{14}$	9	481	16	337	47
251	21.01.2020	13:10:26.20	41.65	75.43	10	3.61	$3.19 \cdot 10^{14}$	12	449	15	314	45
252	20.03.2020	00:49:2.18	42.08	77.14	14	4.28	$3.27 \cdot 10^{14}$	14	872	22	610	63
253	29.03.2020	04:41:9.05	41.27	73.00	0	4.40	$4.97 \cdot 10^{15}$	9	982	23	687	67
254	18.04.2020	11:24:43.74	42.36	75.78	8	3.66	$3.79 \cdot 10^{14}$	11	472	16	330	46
255	24.04.2020	21:56:35.97	42.26	76.29	15	3.67	$3.98 \cdot 10^{14}$	15	477	16	334	47
256	26.05.2020	12:11:35.89	43.42	75.31	14	3.29	$1.06 \cdot 10^{14}$	10	327	13	229	39
257	30.05.2020	04:25:9.58	40.82	73.34	3	3.64	$3.61 \cdot 10^{14}$	8	463	16	324	47
258	12.07.2020	00:28:47.18	41.08	75.30	0	3.97	$1.14 \cdot 10^{15}$	17	641	19	449	55

№ п/п	Дата	Время	Координаты		H , км	M_w	M_0 , Н·м	OBS	Модель			Тип подвижки в очаге
			φ, °	λ, °					r_B , м	$\Delta\sigma$, бар	r_M , м	
259	12.08.2020	10:03:20.14	42.02	75.43	14	3.89	$8.58 \cdot 10^{14}$	11	593	18	415	ГР-СД
260	15.09.2020	17:54:25.93	42.50	74.75	16	3.14	$6.43 \cdot 10^{13}$	9	282	13	197	ВЗ-СД
261	20.10.2020	23:08:5.23	41.23	72.97	1	4.23	$2.77 \cdot 10^{15}$	12	830	21	581	ВЗ
262	12.11.2020	08:25:47.68	41.03	73.51	5	4.16	$2.19 \cdot 10^{15}$	11	774	21	542	ВЗР
263	29.11.2020	17:47:5.05	42.12	75.54	17	3.70	$4.39 \cdot 10^{14}$	16	491	16	344	ВЗ
264	29.11.2020	20:18:22.36	42.13	75.52	12	3.25	$9.25 \cdot 10^{13}$	8	314	13	220	ВЗ
265	01.01.2021	07:41:31.81	42.05	75.15	20	3.65	$3.71 \cdot 10^{14}$	12	467	16	327	ВЗ-СД
266	10.01.2021	19:38:22.91	41.08	73.64	0	4.09	$1.68 \cdot 10^{15}$	9	722	19	506	ВЗ
267	04.02.2021	14:59:35.05	42.06	76.10	9	3.44	$1.83 \cdot 10^{14}$	10	379	15	266	ВЗ
268	07.07.2021	05:07:7.85	42.20	76.22	7	3.45	$1.83 \cdot 10^{14}$	8	383	14	268	СБ-СД
269	29.09.2021	07:46:13.12	41.24	73.21	0	4.00	$1.23 \cdot 10^{15}$	12	661	19	462	ВЗР
270	17.11.2021	11:17:16.73	41.23	72.92	3	4.18	$2.35 \cdot 10^{15}$	10	790	21	553	ВЗР

Примечание. OBS – observation, число наблюдений (записей) землетрясения. СМТ – данные с сайта CMT, количество компонент не указано. Тип подвижки в очаге: ВЗР – взрз; ВЗ – взброс; ВЗ-СД – взбросо-сдвиг; СБ – сброс; СБ-СД – горизонтальный сдвиг; СБ – сбросо-сдвиг.

Note. OBS, number earthquake observations (records). CMT, data from the Global Centroid Moment Tensor database, the number of components is not specified. Type of movement in the source: ВЗР, thrust fault; ВЗ, reverse fault; ВЗ-СД, reverse shift fault; ГР-СД, strike-slip fault; СБ, normal fault; СБ-СД, normal shift fault.

Об авторе

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

About the Author
Sycheva, Naylya A. (<https://orcid.org/0000-0003-0386-3752>), Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Russia, ivtran@mail.ru

Поступила 12.08.2024
 Принята к публикации 26.08.2024

Received 12 August 2024
 Accepted 26 August 2024



Waves in the marine area near Cape Svobodny (south-eastern part of Sakhalin Island)*

Dmitry P. Kovalev[@], Peter D. Kovalev, Aleksander S. Borisov, Konstantin V. Kirillov

^{@E-mail:} d.kovalev@imgg.ru

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

Abstract. A study of wave processes near Cape Svobodny on the south-eastern coast of the island Sakhalin using autonomous wave recorders and a weather station has been performed. Analysis of five-month data of sea level and temperature, atmospheric pressure and wind speed revealed that there are no significant peaks for wind and infragravity (IG) waves in the wave period range 2–600 s, and the wave energy is lower at the point protected by Cape Svobodny. During storms, there is an increase in the energy of IG waves. Waves detected at periods of 14.2 seconds, 3.62 minutes, and 8.85 minutes are related to swell and edge waves propagating seaward. For explanation of short waves, the Longuet-Higgins and Stewart theory was used which describes the dispersion of swell in the surf zone and the formation of free waves. Edge waves were analyzed using the Lamb model and the Bessel function of the first kind of zero order. Modelling of wave processes propagating shoreward revealed the presence of IG waves with periods of 20–110 seconds and edge waves with periods of 4.27–7.63 minutes, confirmed by the dispersion relation for Stokes waves on a sloping bottom. Sea water temperature fluctuations of more than 7 °C with periods of 3–100 minutes affect the propagation of waves with periods longer than 3 minutes, destroying the edge and leaky waves. Analysis of wind wave characteristics showed no significant wave processes, including wind waves, in the 2–20 second period range. The maximum wave height was observed during prolonged southern winds associated with a cyclone. This study is important for understanding wave processes in this area, aiding in predicting their behaviour and impact on the coastline.

Keywords: wind waves, edge waves, leaky waves, infragravity waves, swell, internal waves

Волны в морской акватории вблизи мыса Свободный (юго-восточная часть о. Сахалин)**

Д. П. Ковалев[@], П. Д. Ковалев, А. С. Борисов, К. В. Кириллов

^{@E-mail:} d.kovalev@imgg.ru

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

Резюме. Проведено исследование волновых процессов вблизи мыса Свободный на юго-восточном побережье о. Сахалин с использованием автономных регистраторов волнения и метеостанции. Анализ пятимесячных данных уровня моря и температуры, атмосферного давления и скорости ветра выявил, что в диапазоне периодов волн 2–600 с отсутствуют значительные пики для ветровых и инфрагравитационных (ИГ) волн, а энергия волн меньше в точке, защищенной мысом Свободный. Во время штормов наблюдается рост энергии ИГ-волн. Обнаружены волны с периодами 14.2 с, 3.62 мин и 8.85 мин, связанные с зыби и излученными волнами, распространяющимися в сторону моря. Для объяснения коротких волн использована теория Лонгет-Хиггинса и Стюарта, которая объясняет рассеяние зыби в зоне прибоя и образование свободных волн. С использованием формулы для стоячих волн проанализированы волны Пуанкаре. Моделирование волновых процессов, распространяющихся к берегу, показало наличие ИГ-волн с периодами 20–110 с и краевых волн с периодами 4.27–7.63 мин, подтвержденных дисперсионным соотношением для волн Стокса при плоском наклонном дне. Колебания температуры морской воды с высотой более 7 °C и периодами 3–100 мин влияют

* The translation from Russian: Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Борисов А.С., Кириллов К.В. Волны в морской акватории вблизи мыса Свободный (юго-восточная часть о. Сахалин). Геосистемы переходных зон, 2024, т. 8, № 3. [Electronic resources]. <http://journal.imgur.ru/web/full/f2024-3-3.pdf>. Translated by Valeriya Maksimova

** Полный текст данной статьи на русском языке размещен на сайте журнала <http://journal.imgur.ru/web/full/f2024-3-3.pdf>

на распространение волн с периодами более 3 мин, разрушая краевые и излученные волны. Анализ характеристик ветрового волнения показал, что в диапазоне периодов 2–20 с отсутствуют значительные волновые процессы, включая ветровые волны. Максимальная высота волн наблюдалась при продолжительных южных ветрах, связанных с циклоном. Проведенное исследование важно для понимания волновых процессов в данной акватории, что помогает прогнозировать их поведение и влияние на береговую линию.

Ключевые слова: ветровые волны, краевые волны, излученные волны, инфрагравитационные волны, зыбь, внутренние волны

For citation: Kovalev D.P., Kovalev P.D., Borisov A.S., Kirillov K.V. Waves in the marine area near Cape Svobodny (south-eastern part of Sakhalin Island). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, no. 3, pp. 201–211. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.201-211>; <https://www.elibrary.ru/lgdflz> [The translation from Russian: Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Борисов А.С., Кириллов К.В. Волны в морской акватории вблизи мыса Свободный (юго-восточная часть о. Сахалин). Геосистемы переходных зон, 2024, т. 8, № 3. [Electronic resource]. <http://journal.imgur.ru/web/full/f2024-3-3.pdf>]

Funding

The research was conducted as part of the government assignment of the Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (FWWM-2024-0002).

Финансирование

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (№ FWWM-2024-0002).

Introduction

The Laboratory of Wave Dynamics and Coastal Currents at the Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, conducts experimental studies of wave processes in the coastal zone of the Sea of Okhotsk near Cape Svobodny, aiming to investigate waves occurring during the passage of cyclones over the observation area. While waves with periods longer than 15 seconds – such as infragravity, edge, leaky, and other waves – are usually of interest in the coastal zone, it was also decided to study shorter waves – wind waves and swell – that affect the operation of small vessels and are associated with coastal fishing in this region.

The results of studies on wind wave dynamics and swell are well documented in numerous articles and monographs (e.g., [1–3]). However, wind wave conditions near the shore are heavily influenced by the bathymetric characteristics of the seabed and the aerographic features of the coastline, making them variable in each specific marine area. The study of wave dynamics near Cape Svobodny, where two bottom wave recorders and a meteorological station were set up at the edge of the cape, provides an excellent opportunity for a more detailed investigation of these processes.

Barotropic leaky waves in the shelf zone can only exist at frequencies above the inertial frequency. Sverdrup waves generated in the open ocean are progressive waves formed under the combined influence of gravitational forces and the Earth's rotation; when they reflect from the shore, they create Poincaré waves, which exhibit a progressive nature along the shore and stationary behavior across it [4]. In describing boundary waves, the terms “Poincaré waves” and “leaky waves” are often used synonymously [5].

Infragravity and edge waves are also the focus of extensive scientific literature [6–8]. However, similar to wind waves, detailed studies of the aquatic area near Cape Svobodny have not been conducted. We studied internal waves here, and in 2021, two ARV 14K instruments were installed in the vicinity of the cape to measure variations in bottom hydrostatic pressure, which were subsequently converted to sea level, accounting for the attenuation of short waves with depth, into sea level fluctuations (wave motion). The wave measuring devices are manufactured by SKTB “EIPA” in Uglich (<https://sktbelpa.ru>). The main relative error in bottom pressure measurements is 0.06 %, with a resolution of ± 0.0008 % of the upper measurement limit. The measurement frequency for level and temperature is one second. Measurements of atmospheric pressure fluctua-

tions and wind speed were conducted using the Vantage Pro2 Weather Station.

The objective of this research was to conduct a detailed study of various types of waves, including short wind waves and swell, as well as longer infragravity and edge waves, to assess their impact on coastal processes and the operability of small vessels. The relevance of this research stems from the need to understand the specifics of wave processes in this marine area, which is crucial for predicting their behavior and impact on the coastline, as well as for supporting coastal fishing and other activities.

Methodology and observation data

A map of the observation area – the water body of Mordvinova Bay and Cape Svobodny in the southern part of Sakhalin Island, showing the location of wave measuring devices – is presented in Figure 1. Bottom wave recorders ARV 14K (measuring pressure range 0–20 m, accuracy $\pm 0.06\%$; resolution $\pm 0.0008\%$) were installed on the seabed: the device with serial number 149 at a depth of approximately 14 m, and the device with number 150 at a depth of 12 m. The installation depth of the devices corresponds to a bottom slope of about 0.011. The distance between the devices is 1.69 km. Both devices recorded sea level fluctuations and temperature with a sampling rate of one second. The Vantage Pro2 Weather Station (measuring pressure range 880–1080 hPa,

accuracy ± 0.5 hPa; wind speed range 0–67 m/s, accuracy ± 1 m/s) was installed on the lighthouse at Cape Svobodny, at a height of approximately 12 m above sea level. Atmospheric pressure and wind speed were recorded with a one-hour sampling rate. This interval was chosen due to the limited memory capacity and inaccessibility of the weather station.

The experiment took place from July 9 to December 31, 2021. The observation period covered the summer and autumn seasons, characterized by prevailing southerly winds associated with the passage of cyclones, leading to significant storms.

Data processing of the time series for sea level fluctuations, including spectral and cross-spectral analyses, was performed using the Kyma software [9, 10], which was developed for visualizing and analyzing large volumes of time series data. This software was employed to calculate spectrograms of sea level fluctuations, analyze energy distribution in different period ranges, and determine the characteristics of wave processes. Spectral analysis allowed for the identification of major wave types, such as infragravity, edge, and leaky waves. A detailed analysis was performed for each wave type, including the use of theoretical models such as the Lamb model and Bessel functions, as well as the dispersion relationship for Stokes waves when analyzing edge waves. The relationship between fluctuations in seawater temperature and the propagation of waves with periods longer than

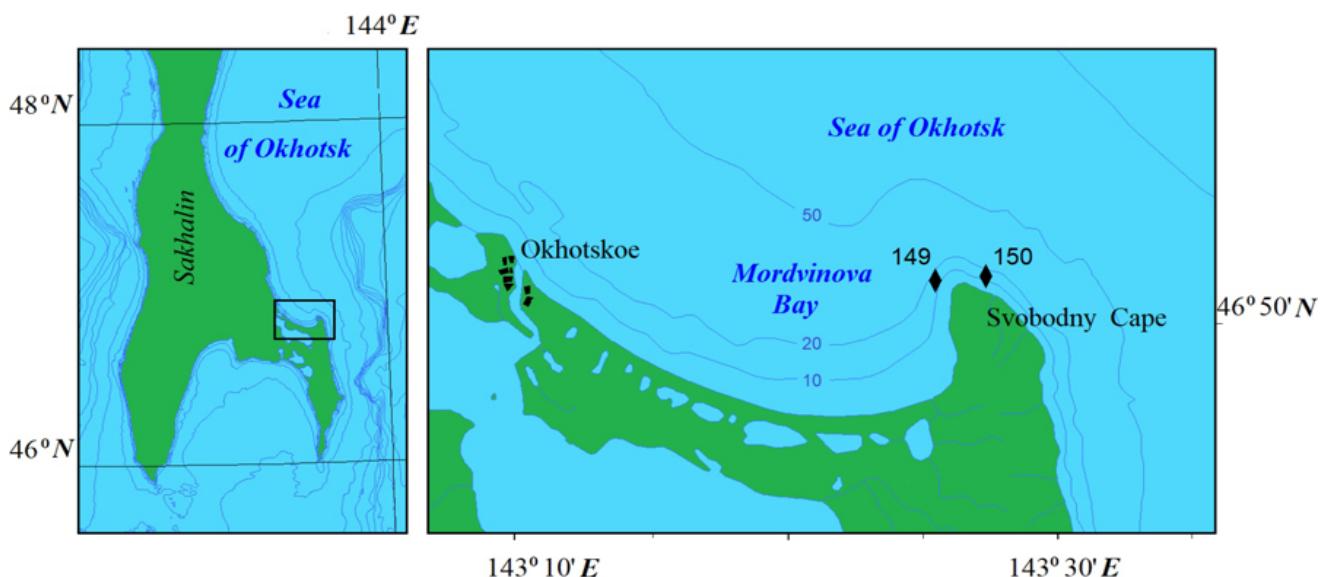


Fig. 1. The southern part of Sakhalin Island indicates the research area, including the water body of Mordvinova Bay and Cape Svobodny, with the locations of wave and temperature measuring devices.

3 minutes was also investigated, revealing the influence of internal waves on edge waves.

As a result of the observations over 5 months, records of sea level fluctuations, atmospheric pressure, and wind speed were obtained at two locations. Fragments of the records are presented in Fig 2.

The temporal series of sea level fluctuations (Fig. 2a) show tidal waves and several storms, which were more frequently observed in the autumn months – September and October. The most intense storm, with wave heights reaching 4 m, occurred in mid-September. Typically, storms, as indicated by the comparison of Fig. 2a and Fig. 2c, are accompanied by strong northerly winds.

Analysis of sea level fluctuations

Figures 3a and 3b present spectrograms of sea level fluctuations calculated using the Kyma software [9, 10] over the range of periods for wind waves, swell, and infragravity (IG) waves. It is evident that the energy of wind waves and swell does not exhibit sharply defined maxima, and for device 149, it is somewhat lower than that of device 150. In the infragravity wave range, with periods from 20 to 250 seconds, an increase in energy is observed during storms, without a pronounced modal structure.

Since preliminary calculations indicated that the spectral density diagrams do not contain dis-

tinct features compared to those discussed in previously published works, this study focused on calculating transfer function diagrams and phases for pairs of devices. It is noteworthy that coherence functions are often used to analyze time series, which, in a linear system, indicate a causal relationship between two signals. At the same time, as indicated by statistical sampling theory, coherence estimates not only exhibit statistical variability but are also biased and significantly dependent on the number of degrees of freedom [11]. Preliminary analysis using the coherence function showed significant bias in the coherence estimates for the wave process period range discussed here. Therefore, the spectral analysis was conducted using transfer functions. As can be seen in Figures 3c and 3d, the magnitude diagrams of the transfer function proved to be quite informative.

In this article, in particular, a Bode plot, or frequency response function, is calculated, but we will use the more general term – transfer function. As shown in articles [12, 13], the transfer function is generally applied to describe the relationships between two series when one series influences another. In such cases, the gain function, or transfer function from the cross-spectrum, is typically computed using the coherence function [14]. According to the proposed research, the transfer function $H(j\omega) = G(\omega)\phi(\omega) = |H(j\omega)| \arg(H(j\omega))$

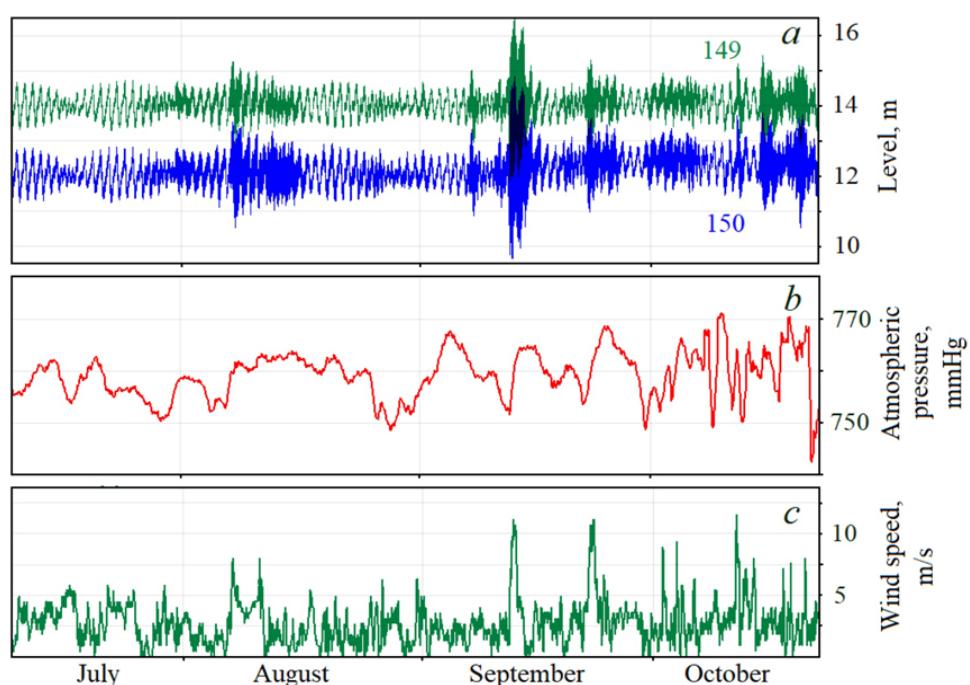


Fig. 2. Temporal variations in sea level fluctuations (a), recorded by devices 149 and 150; fluctuations in atmospheric pressure (b); and the wind velocity vector magnitude (c), recorded by the Vantage Pro2 Weather Station during the summer-autumn period of 2021.

allows for the identification of features within the analyzed time series. In this expression, $G(\omega)$ is the gain coefficient, which is a dimensionless quantity, while the phase values $\phi(\omega)$ are expressed in radians between the time series of the device pair at each frequency.

The transfer function is a complex function of frequency $k(j\omega) = K(\omega)e^{-j\phi(\omega)}$, known as the operator's transfer function. Its magnitude $K(\omega)$ and argument $\phi(\omega)$ indicate how the amplitude and phase of each harmonic component of the spectrum of the transformed function change after the application of a linear operator [15]. In harmonic analysis, the magnitude of the transfer function $K(\omega)$ is referred to as the amplitude-frequency characteristic, while the argument $\phi(\omega)$ is known as the phase-frequency characteristic of the operator.

Waves propagating into open sea

The transfer function diagram in the direction from device 149 to device 150 (Fig. 3c) – toward the open sea – highlights energy peaks dur-

ing short wind wave periods of 2-3 seconds, as well as at a period of approximately 14.2 seconds, which corresponds to swell waves. Additionally, there are sea level fluctuations with periods of 3.6 minutes within the range of infragravity waves – 0.3 to 7 minutes [16] – and fluctuations extending somewhat beyond the range, with a period of 8.8 minutes. The work of Longuet-Higgins and Stewart [7] confirmed a hypothesis made in 1962 [17], which states that although the incident swell dissipates in the surf zone over shallow water, the forced infragravity waves of the second order (excited by nonlinear differential-frequency interactions of pairs of swell components) are released as free waves, reflecting off the shore and propagating seaward. In this context, the reduction in energy (due to shoaling) of the outgoing free radiated wave is approximately $h^{-1/2}$, and it is more gradual than the amplification of the incoming forced wave, which follows an h^{-5} relationship [7]. It is these leaky waves that correspond to the energy peaks of waves with periods of 3.6 and 8.8 minutes indicated in Fig. 3c.

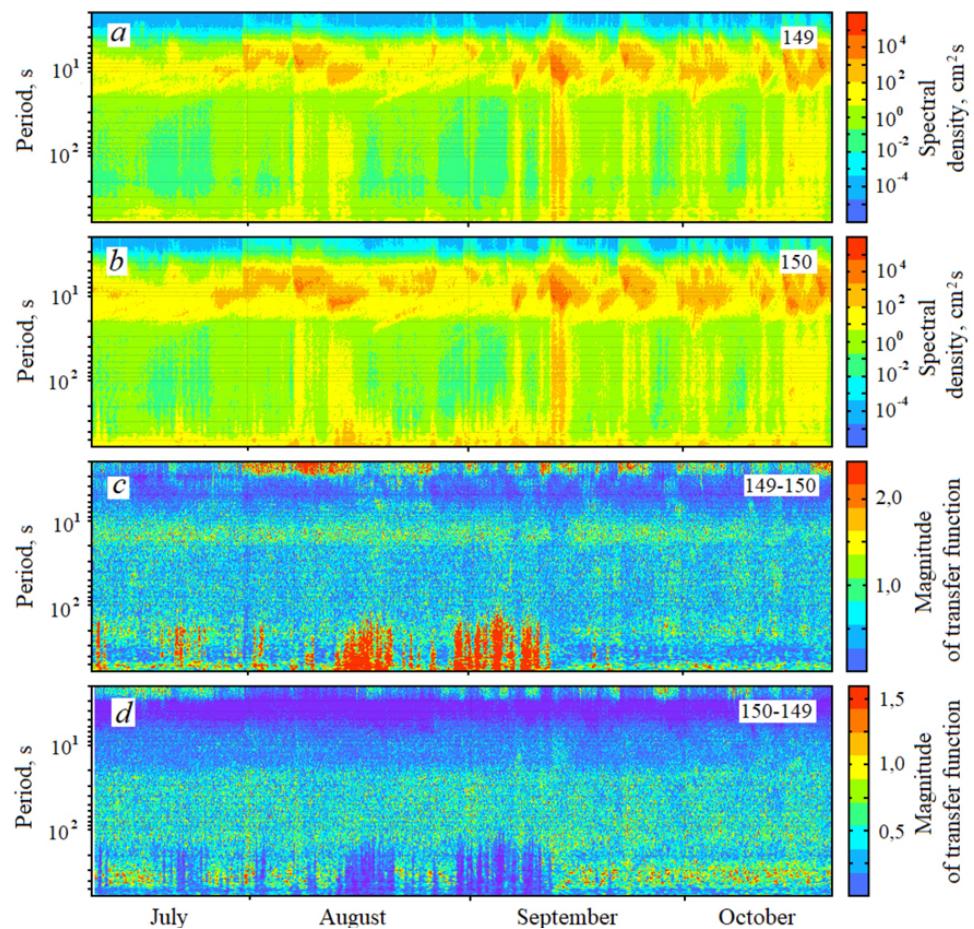


Fig. 3. Spectrograms of sea level fluctuations (a, b) and magnitude diagrams of the transfer function (c, d)

Another potential cause for the manifestation of waves with periods of 3.6 and 8.8 minutes may be Poincaré waves. Our depth measurements using an echo sounder-chart plotter in the observation area, along a line perpendicular to the line connecting the devices, showed that at distances from the shore of up to 10 km, the seabed profile is relatively flat and can be approximated by a model with a linear slope $h(x) = \alpha x$, where h is the depth, $\alpha \approx 0.011$ is the slope of the seabed, and x is the coordinate in the direction away from the shore. The mathematical expression for describing Poincaré standing waves over a flat sloping bottom is given by the zeroth-order Bessel function [18]:

$$\zeta(\omega, x) = \zeta_{\text{shore}} J_0(a\sqrt{x}), \text{ где } a = 2\omega / \sqrt{g\alpha} \quad (1)$$

Here, g is the acceleration due to gravity, $\omega = (2\pi)/(\text{period})$ is the angular frequency, and ζ_{shore} is the amplitude at the shore.

Using equation 1, the normalized sea surface elevations were calculated as functions of the distance from the shore x for the standing wave periods of 3.6 and 8.8 minutes, as determined from the magnitude diagram of the transfer function shown in Fig. 3c. The calculation indicated the possibility of the existence of Poincaré standing waves with the observed periods. At a distance of approximately 450 m from the shore, where the instruments were installed, amplitudes close to the maximum were observed. Since these standing waves have a progressive nature along the shore [4] – along the line connecting the devices – the wave meters are expected to record progressive

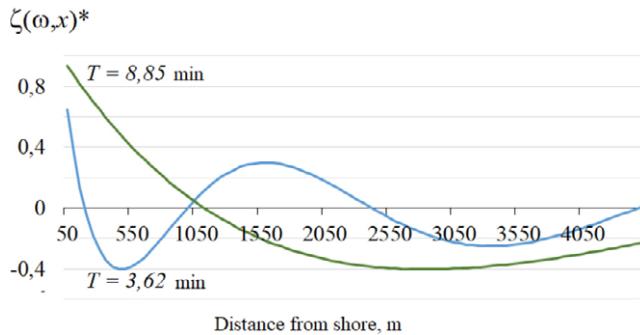


Fig. 4. The normalized standing wave amplitude $\zeta(\omega, x)^*$, with periods of 3.6 and 8.8 minutes, varies with distance from the shoreline.

waves with the specified periods and a direction of propagation parallel to the line connecting the devices, and as measurements indicate, seaward.

Waves propagating along the coast

The transfer function magnitude diagram for waves propagating towards the shore (Fig. 3d) differs significantly from the previous one, which showed waves propagating away from the shore, except for the energy at periods of short wind waves of 2-3 seconds. A broad band of wave periods in the IG range from 20 to 110 seconds is prominent, and it is reasonable to assume that these waves are infragravity waves, considering their significant amplification during storms (Fig. 3a, b).

Figure 3d also shows a narrower band of waves with greater energy, with periods from 4.27 to 7.63 minutes. These can be attributed to edge waves, which are excited by energy from two sources. Firstly, these are IG waves propagating towards the shore, which, according to numerous studies, can transfer their energy to edge waves. Another source is the seaward-propagating free waves that can be reflected back towards the shore from a turning point on a sloping beach or shelf, generating edge waves. A portion of this energy is radiated outward into the ocean [7]. Models have also been developed for the resonant excitation of edge waves resulting from the nonlinear interaction of frequency differences between pairs of components of obliquely incident swell [19].

Let's consider the possibility of generating edge waves with the periods mentioned above for the specific bathymetry profile in the vicinity of Cape Svobodny. Since the bathymetric profile is relatively flat at a distance of about 10 km from the shore, the alongshore structure of edge waves can be described using the dispersion relation for Stokes waves in the approximation of a flat, sloping bottom [16]:

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

where ω_n is the frequency of the n th mode of the edge wave, g is the acceleration due to gravity, k is the alongshore wavenumber, and β is the bottom slope angle.

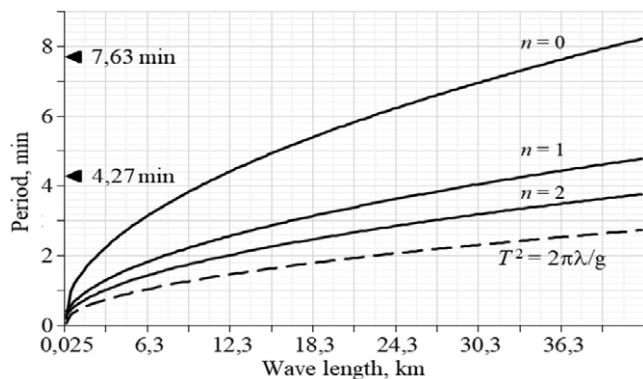


Fig. 5. Dispersion diagram of edge waves for three modes. Observed wave periods are marked with vertical lines. The Poincaré wave continuum lies below the $T^2 = 2\pi\lambda/g$ curve, which represents the dispersion relation for shallow water waves.

The periods of generation of edge waves are limited by the value of $T^2 = 2\pi\lambda/g$ ($k \geq \omega^2/g$ [20]), and for any bottom slope angle β , there is always a limited number of edge wave modes $n \leq \pi/4\beta - 1/2$ [16].

Using formula (2), the dispersion diagram for the first three modes of edge waves has been calculated, shown in Fig. 5. The vertical axis is marked with values corresponding to the observed wave periods within the range of IG wave periods. It can be seen that edge waves with a period of 7.63 minutes can be excited for the zero mode, and those with a period of 4.27 minutes can be excited for the first mode as well. Therefore, the calculation shows that edge waves with periods corresponding to the observed energy peaks are possible in the coastal zone of Cape Svobodny.

Using Eckart's [21] solution to the shallow water equations, the cross-shore profiles of edge waves with periods of 4.27 and 7.63 minutes were calculated for various modes as a function of distance from the shoreline. The expression for the velocity potential is:

$$\phi(x) = e^{-kx} L_n(2kx), \quad (3)$$

where x is the distance from the shoreline, k is the wavenumber, and L_n is the Laguerre polynomial. Figure 6 shows the calculated mode profiles for edge waves with periods of 4.27 and 7.63 minutes. It can be seen that the cross-shore profiles for different periods have a similar character, but the modes with longer periods decay more slowly as they move away from the shore.

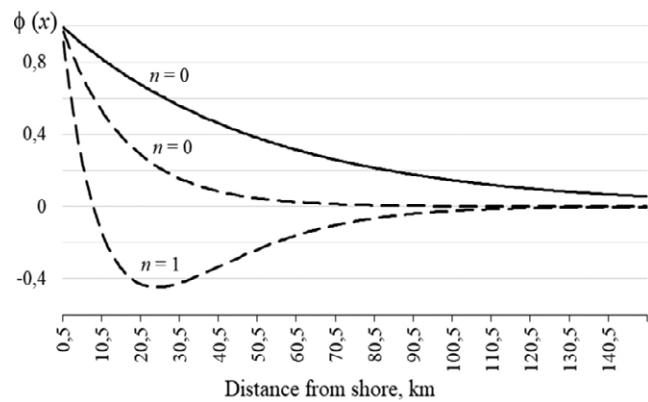


Fig. 6. Cross-shore profile shapes for edge wave modes with periods of 7.63 minutes (solid line) and 4.27 minutes (dashed line).

The analysis suggests the potential for generating edge waves with periods of 4.27 and 7.63 minutes. However, it does not definitively answer whether the observed waves are edge waves or another type. When investigating the structure of waves excited by energy transfer from IG waves, a challenge arises due to the similarity of edge wave and leaky wave modes at short distances from the shore on a flat beach. In [20], a criterion $k \geq \omega^2/g$ is given, which separates the existence regions of edge waves with Poincaré and leaky waves. However, these waves may still exist with identical periods. Distinguishing them requires observations with two instruments along the length and direction of propagation, as demonstrated above.

Influence of seawater temperature fluctuations on the propagation of waves with periods greater than 3 minutes

Another interesting factor affecting the propagation of waves with periods longer than 3 minutes is the influence of seawater temperature fluctuations. As seen in the transfer function magnitude diagrams (Fig. 7a, b), two significant events with anomalous transfer function magnitude values are observed in the period range of 3–100 minutes during August and September. The phase difference spectrograms (Fig. 7c, d) do not show substantial deviations for these events. These events are associated with significant temperature fluctuations, with periods shorter than diurnal (Fig. 7e), as opposed to longer periods spanning several days (Fig. 7f).

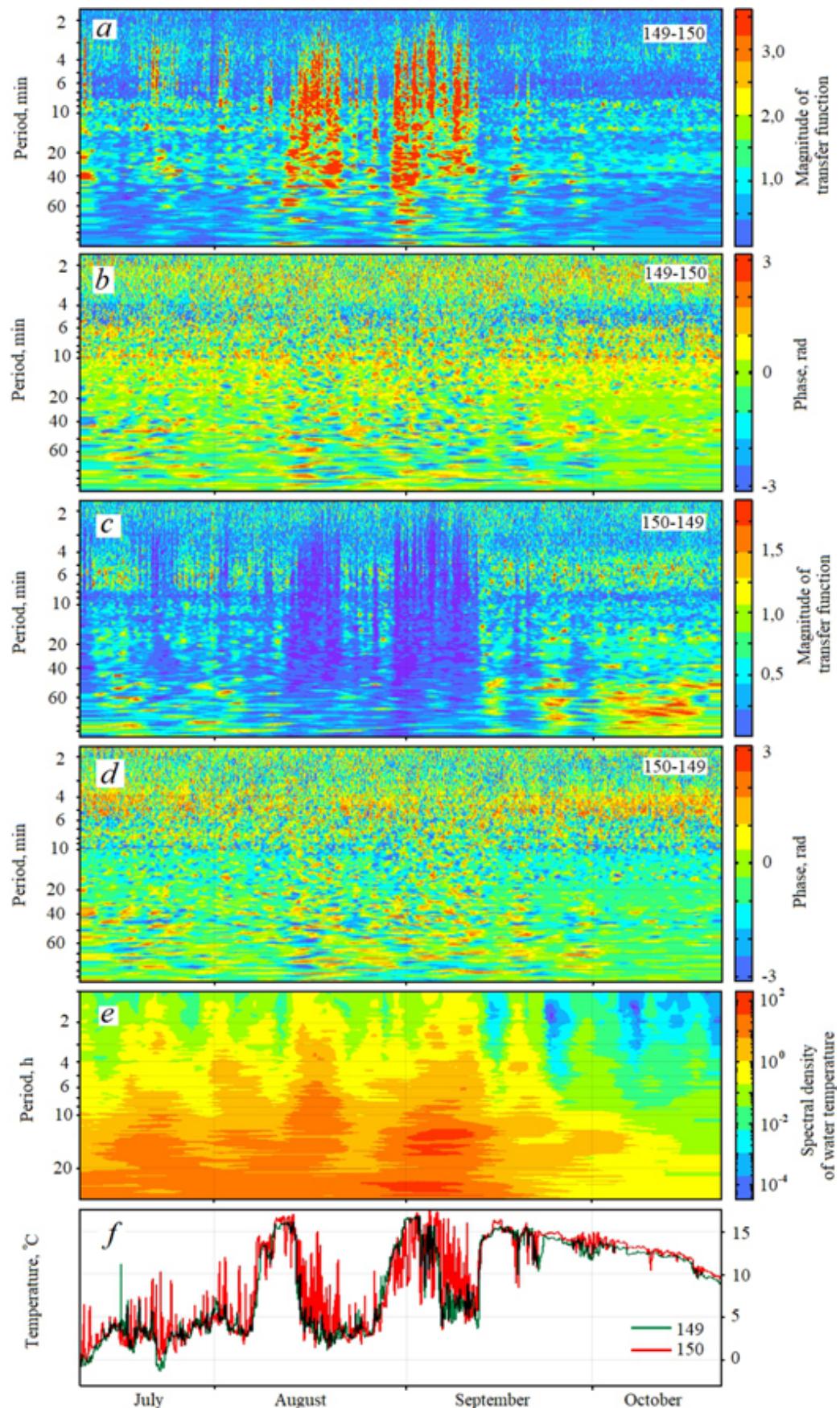


Fig. 7. Transfer function magnitude diagrams (a, b) and phase difference spectrograms (c, d) for sea level fluctuations (periods: 1–100 minutes), along with time series (f) and spectral density of seawater temperature fluctuations for instrument 150 (e).

Research in [22] shows that for seawater temperature fluctuations (1–80 hours), spectral peaks are identified for instrument 150 at periods of 25.5, 16.7, 12.9, and 6.7 hours, and for instrument 149 at periods of 13.2, 6.5, and 5.3 hours. However, the coherence for the temperature time series is significantly below the confidence level. The periods of the spectral peaks in seawater temperature fluctuations for periods longer than 5 hours do not coincide with the periods of the sea level fluctuation peaks. This indicates that these temperature fluctuation peaks are driven by internal waves. Furthermore, the temperature fluctuation spectrum for instrument 150 exhibits peaks at periods of 25.5 and 16.7 hours, which fall within the range of near-inertial internal waves.

It is evident that significant temperature fluctuations within the period range of 3–100 minutes,

corresponding to internal waves with amplitudes exceeding 7 °C, disrupt edge waves with periods of 4.27 and 7.63 minutes (Fig. 7c) propagating along the coast, as well as leaky waves with periods of 3.6 and 8.8 minutes propagating towards the sea (Fig. 7a). Energy transfer to internal waves with periods of 3–100 minutes (Fig. 7e) originates from longer internal waves with periods close to semi-diurnal and diurnal cycles. [22] proposes a mechanism of baroclinic instability to explain the energy transfer from larger to smaller scales.

Wind waves in the vicinity of Cape Svobodny

The characteristics of wind waves and swell in this area are of interest, as it is actively used for fishing. Figure 8 shows the calculated spectral densities of wave activity in the range from 2

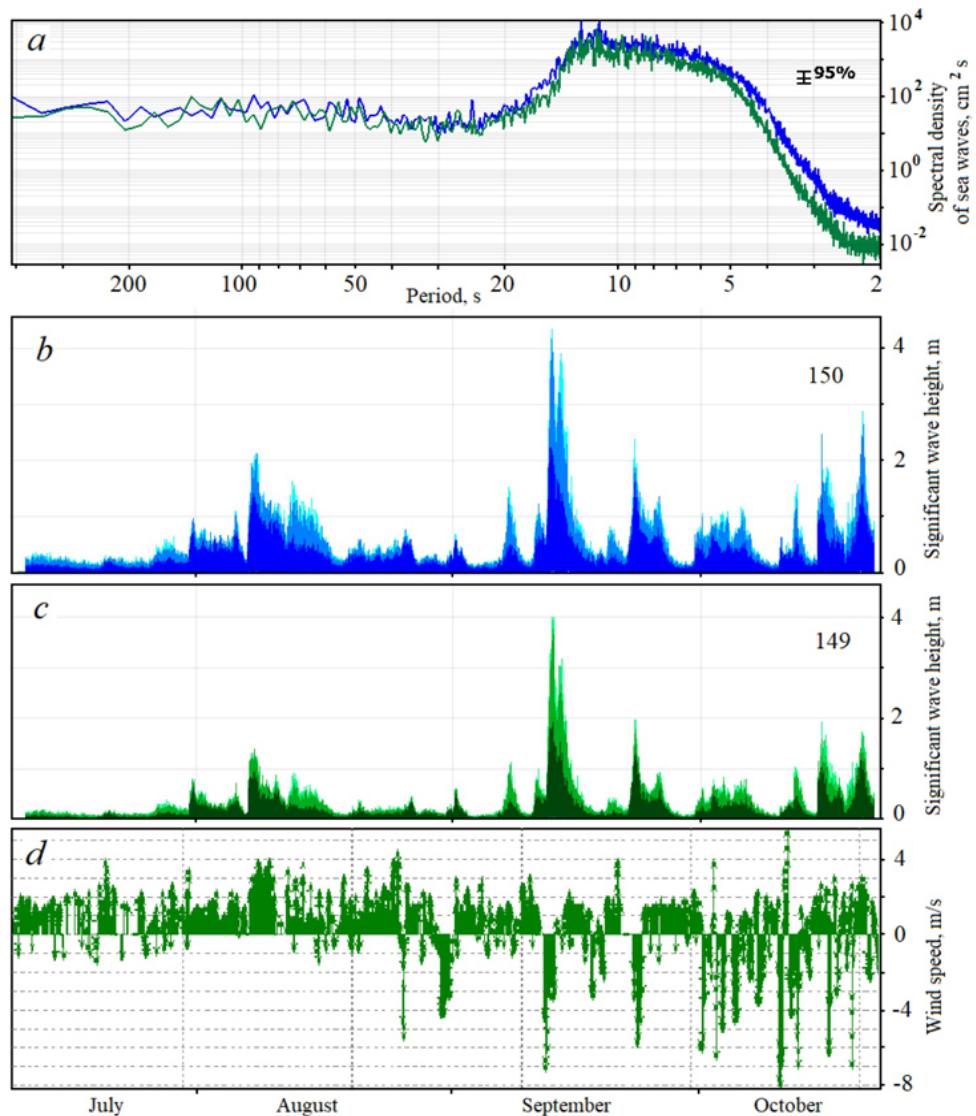


Fig. 8. Wave spectral densities (a); significant wave height for periods of 5, 8, and 11.5 seconds (b, c), highlighted in different shades (dark = 5 seconds); wind speed vectors recorded by the Vantage Pro2 Weather Station (d). The positive direction of the wind speed vectors corresponds to northerly winds.

to 200 seconds, encompassing both wind waves and swell. The curves in the 2–20 second range lack distinct peaks, including a defined wind wave band. Our current and previous research have shown that there is also no pronounced modal structure in the infragravity wave range.

In physical oceanography, the term significant wave height, denoted by H_s , is used to characterize waves. It is defined as the average wave height from trough to crest of the highest one-third of waves, $H_{1/3}$.

$$H_{1/3} = \frac{1}{\frac{1}{3}N} \sum_{m=1}^{\frac{1}{3}N} h_m, \quad (4)$$

The h_m values represent individual wave heights, sorted in descending order ($m = 1$ to N), considering only the highest one-third for alignment with visual observations. Significant wave height can also be defined as four times the standard deviation of the surface height or as four times the square root of the zero order moment [3].

Figure 8b, c shows graphs depicting the variation of significant wave height for periods of 5, 8, and 11.5 seconds, with the darker shade representing a period of 5 seconds. Wind waves and swell at instrument 150 are approximately 12 % higher than at instrument 149, which is slightly sheltered by the cape from waves originating from the Sea of Okhotsk. The highest wave heights were observed during sustained, approximately 24-hour long, southerly winds associated with a cyclone that passed over the observation area. A short-duration but strong wind with speeds up to 8 m/s does not contribute to the generation of wave heights comparable to those during a cyclone; in this case, they are half as high.

Conclusion

This study analyzes various wave types in the waters off Cape Svobodny (southeastern coast of Sakhalin Island). Data were collected using two autonomous wave and seawater temperature recorders, ARV 14K, and a Vantage Pro2 Weather Station in 2021. Five-month time series of sea level and temperature fluctuations with a one-second sampling rate were employed. Atmospheric pressure and wind speed were recorded with an hourly sampling rate.

Spectral analysis revealed that wave spectral densities in the range of 2–600 seconds lack pronounced peaks. Wave energy at instrument 149 is lower than at instrument 150, which can be attributed to the sheltering effect of Cape Svobodny. An increase in energy within the infragravity wave band (periods of 20–250 seconds) is observed during storms, but without a distinct modal structure.

Waves with periods of 14.2 seconds, 3.6 minutes, and 8.8 minutes were investigated. The Longuet-Higgins and Stewart theory explains the short waves associated with swell scattering in the surf zone. Free waves are also generated in this process. The Lamb model and Bessel function confirmed the existence of leaky waves with periods of 3.6 and 8.8 minutes.

Wave processes propagating towards the shore include waves with periods from 20 to 110 seconds, as well as alongshore processes with periods of 4.27–7.63 minutes. Edge wave generation was explored for the bathymetric profile near Cape Svobodny using the dispersion relation for Stokes waves. Seawater temperature fluctuations impact the propagation of waves with periods longer than 3 minutes, disrupting both edge waves and leaky waves. Internal waves with periods of 3–100 minutes and amplitudes exceeding 7 °C affect the energy of short-period waves.

Analysis of wind wave and swell characteristics revealed the absence of significant wave activity in the period range of 2–20 seconds. The highest wave heights were observed during sustained southerly winds associated with a cyclone, while strong winds up to 8 m/s did not generate such high waves.

References

1. Abuzyarov Z.K. 1981. [Sea waves and its forecasting]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 166 p.
2. *Wind, waves and seaports*. Authors: Galenin B.G., Duginov B.A., Krivitskii S.V., Krylov Yu.M., Podmogil'nyi I.A. 1986. Leningrad: Gidrometeoizdat, 264 p.
3. Holthuijsen L.H. 2007. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press, 387 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511618536>
4. Efimov V.V., Kulikov E.A., Rabinovich A.B., Fain I.V. 1985. [Waves in the boundary regions of the ocean]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 280 p.
5. Munk W.H., Snodgrass F.E., Wimbush M. 1970. Tides off-shore: Transition from California coastal to deep-

- sea waters. *Geophysical Fluid Dynamics*, 1(1-2): 161–235. <https://doi.org/10.1080/03091927009365772>
6. Mysak L.A. **1980.** Topographically trapped waves. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 12: 45–76. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.12.010180.000401>
 7. Herbers T.H.C., Elgar S., Guza R.T. **1995.** Generation and propagation of infragravity waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C12): 24863–24872. <https://doi.org/10.1029/95jc02680>
 8. 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: 2201–2216. <https://doi.org/10.1175/jpo-d-18-0112.1>
 9. Plekhanov F.A., Kovalev D.P. **2016.** [A program for complex processing and analysis of time series of sea level data based on the author's algorithms]. *Geoinformatics*, 1: 44–53.
 10. Kovalev D.P. **2018.** *Kyma: The software*. RU 2018618773. No. 2018612587, application 20.03.2018; publ. 19.07.2018. (In Russ.).
 11. Otnes R., Enokson L. **1982.** [Applied time series analysis]. Moscow: Mir, 432 p.
 12. Yaffee R.A., McGee M. **2000.** *Introduction to time series analysis and forecasting with applications of SAS and SPSS*. New York: Academic press, 528 p.
 13. Bendat J.S., Piersol A.G. **2010.** *Random data: Analysis and measurement procedures*. New York: John Wiley & Sons, 640 p. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118032428>
 14. Denman K.L. **1975.** Spectral analysis: a summary of the theory and techniques. *Fisheries and Marine Service*, Report No. 539. 37 p.
 15. Marple S.L. **1987.** *Digital spectral analysis: with applications*. New Jersey: Prentice Hall, 390 p.
 16. Rabinovich A.B. **1993.** [Long gravitational waves in the ocean: capture, resonance, radiation]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 240 p.
 17. Longuet-Higgins M.S., Stewart R.W. **1962.** Radiation stress and mass transport in surface gravity waves with application to 'surf beats'. *Journal of Fluid Mechanics*, 13: 481–504. <https://doi.org/10.1017/s0022112062000877>
 18. Lamb H. **1945.** *Hydrodynamics*. 6th ed. New York: Dover publications. (Art. 260–261, p. 445–450). <https://doi.org/10.5962/bhl.title.18729>
 19. Foda M.A., Mei C.C. **1981.** Nonlinear excitation of long-trapped waves by a group of short swells. *Journal of Fluid Mechanics*, 111: 319–345. <https://doi.org/10.1017/s0022112081002401>
 20. Holman R.A., Bowen A.J. **1984.** Longshore structure of infragravity wave motions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 89(C4): 6446–6452. <https://doi.org/10.1029/jc089ic04p06446>
 21. Eckart C. **1951.** *Surface waves on water of variable depth*: Lecture Notes. Marine Physical Laboratory, Scripps Institute Oceanography. Wave Report, 100(S10). 99 p.
 22. Kurkin A., Kovalev D., Kurkina O., Kovalev P. **2023.** Features of long waves in the area of Cape Svobodny (South-Eastern part of Sakhalin Island, Russia) during the passage of cyclones. *Russian Journal of Earth Sciences*, 23, ES3003. <https://doi.org/10.2205/2023es000852>

About the Authors

Employees of the Laboratory of wave dynamics and coastal currents, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia:

Kovalev, Dmitry P. (<https://orcid.org/0000-0002-5184-2350>), 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, Leading Researcher, p.kovalev@imgg.ru
Borisov, Aleksander S. (<https://orcid.org/0000-0002-9026-4258>), Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, a.borisov@imgg.ru
Kirillov, Konstantin V. (<https://orcid.org/0000-0002-0822-3060>), Researcher, k.kirillov@imgg.ru

Received 20 June 2024
Accepted 17 August 2024

Об авторах

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

Ковалев Дмитрий Петрович (<https://orcid.org/0000-0002-5184-2350>), доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории, d.kovalev@imgg.ru
Ковалев Петр Дмитриевич (<https://orcid.org/0000-0002-7509-4107>), доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, p.kovalev@imgg.ru
Борисов Александр Сергеевич (<https://orcid.org/0000-0002-9026-4258>), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, a.borisov@imgg.ru
Кириллов Константин Владиславович (<https://orcid.org/0000-0002-0822-3060>), научный сотрудник, k.kirillov@imgg.ru

Поступила 20.06.2024
Принята к публикации 17.08.2024

© Автор, 2024 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author, 2024.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 551.21

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.212-218>
<https://www.elibrary.ru/uvkmyl>

Полевые тephростратиграфические работы на о. Итуруп (Южные Курильские острова) в 2024 г.

A. V. Дегтерев

E-mail: d_a88@mail.ru

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

Резюме. В сообщении представлены результаты полевых работ (июль 2024 г.) по изучению следов доисторических пеплопадов на территории г. Курильск и расположенных вблизи него населенных пунктов – поселков Китовый, Рыбаки, Рейдово (Итуруп, Южные Курильские острова). Основу работ традиционно составляли тephростратиграфические исследования, в ходе которых изучались разрезы почвенно-пирокластического чехла, всего изучено более 10 разрезов. Полученные в ходе полевых работ материалы после проведения работ по радиоуглеродному датированию и изучению вещественного состава будут использованы в дальнейших региональных исследованиях молодого вулканизма Южных Курильских островов, а также в работах по оценке вулканоопасности и вулканического районирования.

Ключевые слова: Курильские острова, Итуруп, вулканический пепел, тephра, эксплозивные извержения

Tephrostratigraphic fieldwork on Iturup Island (the South Kuril Islands) in 2024

Artem V. Degterev

E-mail: d_a88@mail.ru

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

Abstract. The report presents the results of the fieldwork (July 2024) aimed at studying the traces of prehistoric ashfalls in the city of Kurilsk and nearby settlements: the villages of Kitovy, Rybaki, and Reydovo (Iturup, South Kuril Islands). The work was traditionally based on tephrostratigraphic studies, during which the sections of the soil-pyroclastic cover were studied. In total, more than 10 sections were studied. The materials obtained during the fieldwork, after carrying out radiocarbon dating and material composition studies, will be used in further regional studies on young volcanism of the South Kuril Islands, as well as in studies on assessing volcanic hazard and volcanic zoning.

Keywords: Kuril Islands, Iturup, volcanic ash, tephra, explosive eruptions

Для цитирования: Дегтерев А.В. Полевые тephростратиграфические работы на о. Итуруп (Южные Курильские острова) в 2024 г. Геосистемы переходных зон, 2024, т. 8, № 3, с. 212–218. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.212-218>; <https://www.elibrary.ru/uvkmyl>

For citation: Degterev A.V. Tephrostratigraphic fieldwork on Iturup Island (the South Kuril Islands) in 2024. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, No. 3, pp. 212–218. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.212-218>; <https://www.elibrary.ru/uvkmyl>

Финансирование и благодарности

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (№ 121030100168-3).

Автор выражает признательность жителям о. Итуруп – В.В. Тарико и А.А. Лисееву, а также коллективу сейсмостанции г. Курильск (СФ ФИЦ ЕГС РАН) за помощь

Funding and Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS (No. 121030100168-3).

The author is grateful to V. Tariko and A. Liseev, a residents of Iturup Island, and to the Kurilsk seismic station team for

в проведении полевых работ. Автор благодарит д.г.н. Н.Г. Разжигаеву и рецензентов за критический обзор рукописи и полезные замечания.

assistance in the fieldwork. The authors thank D-r Nadezhda G. Razjigaeva and the respected Reviewers for their detailed analysis of the paper and helpful comments.

Полевые вулканологические исследования на о. Итуруп (Южные Курильские о-ва) в июле 2024 г. были направлены на изучение следов доисторических пеплопадов на территории г. Курильск и расположенных вблизи него населенных пунктов (поселки Китовый, Рыбаки, Рейдово) (рис. 1). Работа продолжает тектоностратиграфические исследования, начатые автором ранее: в 2013–2014 гг. в составе вулканологического отряда ИМГиГ ДВО РАН под руководством А.В. Рыбина [1] и проведенные в 2021–2022 гг. совместно с коллегами из ИВиС ДВО РАН и ТИГ ДВО РАН [2, 3] в рамках реализации гранта РНФ «Изучение вулканической, сейсмической и цунами опасности, а также оценка геотермальных ресурсов для развивающихся территорий Курильских островов» (рук. академик Е.И. Гордеев, ИВиС ДВО РАН). В ходе этих работ были получены данные о строении почвенно-пиросклетического чехла (ППЧ) и торфяников центральной части о. Итуруп, датирован ряд пепловых прослоев, оценена частота палеопеплопадов, реконструирована послеледниковая история развития природной среды [1, 3]. Тем не менее голоценовая летопись вулканических извержений этого района еще полна пробелов. В частности, остаются проблемы с идентификацией источников большинства пеплов. Продолжение работ по изучению молодого, неоплейстоцен-голоценового вулканализма о. Итуруп определяется также практической потребностью оценки вулканической опасности территории, где в настоящее время сосредоточено большинство населенных пунктов, объектов инфраструктуры

и производства МО «Курильский городской округ». Пеплопады являются наиболее частыми проявлениями вулканической активности, поэтому связанные с ними отложения могут быть отождествлены с историей вулканизма в целом, а их значительное площадное распространение обеспечивает возможность изучения вулканических летописей на удалении от вулканов. Последнее имеет особую актуальность в условиях Южных Курил, характеризующихся слабо развитой дорожной сетью и обилием растительности, образующей труднопроходимые заросли, которые сильно осложняют проведение маршрутных работ. В настоящем сообщении кратко описаны выполненные в 2024 г. исследования и их предварительные результаты.

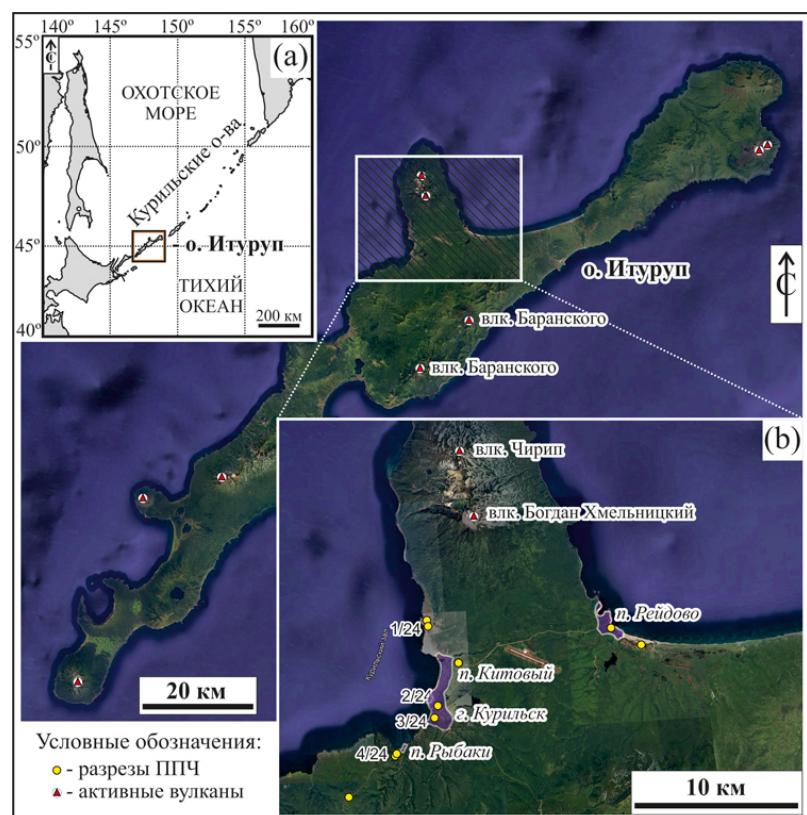


Рис. 1. Район исследований: (а) положение о. Итуруп в цепи Курильских островов, (б) расположение изученных разрезов.

Fig. 1. Study area: (a) position of Iturup Island in the Kuril Islands chain, (b) location of the studied sections.

Основу работ 2024 г. традиционно составляли тефростратиграфические исследования, в ходе которых изучались разрезы ППЧ, осуществлялось их детальное описание и опробование. Всего было изучено более 10 разрезов (рис. 1, 2). Отложения почвенно-пирокластического чехла исследуемого района, как было показано в ранних работах, крайне бедны тефростратиграфической информацией. От места к месту количество видимых пепловых прослоев варьирует в лучшем случае от 2-3 до 5 (данные об их возрасте приведены в [1]). При этом тефра, как правило, не образует отдельных горизонтов с четкими границами, а как бы распылена в толще погребенных почв и супесей, переработана растительностью и часто угадывается лишь на контрасте с вмещающими

отложениями. Нередко наблюдается ее залегание в виде линз и примазок, не образующих выдержаных по простирианию слоев. Кроме того, стоит отметить существенные флюктуации в строении отдельных разрезов ППЧ, расположенных на незначительном удалении друг от друга: мощности отдельных пепловых прослоев и вмещающих их палеопочв/супесей значительно варьируют. Это осложняет корреляции разрезов и идентификацию пеплов как отдельных стратиграфических единиц. В этом отношении отложения ППЧ существенно проигрывают торфяникам, представляющим собой практически идеальный архив вулканических событий (в голоценовых торфяниках центрального Итурупа суммарное количество визуально видимых пепловых прослоев превышает 20). Таким образом, необходимо по возможности проводить ревизию и пересмотр предшествующих результатов с целью уточнения строения ППЧ и датирования пепловых прослоев. Тем более что работы в этом направлении по большому счету имеют пионерный характер.

Общая картина строения ППЧ центральной части о. Итуруп в настоящее время выглядит следующим образом. В основании голоценового (верхнеплейстоцен-голоценового?) ППЧ района работ залегает горизонт тефры, представленной разнозернистым пеплом желто-коричневого, оливково-желтого цвета, перекрывающий крупнообломочную толщу (верхнеплейстоценовые обвалные отложения?). Данная стратиграфическая единица, имеющая мощность от 25 до 45 см, встречается повсеместно в центральной части острова и легко узнается по перекрывающей ее хорошо гумусированной графитно-черного (до черно-коричневого) цвета почве. Для удобства предлагается присвоить данной тефре индекс и в качестве рабочего варианта использовать обозначение – «It-c» («Центральный Итуруп»). Точный возраст слоя It-c пока не известен, но, предположительно, он соответствует самому концу плейстоцена – началу голоцена (10.000–13.000 лет), так как перекрывающая его палеопочка, отобранный из ППЧ района северной части Куйбышевского перешейка (рис. 1) и датированная радиоуглеродным ме-

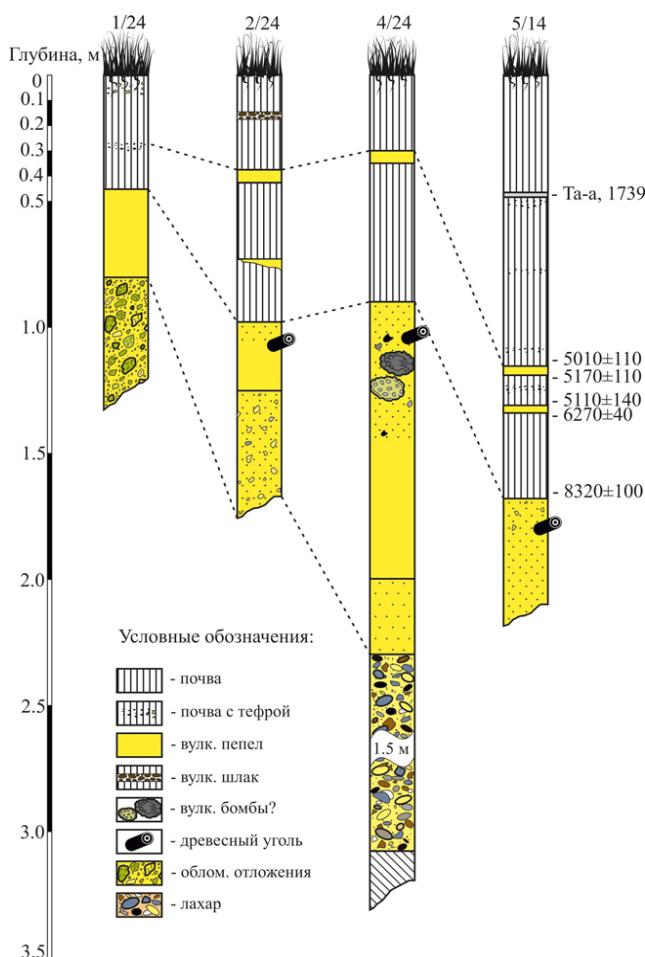


Рис. 2. Примеры разрезов голоценового почвенно-пирокластического чехла о. Итуруп, изученных в 2024 г. Разрез 5/14 с калиброванными значениями радиоуглеродного возраста (колонка с цифрами справа) из работы [1].

Fig. 2. Examples of sections of the Holocene soil-pyroclastic cover of Iturup Island, studied in 2024. Section 5/14 with calibrated radiocarbon age values (numbers on the right) is from the study [1].

тодом, имеет возраст 8320 ± 100 (здесь и далее приводятся калиброванные значения abs. возраста) [1]. В ряде разрезов в верхней половине слоя, характеризующейся более грубым гранулометрическим составом, встречаются фрагменты древесных углей (диаметр отдельных находок достигает 1 см). Наибольшее их количество было обнаружено и отобрано в ППЧ разреза 2/24 (рис. 2, 3). В ближайшее время на основе радиоуглеродного датирования будет установлен возраст тефры It-c.

В точке 4/24, к югу от пос. Рыбаки, мощность тефры It-c достигает 1.3 м, при этом обнаруживается ее более сложное строение. На туфопесчаниках рыбаковской (камуйской?) свиты вскрывается вулканический сель (лахар), отложения которого представлены несортированной грубообломочной толщиной мощностью ~1.5 м, состоящей из разнородного материала различной степени окатанности. Примечательно обилие хорошо окатанных (весьма

окатанных) фрагментов афировых базальтов, более соответствующих аллювиальным или прибрежно-морским отложениям. Непосредственно на отложениях лахара, без видимого перерыва, залегает горизонт плотного желто-коричневого относительно хорошо сортированного (без явной примеси более крупного материала) вулканического пепла мощностью ~30 см. Выше залегает желто-коричневый, хорошо литифицированный слой тефры It-c, состоящей из пепла и мелких лапиллей, мощностью ~1 м. В верхней части горизонта (25–50 см от кровли), как и во многих разрезах исследуемого района, встречаются фрагменты древесных углей (рис. 4). Кроме того, в верхней половине слоя распространены крупные округлой формы обломки вулканитов (от 30 до 65 см), являющиеся, предположительно, вулканическими бомбами. Практически все они имеют вид брекчий, состоящих из меланократовых и лейкократовых включений. Часть



Рис. 3. Общий вид почвенно-пирокластического чехла разрезов № 1/24, 2/24. Здесь и далее фотографии автора.

Fig. 3. General view of the sections of soil-pyroclastic cover (No. 1/24, 2/24). Here and hereafter are photos by the author.

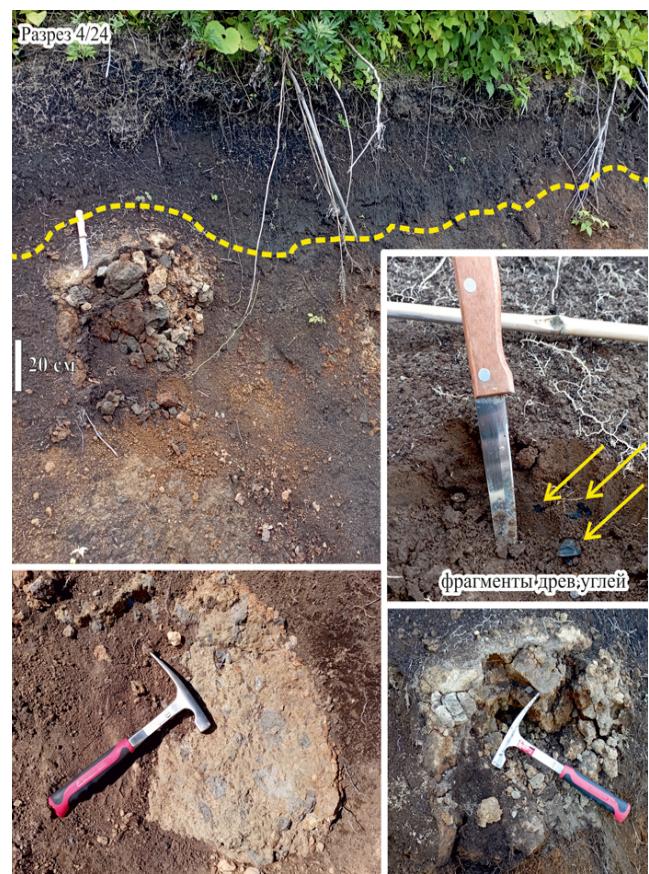


Рис. 4. Крупнообломочные вулканиты (бомбы?) в разрезе 4/24.

Fig. 4. Coarse clastic volcanic rocks (volcanic bombs?) in section 4/24.

из них содержит довольно свежие пористые фрагменты андезибазальтов (рис. 4). Всего в пределах изученного обнажения на протяжении ~100 м обнаружено порядка 8 таких «бомб». В ходе тефростратиграфических работ последних лет подобные находки в данном районе обнаружены впервые. Возможно, результаты последующих аналитических работ потребуют пересмотра или корректировки существующих представлений о вулканической опасности территории. Выше залегает мощная хорошо гумусированная палеопочва, описанная выше, сформированная в первой половине голоцена. В тефростратиграфическом отношении она является «немой», так как в довольно продолжительном временном интервале (тысячи лет) не содержит видимых пепловых прослоев (не исключается присутствие крипто-тефра). Несколько схожая картина наблюдалась в отложениях торфяника в районе оз. Гнилое, в котором на диапазон с 12 500 до 5800 л.н. приходилось порядка 6 пеплов и по меньшей мере 20 за последние 5800 лет [1]. Судя по всему, интенсивность проявления эксплозивного вулканизма в первой половине голоцена после события It-s на территории исследуемого района была относительно низкой.

В среднеголоценовой части почвенно-пирокластического чехла района исследований более или менее четко выделяются два пепловых прослоя, с возрастом ~5100 и ~5700 лет [1]. Тонкие оливково-желтые пеплы часто встречаются в разрезах как вместе, так и по отдельности. Независимо от этого для ППЧ центральной части Итурупа их можно рассматривать в качестве своеобразного медианного репера текущего межледникового. Источник этих пеплов пока точно не определен, предполагается, что это были эруптивные центры, расположенные в пределах хр. Иван Грозный.

В верхней части голоценового ППЧ о. Итуруп повсеместно распространен пепел влк. Тарумэ (о. Хоккайдо), выпавший в результате мощного эксплозивного извержения 1739 г. (индекс пепла – Та-а). Ось пеплопада была направлена в северо-восточном направлении, из-за чего острова Кунашир и Итуруп попали в зону пеплопада [4]. Примечательно, что в ППЧ о. Итуруп пепел Та-а выражен луч-

ше и встречается гораздо чаще. Он распространен практически повсеместно и поэтому является своеобразной вехой, разделяющей исторический и доисторический периоды активности вулканов острова [2]. Данный пепел с вмещающими почвами был отобран в виде монолита размером 35 × 65 см для экспозиции Курильского краеведческого музея.

Помимо изучения голоценового эксплозивного вулканизма о. Итуруп, в ходе полевых исследований 2024 г. были проведены рекогносцировочные работы по оценке текущей активности влк. Баранского. Вулкан Баранского (абс. выс. 1132 м) – активный вулкан, расположенный в северной части хребта Грозный, трассирующего центральную часть о. Итуруп, вдоль его тихоокеанского побережья (рис. 1). Вершинный кратер вулкана (размер 300 × 400 м) заполнен экструзивным куполом. Через разрушенный северный сектор отходит короткий (~1000 м) дацитовый лавовый поток. Состав пород вулкана варьирует от андезибазальтов до андезидицитов [5, 6]. Единственное историческое извержение вулкана произошло в 1951 г. (информация о нем была получена со слов местных жителей [6]).

Для изучения современного состояния вулкана выполнен пеший маршрут от ГеоТЭС «Океанская» (в 2014 г. была демонтирована и законсервирована) через юго-запад-

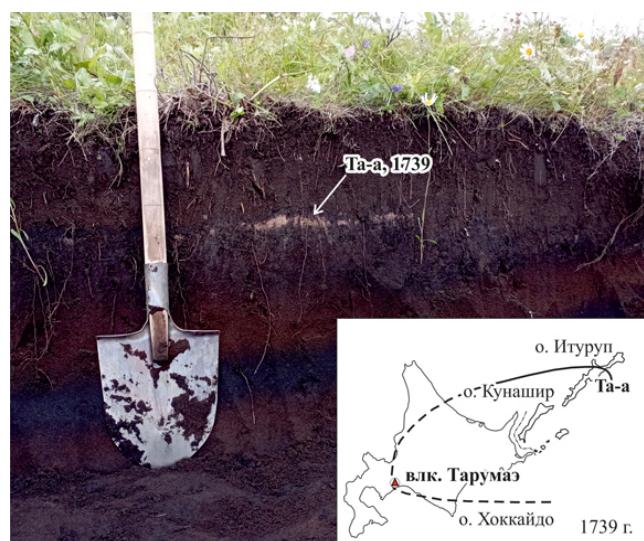


Рис. 5. Пепловый прослой Та-а в разрезе 3/24. На врезке – 1 см изопахита по данным [4].

Fig. 5. Ta-a ash layer in section 3/24. Inset shows 1 cm isopach according to [4].

ное (Верхнее) сольфатарное поле к вершине влк. Баранского. Для вулкана характерна умеренная сольфатарная активность, локализованная в пределах Верхнего сольфатарного поля и в вершинной части конуса [7; устное сообщение Р.В. Жаркова]. Нами установлено, что в пределах сольфатарного поля Верхнее, как и ранее, выделяется несколько (около 5) отдельных мощных парогазовых выходов (рис. 6) с температурой газов порядка 100 °C, а также множество небольших, с более низкими температурой и интенсивностью парогазовой деятельности. Сольфатарная активность в пределах прикрaterной зоны южного сектора минимальна, выходы газов имеют небольшую температуру (60–65 °C) и крайне слабый «дебет».

Соседний действующий вулкан Иван Грозный (абс. выс. 1159 м), расположенный

в южной части хр. Грозный, в 15 км к юго-западу от влк. Баранского, заметной парогазовой активности не проявлял. Иван Грозный наиболее активный вулкан о. Итуруп, его последнее извержение происходило в 2012–2013 гг. [8].

Полученные в ходе полевых работ 2024 г. материалы после проведения аналитических исследований по радиоуглеродному датированию и изучению вещественного состава будут использованы в дальнейшем при изучении проявлений молодого вулканизма Южных Курильских островов, а также в работах по оценке вулканоопасности и вулканического районирования. Кроме того, полученные предварительные результаты могут быть полезны специалистам смежного профиля, изучающим голоценовые отложения (например, археологам, геоморфологам, почвоведам).



Рис. 6. Общий вид Верхнего сольфатарного поля (верхнее фото), вид с северо-востока, и отдельных мощных сольфатарных выходов (нижние фото). Июль 2024 г.

Fig. 6. General view of the Upper solfataric field (top photo), view from the northeast, and individual powerful solfataras (bottom photos). July 2024.

Список литературы

1. Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Арсланов Х.А., Коротеев И.Г., Гурьянов В.Б., Козлов Д.Н., Чибисова М.В. **2016.** Эксплозивные извержения на о. Итуруп в голоцене: предварительные результаты тephroхронологических исследований. *Мониторинг. Наука и технология*, 2: 6–10.
2. Дегтерев А.В., Пинегина Т.К., Разжигаева Н.Г., Кожурин А.И. **2021.** Голоценовая летопись вулканических извержений острова Итуруп. *Природа*, 12: 17–22.
3. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А. и др. **2022.** Запись изменений природной среды в озерно-болотных отложениях горной части острова Итуруп с позднеледником. *Тихоокеанская геология*, 41(2): 59–74. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2022-41-2-59-74>; EDN QXSCAK
4. Razzhigaeva N.G., Matsumoto A., Nakagawa M. **2016.** Age, source, and distribution of Holocene tephra in the southern Kurile Islands: Evaluation of Holocene eruptive activities in the southern Kurile arc. *Quaternary International*, 397: 63–78. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.070>
5. Биндеман И.Н. **1997.** Периодическое смещение магм с кумулятами как механизм циклической эволюции вулкана Баранского (о. Итуруп, Курильские острова). *Геохимия*, 4: 380–390.
6. Горшков Г.С. **1967.** *Вулканализм Курильской островной дуги*. М.: Наука, 287 с.
7. Жарков Р.В. **2014.** *Термальные источники Южных Курильских островов*. Владивосток: Дальнаука, 378 с.
8. Жарков Р.В., Бергаль-Кувикас О.В., Дегтерев А.В., Романюк Ф.А., Борисовский С.Е. **2024.** Вулкан Иван Грозный (остров Итуруп, Курильские острова): вещественный состав продуктов извержений и современная активность. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 62(2): 49–65. doi: 10.31431/1816-5524-2024-2-62-49-65

References

1. Degterev A.V., Rybin A.V., Arslanov H.A., Korteev I.G., Guryanov V.B., Kozlov D.N., Chibisova M.V. **2016.** [Explosive eruptions on Iturup Island in the Holocene: preliminary results of tephrochronological studies]. *Monitoring. Nauka i tekhnologii = Monitoring. Science and Technology*, 2: 6–10. (In Russ.).
2. Degterev A.V., Pinegina T.K., Razjigaeva N.G., Kozhurin A.I. **2021.** [Holocene chronicle of volcanic eruptions on Iturup Island]. *Priroda = Nature*, 12: 17–22. (In Russ.).
3. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Degterev A.V., Ezhkin A.K., Rybin A.V., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Petrov A.Yu. **2022.** The records of environmental changes in lacustrine-swamp sequences within the mountain area of Iturup Island since the Late Glacial Period. *Russian Journal of Pacific Geology*, 16(2): 116–130. <https://doi.org/10.1134/s1819714022020087>
4. Razzhigaeva N.G., Matsumoto A., Nakagawa M. **2016.** Age, source, and distribution of Holocene tephra in the southern Kurile Islands: Evaluation of Holocene eruptive activities in the southern Kurile arc. *Quaternary International*, 397: 63–78. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.070>
5. Bindeman I.N. **1997.** [Periodic displacement of magmas with cumulates as a mechanism of cyclic evolution of Baransky volcano (Iturup Island, Kuril Islands)]. *Geohimiya = Geochemistry*, 4: 380–390. (In Russ.).
6. Gorshkov G.S. **1967.** *[Volcanism in the Kuril Island arc]*. Moscow: Nauka, 1967, 287 p. (In Russ.).
7. Zharkov R.V. **2014.** *Thermal springs of the South Kuril Islands*. Vladivostok: Dal'nauka, 378 p. (In Russ.).
8. Zharkov R.V., Bergal-Kuvikas O.V., Degterev A.V., Romanyuk F.A., Borisovsky S.E. **2024.** Ivan Grozny Volcano (Iturup Island, Kuril Islands): Material composition of eruption products and current activity. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle = Vestnik KRAUNC. Earth Sciences*, 62(2): 49–65. (In Russ.). doi: 10.31431/1816-5524-2024-2-62-49-65

Об авторе

Дегтерев Артем Владимирович (<https://orcid.org/0000-0001-8291-2289>), кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, d_a88@mail.ru

Поступила 20.08.2024

Принята к публикации 09.09.2024

About the Author

Degterev, Artem V. (<https://orcid.org/0000-0001-8291-2289>), Cand. of Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, d_a88@mail.ru

Received 20 August 2024

Accepted 9 September 2024



КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 574.2+581.5

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.219-227>
<https://www.elibrary.ru/tziazr>

Лишайники восточного склона вулкана Берутарубе, о. Итуруп (Курильские острова, Дальний Восток России)

A. K. Ежкин[@], Ф. А. Романюк

[@]E-mail: ezhkin@yandex.ru

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

Резюме. В работе представлен список лишайников восточного склона влк. Берутарубе, одного из самых труднодоступных и слабо изученных действующих вулканов на о. Итуруп. Образцы лишайников собраны в августе 2023 г. на эродированных участках в вершинной части вулкана, а также на восточном склоне вдоль ручья Андрея, в верховьях которого разгружаются безымянные холодные кислые источники. Всего в местах сбора выявлено 53 вида лишайников, из них 20 – новые для о. Итуруп, 2 – для Курильских островов, 1 – для Сахалинской области. В вершинной части вулкана отмечены лишайники, типичные для районов проявления вулканической активности: *Cladonia crispata*, *Cladonia straminea*, *Huea confluens*, *Lecidea plana*, *Melanelia stygia*, *Pseudephebe pubescens*, *Rhizocarpon badioatrum*, *Umbilicaria torrefacta*. Влияния сольфатарных газов вулкана на лихенобиоту долины ручья Андрея не выявлено, что позволяет сделать предположение об отсутствии прямого влияния продуктов сольфатарной деятельности влк. Берутарубе на природную среду его восточных склонов..

Ключевые слова: сольфатарная деятельность, лишайники, устойчивые виды, биоразнообразие, Северо-Восточная Азия

Lichens of the eastern slope of Berutarube volcano, Iturup Island (the Kuril Islands, Far East of Russia)

Aleksander K. Ezhkin[@], Fedor A. Romanyuk

[@]E-mail: ezhkin@yandex.ru

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

Abstract. The paper presents an annotated list of lichens of the eastern slope of Berutarube volcano, one of the most inaccessible and poorly studied active volcanoes on Iturup Island. Samples of lichens were collected in August 2023 from eroded areas in the summit part of the volcano, as well as on the eastern slope along the Andrei Creek, in the upper reaches of which unnamed cold acidic springs discharge. In total, 53 species of lichens were identified from the sampling sites, of which 20 species were new to Iturup Island, 2 species were new to the Kuril Islands, and 1 species was new to the Sakhalin region. In the summit part of the volcano, lichens typical for areas of volcanic activity were identified: *Cladonia crispata*, *Cladonia straminea*, *Huea confluens*, *Lecidea plana*, *Melanelia stygia*, *Pseudephebe pubescens*, *Rhizocarpon badioatrum*, and *Umbilicaria torrefacta*. The influence of the solfataric gases of the volcano on the lichen biota of the Andrei Creek valley has not been revealed, which allows us to make the assumption that there is no direct influence of the products of the solfataric activity of Berutarube volcano on the natural environment of its eastern slopes.

Keywords: solfataric activity, lichens, tolerant species, biodiversity, Northeast Asia

Для цитирования: Ежкин А.К., Романюк Ф.А. Лишайники восточного склона вулкана Берутарубе, о. Итуруп (Южные Курильские острова, Дальний Восток России). Геосистемы переходных зон, 2024, т. 8, № 3, с. 219–227. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.219-227>; <https://www.elibrary.ru/tziazr>

For citation: Ezhkin A.K., Romanyuk F.A. Lichens of the eastern slope of Berutarube volcano, Iturup Island (the Kuril Islands, Far East of Russia). Geosistemy pereходnykh zon = Geosystems of Transition Zones, 2024, vol. 8, no. 3, pp. 219–227. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.219-227>; <https://www.elibrary.ru/tziazr>

Введение

Вулкан Берутарубе (абс. выс. 1220 м) является одним из самых труднодоступных и слабо изученных действующих вулканов Южных Курильских островов. Вулкан формирует южную часть о. Итуруп – п-ов Часовой. Его постройка представляет собой сильно разрушенный, относительно пологий (средний уклон 11–13°) вулканический конус (рис. 1). Слоны вулкана изрезаны глубокими барранкосами и речными долинами с глубокими каньонами и многочисленными водопадами. Вершина влк. Берутарубе сильно эродирована и представляет собой цепочки слитых между собой амфитеатров с западной и восточной сторон и разделяющий их небольшой хребет, вытянутый в меридиональном направлении – его южная часть служит максимальной отметкой вулканической постройки. С юга и с севера вершина вулкана также осложнена рядом амфитеатров [1].

Литературные данные, указывающие на проявление активности вулкана в историческое время, отсутствуют. Свежих вулканических форм рельефа (воронок взрыва, кратера) и продуктов активности, свидетельствующих о недавней вулканической деятельности, также не наблюдается. В вершинной части в воздухе постоянно ощущается сильный запах сероводорода – следствие аэрального переноса термальных газов, источники которых находятся у истоков р. Филюшина на западном склоне вулкана [2, 3]. Здесь, на

высоте 935–940 м н.у.м., на участке Верхний, располагаются две сольфатарные постройки с отверстиями до 1 м. Над отверстиями поднимаются клубы пара и газа с характерным «ревущим» звуком, максимальная температура здесь достигает 82,8 °С [2]. Ниже по склону, на высоте 860–900 м н.у.м., расположен участок Центральный, занимающий правый борт р. Филюшина. На площади ~0,02 км² находятся несколько отдельных крупных сольфатарных построек (высотой около метра и более) и несколько десятков мелких, а также горячие источники. Максимальная температура парогазовой смеси на одном из крупных сольфатарных выходов достигала 96 °С [2]. В то же время многочисленные натечные образования из серы, в том числе очень свежие, свидетельствующие о плавлении кристаллической серы, указывают на то, что температуры здесь могут быть существенно выше 115 °С (температура плавления кристаллической серы). В настоящее время здесь наблюдается наиболее масштабное проявление газогидротермальной активности влк. Берутарубе. Участок Нижний локализован на левом борту р. Филюшина на высоте 800–810 м н.у.м. В пределах участка расположены несколько небольших сольфатар (79,3 °С), а также выходы термальных вод с температурой до 59 °С [2].

Растительность вершинной части вулкана представлена сильно разреженными горными тундрами. Встречается небольшими куртина-

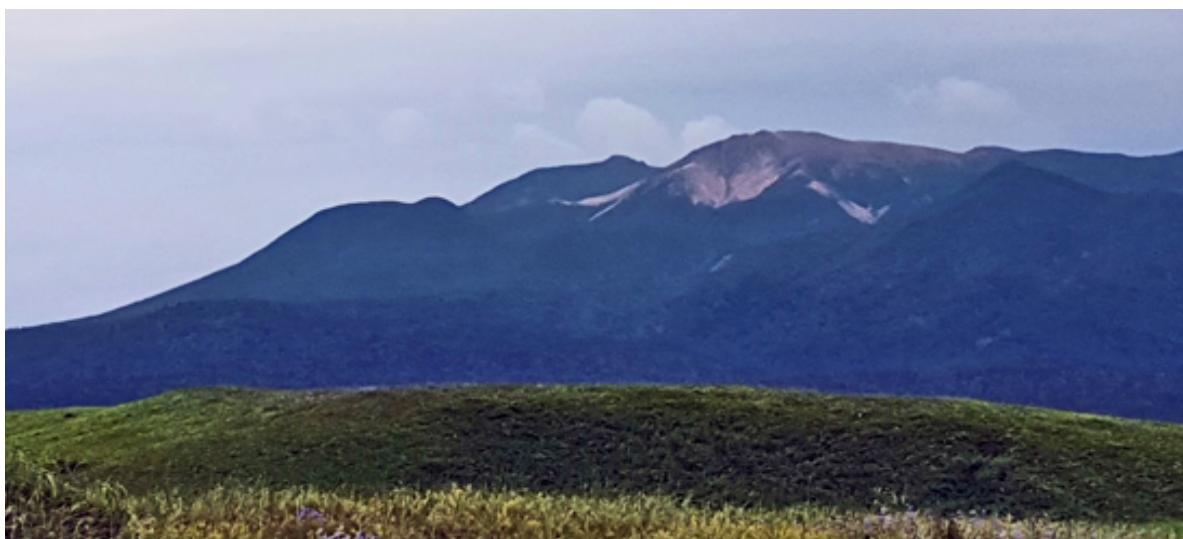


Рис. 1. Вулкан Берутарубе, вид с севера. *Фото Ф.А. Романюка*

Fig. 1. Berutarube volcano, view from the north. *Photo by F.A. Romanyuk*

ми *Spiraea beauverdiana* Schneid., *Empetrum sibiricum* V. Vassil, отдельные особи *Pennellianthus frutescens* (Lamb.) Crosswhite, *Viola kitamiana* Nakai. Растительность долины ручья Андрея в верховьях представлена травянисто-кустарниковым ярусом, формируемым перемежающимися в зависимости от крутизны и степени увлажнения склонов зарослями *Duschekia fruticosa* (Rupr.) Pouzar и осоками. Средний участок представлен каменноберезово-рябиновыми бамбучниками лесами (*Betula ermanii* Cham., *Sorbus commixta* Hedl., *Sasa spp.*) до верхней границы пихтово-еловых лесов (около 450 м н.у.м.). Здесь встречаются *Viburnum furcatum* Blume ex Maxim., *Hydrangea paniculata* Siebold, *Rhododendron aureum* Georgi. Ниже по склону растительность представлена пихтово-еловыми лесами (*Abies sachalinensis* (F.Schmidt) Mast., *Picea jezoensis* (Siebold & Zucc.) Carr.) со слабо развитым пологом. Встречаются *Sorbus commixta* Hedl., *Acer ukurunduense* Trautv. et Mey., папоротники.

Лихенологические исследования крайнего юга о. Итуруп, а именно в районе влк. Берутарубе, ранее не проводились. Все предыдущие исследования лишайников на острове были направлены на выявление видового состава в основном в центральной части острова. На данный момент для Итурупа известно 223 вида лишайников [4–17]. Специальных работ по выявлению видового состава лишайников вулканических местообитаний для Курильских островов относительно немного. На данный момент описаны только отдельные группы лишайников, обитающие вблизи активных сольфатар, где указаны 49 видов [18, 19]. Наиболее полная сводка по лишайникам вулканических местообитаний ближайшего

района выполнена для действующего вулкана Токачи (о. Хоккайдо, Япония), где представлена информация по 89 видам [20].

Цель настоящих исследований – пополнить сведения о флоре лишайников о. Итуруп и особенностях поселения лишайников в местах проявления сольфатарной активности на Курильских островах, а также оценить влияние вулканических проявлений на лишайники на влк. Берутарубе.

Материалы и методы исследований

Сборы лишайников в районе влк. Берутарубе были выполнены в августе 2023 г. в ходе экспедиционных работ [21] в вершинной части вулкана на эродированных участках, покрытых преимущественно мелкообломочным материалом, а также по бортам ручья Андрея, протекающего по восточному склону вулкана, в верховьях которого разгружаются безымянные неисследованные холодные кислые источники (рис. 2). Сбор лишайни-

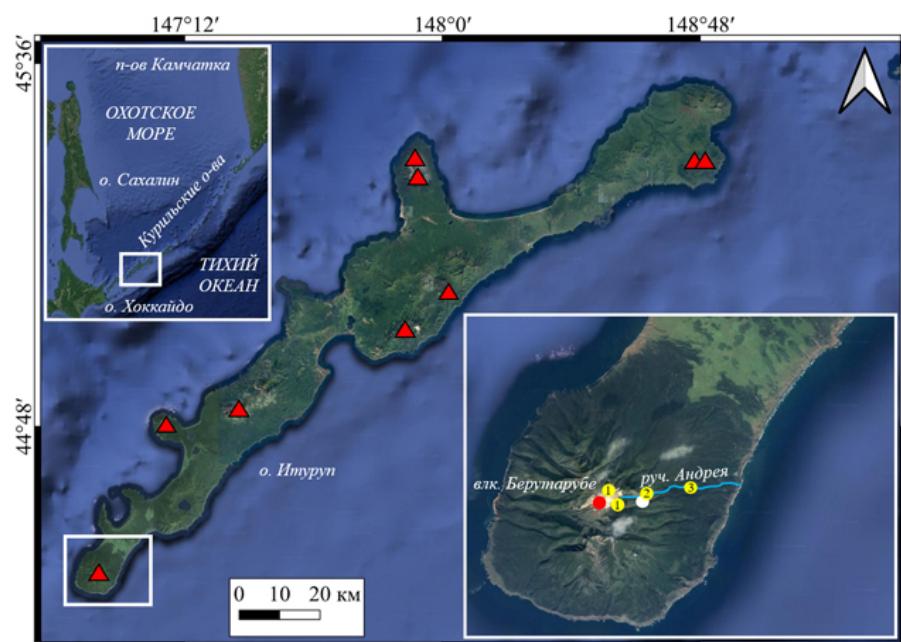


Рис. 2. Картосхема района выполнения работ. Красными треугольниками отмечены активные вулканы о. Итуруп; желтыми кружками – места сбора лишайников в вершинной части влк. Берутарубе (1 – привершинные участки влк. Берутарубе, 2 – средняя часть широколиственного пояса, 3 – средняя часть темнохвойного пояса), красным – сольфатары в верховьях р. Филиюшина, белым – безымянные холодные кислые источники.

Fig. 2. Map of the work area. Red triangles indicate active volcanoes on Iturup Island; yellow dots indicate places where lichens were sampled in the summit part of Berutarube volcano (1, near-summit areas of Berutarube volcano; 2, middle part of the broad-leaved belt; 3, middle part of the dark coniferous belt); a red dot indicates solfataras in the upper reaches of the Filyushin River; a white dot indicates unnamed cold acidic springs.

ков осуществлялся с почвы, камней и древесного субстрата. Обработка и определение материалов были проведены в лаборатории экологии растений и геоэкологии Института морской геологии и геофизики ДВО РАН. Идентификация лишайников выполнена с использованием традиционных лихенологических методик [22]. Названия таксонов даны согласно базе данных Index Fungorum. Образцы хранятся в гербарии ИМГиГ ДВО РАН (SAK). При определении лишайников были использованы микроскопы МБС-10 и LOMO Mikmed 3. В качестве подложки при построении картосхемы района выполнения работ в компоновщике ПО QGIS (V. 3.20.3) использованы спутниковые данные из открытых источников (Image©2024 Landsat/Copernicus; Image©2024 Maxar Technologies; Image©2024 CNES/Airbus).

Результаты исследований

Всего в местах сбора было выявлено 53 вида лишайников; 20 видов – новые для о. Итуруп, из них *Ramalina thrausta* – новый для Курильских островов, *Lecidea plana* – для Сахалинской области (см. таблицу). В вершинной части вулкана (участки под цифрой 1), на расстоянии от 520 до 830 м от крупных сольфатар, выбрасывающих большое количество парогазовых продуктов, отмечены лишайники, типичные для вулканических местообитаний: *Cladonia crispata*, *Cladonia straminea*, *Huea confluens*, *Lecidea plana*, *Melanelia stygia*, *Pseudephebe pubescens*, *Rhizocarpon badioatrum*, *Umbilicaria torrefacta*. Данные виды являются доминантами для вулканических местообитаний на влк. Токачи, Япония [20] и ближе всех поселяются вблизи активных сольфатар. Влияния сольфатарных газов на лихенобиоту исследуемого лесного участка на восточном склоне вулкана не отмечено, что объясняется преобладанием восточных ветров в данном районе и сносом продуктов парогазовых эмиссий в западном направлении (рис. 3). Устойчивых эпифитных лишайников, типичных для сильного

Winds at Berutarubesan [Berutarube from 1/1/1990 to 28/12/2009 All seasons 00-05km elevation Colors give wind speed in m/s

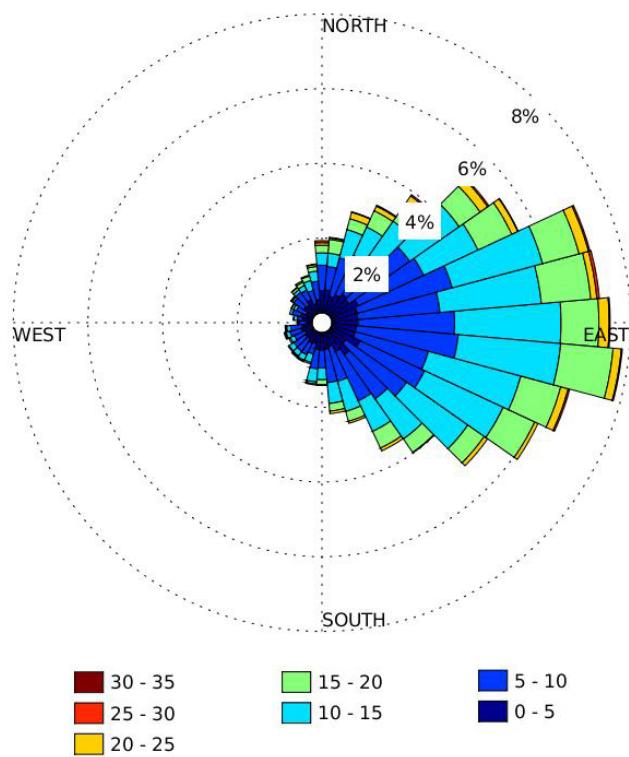
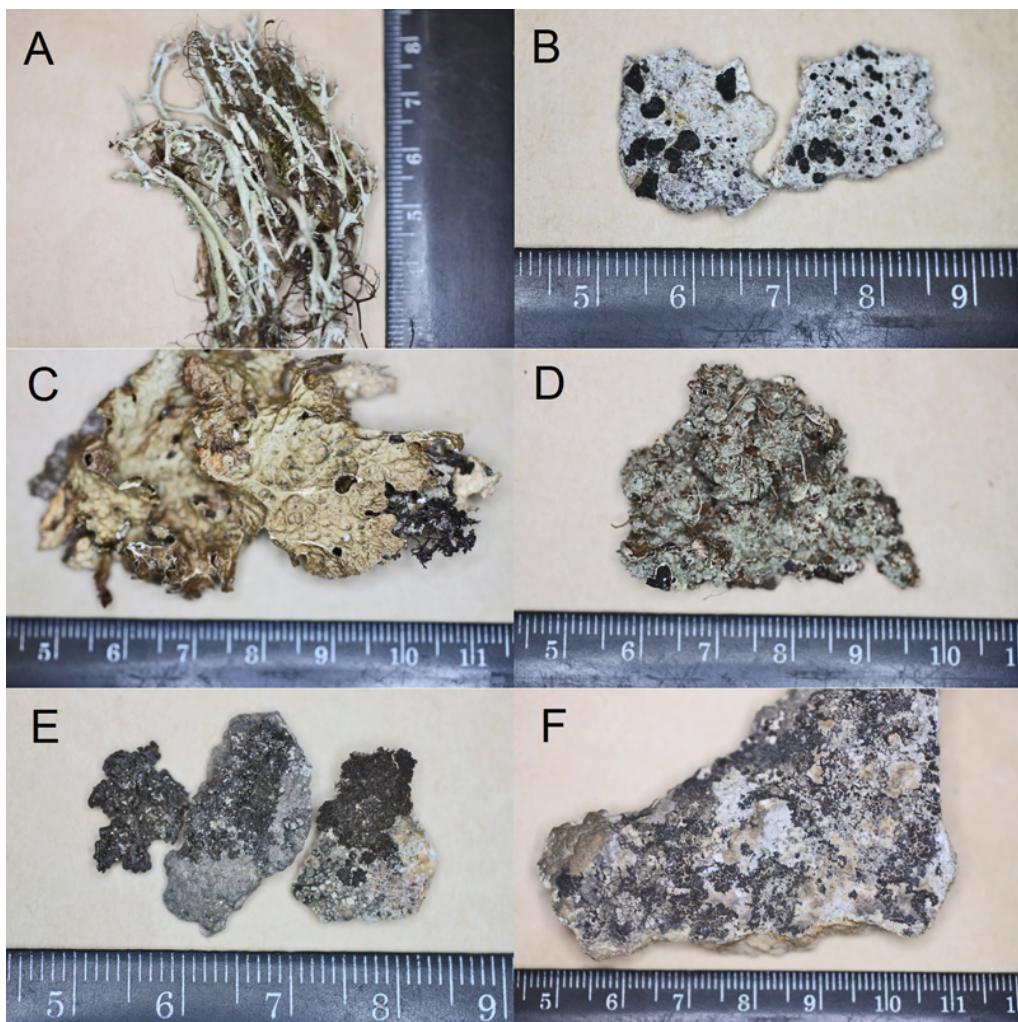


Рис. 3. Роза ветров для влк. Берутарубе за период с 01.01.1990 по 28.12.2009 для высот до 5 км н.у.м. Цветом обозначена скорость ветров в м/с.

Fig. 3. A wind rose chart for Berutarube volcano for the period from 01.01.1990 to 12.28.2009 for altitudes up to 5 km above sea level. Color indicates wind speed in m/s.

вулканического загрязнения [18], на склоне (участки под цифрами 2, 3) не найдено, из чего можно предположить, что влияние действующих сольфатар распространяется исключительно локально. На данных участках преобладают обычные лесные виды, распространенные на Южных Курильских островах (см. таблицу). Среди отмеченных видов были обнаружены два довольно редких для Дальнего Востока лишайника – *Nipponoparmelia perpllicata* (рис. 3), известный с нескольких местонахождений в Корее и островов Шикотан и Сахалин [23], и *Ramalina thrausta*, который в Сахалинской области ранее был известен только с о. Сахалин, также с нескольких местонахождений [24].



Лишайники влк. Берутарубе: А, *Cladonia crispata*; В, *Lecidea plana*; С, *Lobaria meridionalis*; Д, *Nipponoparmelia perplicata*; Е, *Pseudephebe pubescens*; Ф, *Rhizocarpon badioatrum*.

Lichens from Berutarube volcano: A, *Cladonia crispata*; B, *Lecidea plana*; C, *Lobaria meridionalis*; D, *Nipponoparmelia perplicata*; E, *Pseudephebe pubescens*; F, *Rhizocarpon badioatrum*.

Таблица. Список лишайников вулкана Берутарубе

Table. A list of lichens of Berutarube volcano

№ п/п	Вид	Субстрат	Участок
1	<i>Alectoria lata</i> (Tayl.) Lindb.	S, B	2, 3
2	* <i>Anzia colpota</i> Vain.	S	3
3	* <i>Anzia japonica</i> (Tuck.) Müll. Arg.	B	2
4	<i>Bryocaulon pseudosatoanum</i> (Asahina) Kärnefelt	S, B	2, 3
5	<i>Bryoria trichodes</i> (Michx.) Brodo & D. Hawksw.		
6	<i>Buellia disciformis</i> (Fr.) Mudd	S	
7	* <i>Cladonia bellidiflora</i> (Ach.) Schaer.	So	1
8	<i>Cladonia coniocraea</i> (Flörke) Spreng.	DW, TB	1, 2, 3
9	<i>Cladonia crispata</i> (Ach.) Flot.	DW, So	1, 2
10	* <i>Cladonia straminea</i> (Sommerf.) Flörke	So	1
11	<i>Dolichousnea longissima</i> (Ach.) Articus	S	2, 3
12	<i>Graphis scripta</i> (L.) Ach.	S, B	
13	* <i>Huea confluens</i> (Müll. Arg.) C.W. Dodge	Ro	1

№ п/п	Вид	Субстрат	Участок
14	<i>Hypogymnia pseudophysodes</i> (Asahina) Rass.	B	2
15	<i>Hypogymnia vittata</i> (Ach.) Parrique	S, B	
16	<i>Lecanora allophana</i> (Ach.) Nyl.	A, S	2, 3
17	<i>Lecanora argentata</i> (Röhl.) Malme		
18	* <i>Lecanora chlorotera</i> Nyl.	S	3
19	<i>Lecanora pulicaris</i> (Pers.) Ach.		
20	* <i>Lecidea albofuscescens</i> Nyl.		
21	*** <i>Lecidea plana</i> (J. Lahm ex Körb.) Nyl.	Ro	1
22	<i>Lepraria albescens</i> (Huds.) Hafellner	A, S	
23	<i>Lepraria incana</i> (L.) Ach.		2, 3
24	<i>Leptogium cyanescens</i> (Ach.) Körb.	S	
25	* <i>Lobaria meridionalis</i> Vain.		3
26	<i>Lopadium disciforme</i> (Flot.) Kullh.	S, A	2, 3
27	* <i>Melanelia stygia</i> (L.) Essl.	Ro	1
28	<i>Melanohalea olivacea</i> (L.) O. Blanco, A. Crespo, Divakar, Essl., D. Hawksw. & Lumbsch	S	
29	<i>Menegazzia terebrata</i> (Hoffm.) A. Massal.	B, S, A	2, 3
30	<i>Mycoblastus sanguinarius</i> (L.) Norman	B, A	
31	* <i>Nephromopsis endocrocea</i> Asahina	S	
32	* <i>Nipponoparmelia perpllicata</i> S.Y. Kondr., Tschab., Elix & Hur		3
33	<i>Ochrolechia arborea</i> (Kreyer) Almb.	A	
34	* <i>Ochrolechia subpallens</i> Verseghy		
35	<i>Opeltia flavorubescens</i> (Huds.) S.Y. Kondr. & Hur	S	
36	<i>Parmelia fertilis</i> Müll. Arg.	B, S	2, 3
37	<i>Parmelia saxatilis</i> (L.) Ach.	S	
38	<i>Parmelia squarrosa</i> Hale	B, S	2, 3
39	<i>Parmeliopsis hyperopta</i> (Ach.) Vain.		
40	* <i>Platismatia herrei</i> (Imshaug) W. L. Culb. & C. F. Culb.	B	2
41	<i>Platismatia interrupta</i> W. L. Culb. & C. F. Culb.		
42	* <i>Protoparmelia badia</i> (Hoffm.) Hafellner	Ro	1
43	* <i>Pseudephebe pubescens</i> (L.) M. Choisy		
44	<i>Ramalina conduplicans</i> Vain.		
45	<i>Ramalina roesleri</i> (Schaer.) Nyl.	S	2, 3
46	** <i>Ramalina thrausta</i> (Ach.) Nyl.		3
47	<i>Rhizocarpon badioatrum</i> (Flörke ex Spreng.) Th. Fr.		
48	* <i>Rhizocarpon geographicum</i> (L.) DC.	Ro	1
49	<i>Rinodina excrescens</i> Vain.	S	
50	* <i>Tetramelias insignis</i> (Körb.) Kalb		3
51	<i>Thelotrema lepadinum</i> (Ach.) Ach.	S, A	
52	* <i>Umbilicaria torrefacta</i> (Lightf.) Schrad.	Ro	1
53	<i>Vulpicida pinastri</i> (Scop.) J.-E. Mattsson & M.J. Lai	B, S	2

*виды, впервые указанные для о. Итуруп.

**виды, впервые указанные для Курильских островов.

***виды, впервые указанные для Сахалинской области.

Примечания. Участки сборов: 1 – вершинная часть влк. Берутарубе, 2 – верхняя часть долины ручья Андрея, 3 – нижняя ее часть. Субстрат: А – пихта, В – береза, DW – валеж, Ro – камни, S – рябина, So – почва, TB – комли деревьев.

Notes. Sampling sites: 1, the summit part of Berutarube volcano; 2, the upper part of the Andrey Creek valley; 3, the lower part of the Andrey Creek valley. Substrate: A, fir; B, birch; DW, dead wood; Ro, rocks; S, sorb; So, soil; TB, tree butts.

Заключение

В результате исследования района влк. Берутарубе выявлен полный видовой состав лишайников неподалеку от мест проявления сольфатарной деятельности вулкана. Данное исследование показало, что видовой состав лишайников вершинной части влк. Берутарубе схож с видовым составом лишайников активного вулкана Токачи в Японии. Учитывая данный факт, можем предположить, что лишайниковая растительность в местах проявления сольфатарной деятельности активных вулканов на Курильских островах имеет схожие черты и особенности поселения лишайников, вне зависимости от других экологических факторов. Однако достоверное заключение можно сделать только после полного обследования нескольких вулканов архипелага. Преобладающие восточные ветры в районе влк. Берутарубе переносят продукты его парогазовых эмиссий в западном направлении. Вследствие этого, исходя из анализа видового состава лишайников, негативного влияния сольфатарных газов на природную среду в пределах обследованных участков лесного пояса восточного склона вулкана не выявлено. Таким образом, можно предположить, что влияние сольфатарных газов здесь имеет исключительно локальный характер или, возможно, основное воздействие приходится на западный, неисследованный склон.

Список литературы

- Горшков Г.С. 1967. *Вулканизм Курильской островной дуги*. М.: Наука, 287 с.
- Дегтерев А.В., Козлов Д.Н., Романюк Ф.А., Жарков Р.В., Рыбин А.В. 2018. Состояние вулкана Берутарубе в 2017 г. (о. Итуруп, Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 2(4): 386–391. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.386-391>
- Мархинин Е.К., Стратула Д.С. 1977. *Гидрометры Курильских островов*. М.: Наука, 212 с.
- Рассадина К.А. 1967. Новые и интересные виды и формы у *Nyropeltinia*. *Новости систематики низших растений*, 4: 289–300.
- Трасс Х.Х. 1979. Новые и интересные таксоны из семейства *Cladoniaceae* в лихенофлоре СССР. *Folia Cryptogamica Estonica*, 11: 1–8.
- Домбровская А. В. 1987. Род *Stereocaulon* на Дальнем Востоке. В кн.: *Ботанические исследования за Полярным кругом*. Л.: Наука, с. 47–65.
- Moberg R. 1995. The lichen genus *Phaeophyscia* in China and Russian Far East. *Nordic Journal of Botany*, 15(3): 319–335. <https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.1995.tb00158.x>
- Добрыш А.А. 1999. Новые и редкие виды рода *Rhizocarpon* (*Rhizocarpaceae*, Lichens) с островов Итуруп (Курильские острова) и Сахалин. *Ботанический журнал*, 84(7): 133–135.
- Joneson S., Kashiwadani H., Tschabannedko S., Gage S. 2004. *Ramalina* of the Kurile Islands. *The Bryologist*, 107(1): 98–106. [https://doi.org/10.1639/0007-2745\(2004\)107\[98:ROT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1639/0007-2745(2004)107[98:ROT]2.0.CO;2)
- Титов А.Н. 2006. *Микокалициевые грибы (порядок Mycocaliciales)* Голарктики. М.: КМК, 296 с.
- Ежкин А.К., Жарков Р.В., Кордюков А.В. 2015. Оценка воздействия геотермальной электростанции «Океанская» (вулкан Баранского, о-в Итуруп) на окружающую среду методом лихеноиндикации. *Вестник ДВО РАН*, 2: 109–117.
- 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>
- Богачева А.В., Булах Е.М., Бухарова Н.В., Галанина И.А., Егорова Л.Н., Ежкин А.К., Петруненко Е.А. 2018. *Микобиома дальневосточных дубняков*. Владивосток: Дальнаука, 232 с.
- Ezhkin A.K., Jørgensen P.M. 2018. New records of *Pannariaceae* (Lichenized Ascomycota) from Sakhalin and the Kuril Islands, Russian Far East. *Evansia*, 35(2): 43–52. <https://doi.org/10.1639/0747-9859-35.2.043>
- Galanina I.A., Ezhkin A.K. 2019. The genus *Rinodina* in the Kuril Islands (Russian Far East). *Turczaninowia*, 22(4): 5–16. <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.22.4.1>
- Толпышева Т.Ю., Варлыгина Т.И. 2021. К изучению лишайников о. Итуруп (Курильские острова). *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический*, 126(3): 20–24.
- Chesnokov S.V., Konoreva L.A. 2021. Addition to the lichen flora of Iturup Island (Sakhalin Region, Russian Far East). *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 55: 379–392. <https://doi.org/10.31111/nsnr/2021.55.2.379>
- Ежкин А.К. 2019. Лишайники древесных субстратов в местах проявления сольфатарной активности на Южных Курильских островах. *Геосистемы переходных зон*, 3(2): 256–263. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.256-263>
- Ежкин А.К. 2022. Напочвенные лишайники термальных местообитаний Южных Курильских островов. *Геосистемы переходных зон*, 6(4): 380–387. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.4.380-387>

20. Shimizu A. **2004**. Community structure of lichens in the volcanic highlands of Mt. Tokachi, Hokkaido, Japan. *Bryologist*, 107(2): 141–151. [https://doi.org/10.1639/0007-2745\(2004\)107\[0141:CSOLIT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1639/0007-2745(2004)107[0141:CSOLIT]2.0.CO;2)
21. Романюк Ф.А. **2024**. Вулканологические и геоэкологические исследования на о. Итуруп (Курильские острова) в 2023 году. *Геосистемы переходных зон*, 8(1): 56–63. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.1.056-063>
22. Степанчикова И.С., Гагарина Л.В. **2014**. Сбор, определение и хранение лихенологических коллекций. В кн.: *Флора лишайников России: Биология, экология, разнообразие, распространение и методы изучения лишайников*. Ред. М.П. Андреев, Д.Е. Гимельбрант. М.; СПб.: КМК, с. 204–219.
23. Ezhkin A.K., Schumm F. **2018**. New and noteworthy records of lichens and allied fungi from Sakhalin Island, Russian Far East, II. *Folia Cryptogamica Estonica*, 55: 45–50. <https://doi.org/10.12697/fce.2018.55.06>
24. Davydov E.A., Yakovchenko L., Konoreva L., Chesnokov S., Ezhkin A., Galanina I., Paukov A. **2021**. New records of lichens from the Russian Far East. II. Species from forest habitats. *Opuscula Philolichenum*, 20: 54–70. <https://doi.org/10.5962/p.388274>
9. Joneson S., Kashiwadani H., Tschabanenko S., Gage S. **2004**. *Ramalina* of the Kurile 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)
10. Titov A.N. **2006**. [*Mycocalicioid fungi (the order Mycocaliciales) of the Holarctic*]. Moscow: KMK Scientific Press, 296 p. (In Russ.).
11. Ezhkin A.K., Zharkov R.V., Kordyukov A.V. **2015**. [Assessment of the environmental impact of the Okeanskaya geothermal power plant (Baransky Volcano, Iturup Island) using the lichen indication method]. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 2: 109–117. (In Russ.).
12. 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., Spribile T. **2017**. The lichen genus *Rinodina* (*Physciaceae*, *Telochistales*) in Northeastern Asia. *The Lichenologist*, 49(6): 617–672. <https://doi.org/10.1017/S0024282917000536>
13. Bogacheva A.V., Bulakh E.M., Bukharova N.V., Galanina I.A., Egorova L.N., Ezhkin A.K., Petrunenko E.A. **2018**. [*Mycobiota of the Far Eastern oak forests*]. Vladivostok: Dal'nauka, 200 p. (In Russ.).
14. Ezhkin A.K., Jørgensen P.M. **2018**. New records of *Pannariaceae* (Lichenized Ascomycota) from Sakhalin and the Kuril Islands, Russian Far East. *Evansia*, 35(2): 43–52. <https://doi.org/10.1639/0747-9859-35.2.043>
15. Galanina I.A., Ezhkin A.K. **2019**. The genus *Rinodina* in the Kuril Islands (Russian Far East). *Turczaninowia*, 22(4): 5–16. <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.22.4.1>
16. Tolpysheva T.Yu., Varlygina T.I. **2021**. To study the lichens of Iturup Island (Kuril Islands). *Bulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody. Otdel biologicheskii*, 126(3): 20–24. (In Russ.).
17. Chesnokov S.V., Konoreva L.A. **2021**. Addition to the lichen flora of Iturup Island (Sakhalin Region, Russian Far East). *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 55: 379–392. <https://doi.org/10.31111/nsnr/2021.55.2.379>
18. Ezhkin A.K. **2019**. Lichens of wood substrates in areas of solfataric activity on Southern Kuriles. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(2): 256–263. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.256-263>
19. Ezhkin A.K. **2022**. Epigeic lichens in thermal habitats on the Southern Kuriles. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 6(4): 380–387. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.4.380-387>
20. Shimizu A. **2004**. Community structure of lichens in the volcanic highlands of Mt. Tokachi, Hokkaido, Japan. *Bryologist*, 107(2): 141–151. [https://doi.org/10.1639/0007-2745\(2004\)107\[0141:CSOLIT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1639/0007-2745(2004)107[0141:CSOLIT]2.0.CO;2)

References

1. Gorshkov G.S. **1967**. [*Volcanism of the Kuril Island arc*]. Moscow: Nauka, 287 p. (In Russ.).
2. Degterev A.V., Kozlov D.N., Romanyuk F.A., Zharkov R.V., Rybin A.V. **2018**. The state of Berutarube volcano in 2017 (Iturup Island, Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(4): 386–391. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.386-391>
3. Markhinin E.K., Stratula D.S. **1977**. [*Hydrotherms of the Kuril Islands*]. Moscow: Nauka, 212 p. (In Russ.).
4. Rassadina K.A. **1967**. [New and interesting species and forms of *Hypogymnia*]. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 4: 289–300. (In Russ.).
5. Trass H.H. **1979**. New and rare taxa of *Cladoniaceae* in the lichen-flora of the U.S.S.R. *Folia Cryptogamica Estonica*, 11: 1–8. (In Russ.).
6. Dombrovskaya A.V. **1987**. The genus *Stereocaulon* in the Far East. In: [*Botanical studies beyond the Arctic Circle*]. Leningrad, p. 47–65. (In Russ.).
7. Moberg R. **1995**. The lichen genus *Phaeophyscia* in China and Russian Far East. *Nordic Journal of Botany*, 15(3): 319–335. <https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.1995.tb00158.x>
8. Dobrysh A.A. **1999**. New and rare species of the genus *Rhizocarpon* (*Rhizocarpaceae*, Lichenes) from Iturup (Kuriles) and Sakhalin. *Botanicheskiy zhurnal*, 84(7): 133–135. (In Russ.).
9. Joneson S., Kashiwadani H., Tschabanenko S., Gage S. **2004**. *Ramalina* of the Kurile 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)
10. Titov A.N. **2006**. [*Mycocalicioid fungi (the order Mycocaliciales) of the Holarctic*]. Moscow: KMK Scientific Press, 296 p. (In Russ.).
11. Ezhkin A.K., Zharkov R.V., Kordyukov A.V. **2015**. [Assessment of the environmental impact of the Okeanskaya geothermal power plant (Baransky Volcano, Iturup Island) using the lichen indication method]. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 2: 109–117. (In Russ.).
12. 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., Spribile T. **2017**. The lichen genus *Rinodina* (*Physciaceae*, *Telochistales*) in Northeastern Asia. *The Lichenologist*, 49(6): 617–672. <https://doi.org/10.1017/S0024282917000536>
13. Bogacheva A.V., Bulakh E.M., Bukharova N.V., Galanina I.A., Egorova L.N., Ezhkin A.K., Petrunenko E.A. **2018**. [*Mycobiota of the Far Eastern oak forests*]. Vladivostok: Dal'nauka, 200 p. (In Russ.).
14. Ezhkin A.K., Jørgensen P.M. **2018**. New records of *Pannariaceae* (Lichenized Ascomycota) from Sakhalin and the Kuril Islands, Russian Far East. *Evansia*, 35(2): 43–52. <https://doi.org/10.1639/0747-9859-35.2.043>
15. Galanina I.A., Ezhkin A.K. **2019**. The genus *Rinodina* in the Kuril Islands (Russian Far East). *Turczaninowia*, 22(4): 5–16. <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.22.4.1>
16. Tolpysheva T.Yu., Varlygina T.I. **2021**. To study the lichens of Iturup Island (Kuril Islands). *Bulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody. Otdel biologicheskii*, 126(3): 20–24. (In Russ.).
17. Chesnokov S.V., Konoreva L.A. **2021**. Addition to the lichen flora of Iturup Island (Sakhalin Region, Russian Far East). *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 55: 379–392. <https://doi.org/10.31111/nsnr/2021.55.2.379>
18. Ezhkin A.K. **2019**. Lichens of wood substrates in areas of solfataric activity on Southern Kuriles. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(2): 256–263. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.256-263>
19. Ezhkin A.K. **2022**. Epigeic lichens in thermal habitats on the Southern Kuriles. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 6(4): 380–387. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.4.380-387>
20. Shimizu A. **2004**. Community structure of lichens in the volcanic highlands of Mt. Tokachi, Hokkaido, Japan. *Bryologist*, 107(2): 141–151. [https://doi.org/10.1639/0007-2745\(2004\)107\[0141:CSOLIT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1639/0007-2745(2004)107[0141:CSOLIT]2.0.CO;2)

21. Romanyuk F.A. **2024.** Volcanological and geoecological studies on Iturup Island (Kuril Islands) in 2023. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 8(1): 56–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.1.056-063>
22. Stepanchikova I.S., Gagarina L.V. **2014.** Collection, identification and storage of lichenological collections. In: M.P. Andreev, D.E. Himelbrant (Eds). *The lichen flora of Russia: biology, ecology, diversity, distribution and methods to study lichens*. Moscow; St. Petersburg: KMK Scientific Press, p. 204–219. (In Russ.).
23. Ezhkin A.K., Schumm F. **2018.** New and noteworthy records of lichens and allied fungi from Sakhalin Island, Russian Far East, II. *Folia Cryptogamica Estonica*, 55: 45–50. <https://doi.org/10.12697/fce.2018.55.06>
24. Davydov E.A., Yakovchenko L., Konoreva L., Cheshnikov S., Ezhkin A., Galanina I., Paukov A. **2021.** New records of lichens from the Russian Far East. II. Species from forest habitats. *Opuscula Philolichenum*, 20: 54–70. <https://doi.org/10.5962/p.388274>

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, Россия, ezhkin@yandex.ru

Романюк Федор Александрович (<https://orcid.org/0000-0003-1581-1503>), кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории и вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, f.romanuk@imgg.ru

Поступила 27.05.2024

Принята к публикации 12.09.2024

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 the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, ezhkin@yandex.ru

Romanuk, Fedor A. (<https://orcid.org/0000-0003-1581-1503>), Cand. Sci. (Biology), Junior Researcher of the Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, f.romanuk@imgg.ru

Received 27 May 2024

Accepted 12 September 2024

© Авторы, 2024 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2024.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 582.29:351.852.15

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.228-243>
<https://www.elibrary.ru/scbnro>

НАУЧНЫЕ КОЛЛЕКЦИИ

Гербарий лишайников Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (SAK): первые результаты инвентаризации

A. K. Ежкин®, B. B. Каганов

@E-mail: ezhkin@yandex.ru

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

Резюме. Формирование гербариев лишайников Института морской геологии и геофизики ДВО РАН было начато в 2014 г. после проведения ряда комплексных экспедиций по Сахалинской области. В основу гербариев положены коллекции А.К. Ежкина и В.В. Каганова. Значительный объем образцов лишайников был собран на территориях ООПТ, в труднодоступных удаленных районах, в местах проявления вулканической активности. На данный момент часть коллекции (1178 образцов, 307 видов) смонтирована и хранится в лаборатории экологии растений и геоэкологии. Это составляет примерно 1/8 часть всего гербарного материала лишайников, хранящегося в ИМГиГ ДВО РАН.

Ключевые слова: биологические коллекции, биоразнообразие, Дальний Восток России, Сахалин, Курильские острова

Lichen Herbarium of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS (SAK): preliminary results of the inventory

Aleksander K. Ezhkin®, Vladimir V. Kaganov

@E-mail: ezhkin@yandex.ru

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

Abstract. The organization of the lichen herbarium in the Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS was initiated in 2014 after a number of integrated expeditions in the Sakhalin Region. The herbarium is based on the collections of Aleksandr K. Ezhkin and Vladimir V. Kaganov. A significant amount of lichen samples was collected in protected areas of the Sakhalin Region, in wild remote sites, and in areas of volcanic activity. Currently, a part of the collection (1178 samples, 307 species) is mounted and stored in the Laboratory of plant ecology and geoecology, which is about 1/8 of all herbarium material of lichens stored in the Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS.

Keywords: biological collections, biodiversity, Russian Far East, Sakhalin, Kuril Islands

Для цитирования: Ежкин А.К., Каганов В.В. Гербарий лишайников Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (SAK): первые результаты инвентаризации. *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 3, с. 228–243. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.228-243>; <https://www.elibrary.ru/scbnro>

For citation: Ezhkin A.K., Kaganov V.V. Lichen Herbarium of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS (SAK): preliminary results of the inventory. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, No. 3, pp. 228–243. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.228-243>; <https://www.elibrary.ru/scbnro>

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Сахалинской области в форме субсидии молодым ученым на реализацию научно-исследовательского проекта (Постановление ПСО № 486 от 27.10.2022 г.), выданного Министерством цифрового и технологического развития Сахалинской области в 2023 г.

Funding

The study was carried out with the support of the Government of the Sakhalin Region in the form of a subsidy for young scientists for the implementation of a research project (Regulation No. 486 dated October 27, 2022) issued by the Ministry of Digital and Technological Development of the Sakhalin Region in 2023.

Формирование ботанических коллекций является важнейшим инструментом в изучении биоразнообразия территорий. Гербарные коллекции растений не имеют срока годности и, следовательно, могут быть использованы последующими поколениями неограниченно долго. Объем коллекций является важным показателем, характеризующим флористическую изученность территории.

На данный момент в Сахалинской области существуют два научных гербария – в Сахалинском ботаническом саду (акроним гербария – SAKH) и в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) (акроним гербария – SAK). Оба гербария включают коллекции образцов лишайников, собранных в основном с территории Сахалинской области.

Для понимания современного состояния исследований в регионе в конце статьи приведен список основных публикаций, характеризующих изученность лихенофлоры Сахалина и Курильских островов.

Первые сборы лишайников на Сахалине были выполнены в северной части острова русскими исследователями в начале XX в. – Фори в 1908 г., Синягиным в 1908–1909 гг. и Криштофовичем в 1927 г. [1]. На Курильских островах и южном Сахалине лихенологические исследования были впервые проведены японскими специалистами в 30-х годах XX в. [2, 3]. После освобождения Сахалина и Курильских островов от японской оккупации (1945 г.) исследования были возобновлены [4–12]. Наиболее полная сводка по лишайникам Сахалинской области была сделана научным сотрудником Сахалинского ботанического сада С.И. Чабаненко в 2002 г. в «Конспекте флоры лишайников юга российского Дальнего Востока», где были обобщены и дополнены оригинальными данными сведения по лишайникам – 322 вида для о. Сахалин и 260 видов для Курильских островов [13]. После этого был сделан ряд существенных дополнений – более 300 новых видов для Сахалинской области [14–54].

Формирование гербария лишайников ИМГиГ ДВО РАН было начато в 2014 г. после проведения ряда комплексных экспедиций

по Сахалину и Курильским островам. В основу гербария положены личные коллекции А.К. Ежкина и В.В. Каганова из сборов в Корсаковском, Невельском, Холмском, Долинском, Смирныховском, Углегорском, Поронайском, Тымовском, Ногликском, Курильском, Южно-Курильском и Северо-Курильском районах, а также в административном округе города Южно-Сахалинск. Большой вклад в пополнение коллекции лишайников с вулканических ландшафтов внес также научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканоопасности Ф.А. Романюк. Особое внимание при сборе лишайников удалено исследованию ООПТ – Курильского заповедника [34] и ряда других значимых для области памятников природы: «Вулкан Менделеева» [24], «Лагуноозерный реликтовый лес» [55], «Высокогорье горы Чехова» [56], «Стародубские дубняки» [21]. В рамках изучения старовозрастных и малонарушенных лесных сообществ были организованы экспедиции и полевые выезды в труднодоступные районы области с целью выявления рефугиумов и местообитаний редких и реликтовых видов лишайников [29, 31, 33, 35, 37, 43, 44]. По отдельным таксономическим группам лишайников (*Bacidia*, *Caloplaca*, *Heterodermia*, *Megalospora*, *Pannariaceae*, *Rinodina*, *Usnea* и другие) проведена критическая обработка, выявлены ранее не приведенные для региона лишайники, описаны новые для науки виды [19, 27, 28, 32, 38–41, 47, 48, 57, 58]. Значительный объем образцов лишайников был собран в местах проявления вулканической активности на Курильских островах. Детально были обследованы такие вулканы, как Менделеева и Головнина на о. Кунашир, Баранского и Берутарубе на о. Итуруп, Эбеко на о. Парамушир, Пик Сарычева на о. Матуя, Алайд на о. Атласова [36, 52, 59, 60].

В Приложении к данной статье приведены таблицы, отражающие количество смонтированных образцов и представленных видов, распределенных по родам, семействам и порядкам.

Среди наиболее интересных флористических находок, хранящихся в гербарии, стоит отметить следующие.

Изотипы, хранящиеся в гербарии

ИМГиГ ДВО РАН

- Bacidia obtecta* Gerasimova, A. Ezhkin & A. Beck (SAK 1368 – isotype) [40]
Bacidia kuriensis Gerasimova, A. Ezhkin & A. Beck (SAK 276 – isotype) [39]
Bacidia sachalinensis Gerasimova, A. Ezhkin & A. Beck sp. (SAK 145 – isotype) [39]

Редкие охраняемые виды

- Anzia japonica* Asahina (SAK 29, 644, 645) [43]
Cladonia graciliformis Zahlbr. (SAK 2532, 2533, 2534, 2535, 2536, 2537, 2546, 2547, 2548, 2549, 2550, 2559, 2561, 2564, 2573) [36]
Cladonia vulcani Savicz (SAK 2555, 2560, 2567, 2568) [36]
Coccocarpia erythroxyli (Spreng.) Swinscow & Krog (SAK 2139) [61]
Coccocarpia palmicola (Spreng.) Arv. et D. Gallawa (SAK 1718, 1719) [43]
Dolichousnea diffracta (Vain.) Articus (SAK 185, 1727) [43]
Hypogymnia fragillima (Hillm.) Rassad. (SAK 83) [43]
Hypogymnia hypotrypa (Nyl.) Rassad. (SAK 136, 137, 260, 499) [43]
Icmadophila japonica (Zahlbr.) Rambold et Hertel (SAK 2605)
Leptogium hildenbrandii (Garov.) Nyl. (SAK 37, 2737, 2758)
Lethariella togashii (Asahina) Krog (SAK 1720) [43]
Lobaria pulmonaria (L.) Hoffm. (SAK 9, 188, 189, 1433, 1434, 1435, 1436, 1437, 2677, 2690, 2713, 2714, 2717, 2718, 2740, 2757, 2759) [23, 34]
Lobaria retigera (Bory) Trevis. (SAK 1721, 1722, 1728) [43]
Menegazzia terebrata (Hoffm.) A. Massal. (SAK 1671, 1672)
Nephromopsis ornata (Müll. Arg.) Hue (SAK 79) [43]
Pannaria lurida (Mont.) Nyl. (SAK 82, 134)
Pyxine sorediata (Ach.) Mont. (SAK 568, 569, 570, 571) [29]
Sticta fuliginosa (Kremp.) Rndlne et A. Thell (SAK 1697, 1726) [43]
Sticta limbata (Sm.) Ach. (SAK 1723, 1724, 1725, 1729) [43]

Редкие неохранные виды

- Bacidia elongata* Gerasimova et A. Beck (SAK 2270, 2271) [44]
Bacidia schweinitzii (Fr.) A. Schneid. (SAK 285) [39]
Chaenotheca ferruginea (Turner ex Sm.) Mig. (SAK 2169) [61]
Collema japonicum (Müll. Arg.) Hue (SAK 109, 2130, 2131, 2132, 2133, 2134) [33, 61]
Diploschistes muscorum (Scop.) R. Sant (SAK 571) [33]
Eopyrenula intermedia Coppins (SAK 135) [33]
Fauriea orientochinensis S.Y. Kondr., X.Y. Wang & J.-S. Hur (SAK 1285) [33]
Fuscopannaria mediterranea (Tav.) P.M. Jørg. (SAK 2266, 1271) [58]
Fuscopannaria sorediata P.M. Jørg. (SAK 1272) [58]
Hafellia subnexa (Nyl.) Marbach (SAK 121) [33]
Heterodermia incana (Stirt.) D.D. Awasthi (SAK 127, 2137) [61]
Lobaria gyrophorica Yoshim. (SAK 619) [33]
Lobaria isidiosa (Müll. Arg.) Vain. (SAK 1717) [43]
Megalospora atrorubricans subsp. *sendaiensis* (Räsänen) Sipman (SAK 2144, 2145, 2137) [61]
Megalospora porphyritis (Tuck.) R.C. Harris (SAK 1653, 1661, 1662, 1663) [28]
Mycobilimbia carneoalbida (Müll. Arg.) S. Ekman et Printzen. (SAK 2276, 2278) [44]
Nipponoparmelia perpllicata S.Y. Kondr., Tschanb., Elix et Hur (SAK 108) [33]
Physconia subpulverulenta (Szatala) Poelt. (SAK 690, 702, 2269) [44]
Polyblastidium japonicum (M. Satô) Kalb (SAK 1637, 1295) [61]
Polyblastidium propaguliferum (Vain.) Kalb (SAK 1294, 1640, 1634, 1636, 1638, 1639) [61]
Ramalina thrausta (Ach.) Nyl. (SAK 1205, 1206, 1207) [18]
Rinodina megistospora Sheard et H. Mayrhofer (SAK 563) [38]
Rinodina ascociscana (Tuck.) Tuck. (SAK 1462) [38]
Umbilicaria deusta (L.) Baumg (SAK 1300) [60]
Umbilicaria proboscidea (L.) Schrad. (SAK 1297, 1299) [60]

В рамках сотрудничества и научного обмена образцами лишайников гербарий института пополняется образцами-дублями из гербариев Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН (г. Санкт-Петербург), Санкт-Петербургского государственного университета (г. Санкт-Петербург), Ботанического сада-института ДВО РАН (г. Владивосток), Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН (г. Владивосток).

Главной задачей гербария лишайников ИМГиГ ДВО РАН является накопление информации в виде коллекций гербарных образцов, отражающих систематическое и биологическое разнообразие лишайников Сахалина и Курильских островов, а также обеспечение надежного хранения образцов, их доступности для исследователей. Основными принципами формирования коллекции являются флористический и регионально-географический. Гербарий лишайников обеспечивает соблюдение верифицируемости (проверяемости) данных, что является одним из основных научных методических принципов при работе с коллекциями [62]. Любой исследователь, допущенный к работе с гербарными коллекциями лишайников, имеет право использовать в своих исследованиях данные, полученные им в ходе ревизии и обработки. Пользоваться коллекцией лишайников института могут научные сотрудники сторонних институтов, аспиранты и студенты, предварительно согласовав доступ с куратором гербария.

В настоящее время гербарная коллекция лишайников располагается в двух кабинетах лаборатории экологии растений и геоэкологии вместе с гербарием мохообразных [63]. В одном из кабинетов установлены гербарные шкафы, где в систематической последовательности хранятся образцы лишайников в специальных этикетированных конвертах. Каждому образцу присвоен уникальный гербарный номер, а его данные внесены в специальную электронную базу. Кроме того, в гербарных кабинетах хранятся расходные материалы, выделено одно рабочее место для пользователей, оборудованное микроскопом. Имеется своя библиотека с таксономической литературой по лишайникам и мохообразным, включая определители, справочники и атласы.

Цель проводимой инвентаризации гербария лишайников ИМГиГ ДВО РАН – упорядочивание образцов по общепринятой системе для быстрого доступа к ним и поиска нужного образца для работы, включая проверку соответствия информации этикетки на конверте (гербарном листе) образцу, замену нечитаемых конвертов на новые, приведение в порядок мест хранения образцов, подготовку электронной базы данных гербария, обновление информации под акронимом института SAK в основных внешних ресурсах по гербариям – Российском реестре Index Herbariorum Rossicum на сайте БИН РАН и международном реестре всех гербариев Index Herbariorum на сайте Нью-Йоркского Ботанического сада, а также постановку на баланс института образцов, прошедших инвентаризацию. Для первичной инвентаризации гербария лишайников был отобран опубликованный материал, который включал обработки некоторых родов (*Bacidia*, *Caloplaca*, *Fuscopannaria*, *Heterodermia*, *Pannaria*, *Rinodina*, *Usnea*) совместно со специалистами из других институтов, лишайников вулканических обитаний и некоторых ООПТ Сахалинской области, а также новых образцов, отобранных на Сахалине и Курильских островах (некоторые из видов представлены на рис. 1–3).

По результатам первичной инвентаризации гербарной коллекции лишайников смонтировано 1178 образцов (307 видов), относящихся к 129 родам, 51 семейству и 21 порядкам, что составляет примерно 1/8 часть всего разобранного гербарного материала.

По количеству видов лучше всех представлен род *Rinodina* – 25 видов, что составляет 8 % от общего количества видов в коллекции смонтированного материала, далее следует род *Cladonia* – 19 видов (6 %), *Lobaria* – 12 видов, *Parmelia* – 8 видов, *Hypogymnia*, *Physcia*, *Umbilicaria* и *Peltigera* по 7 видов. В семействах распределение следующее: *Physciaceae* – 59 видов (19 %), далее следует *Parmeliaceae* – 53 вида (17 %), *Cladoniaceae* – 19 видов, *Lobariaceae* и *Ramalinaceae* по 18 видов. В порядках по количеству видов доминируют *Lecanorales* – 109 видов (35 %), *Caliciales* – 68 видов (22 %) и *Peltigerales* – 53 вида (17 %) (см. Приложение, табл. 1–3).

Полное представление о составе инвентаризированной части гербария и количественном распределении в ней таксонов лишайников дают приведенные в Приложении таблицы.



Рис. 1. Лишайники вулканических местообитаний: *Umbilicaria hyperborea* (Ach.) Hoffm. с о. Парамушир; *Cladonia bellidiflora* (Ach.) Schaeer с о. Итуруп; *Cladonia vulcani* Savicz. с о. Кунашир. Сборы А.К. Ежкина.

Fig. 1. Lichens from volcanic habitats: *Umbilicaria hyperborea* (Ach.) Hoffm. from Paramushir Island; *Cladonia bellidiflora* (Ach.) Schaeer from Iturup Island; *Cladonia vulcani* Savicz. from Kunashir Island. Collections by Aleksander K. Ezhkin.



Рис. 2. Охраняемые виды лишайников: *Hypogymnia hypotrypa* (Nyl.) Rass. с юга о. Сахалин; *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. юга о. Сахалин; *Icmadophila japonica* (Zahlbr.) Rambold & Hertel. с о. Кунашир. Сборы А.К. Ежкина.

Fig. 2. Protected species of lichens: *Hypogymnia hypotrypa* (Nyl.) Rass. from the south of Sakhalin Island; *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. from the south of Sakhalin Island; *Icmadophila japonica* (Zahlbr.) Rambold & Hertel. from Kunashir Island. Collections by Aleksander K. Ezhkin.

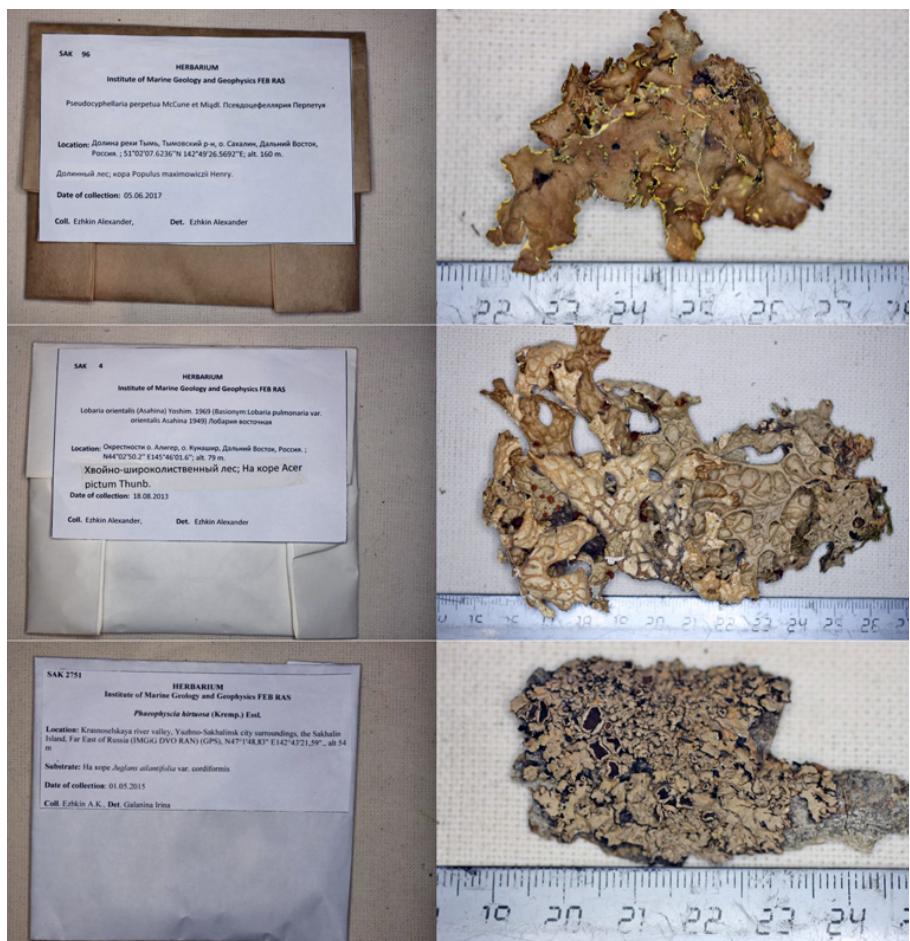


Рис. 3. Лишайники лесных местообитаний: *Pseudocyphellaria perpetua* McCune et Miadl. с юга о. Сахалин; *Lobaria orientalis* (Asahina) Yoshim. с о. Кунашир; *Phaeophyscia hirtuosa* (Kremp.) Essl. с юга о. Сахалин. Сборы А.К. Ежкина.

Fig. 3. Lichens from forest habitats: *Pseudocyphellaria perpetua* McCune et Miadl. from the south of Sakhalin Island; *Lobaria orientalis* (Asahina) Yoshim. from Kunashir Island; *Phaeophyscia hirtuosa* (Kremp.) Essl. from the south of Sakhalin Island. Collections by Aleksander K. Ezhkin.

Список публикаций по лихенофлоре Сахалинской области

1. Окснер А.М. 1948. Маловідомі й нові для СРСР лишайники. Ботанічний журнал АН УРСР, 5(2): 92–99.
2. Satô M. 1936. Notes on the lichen flora of Minami-Karahuto, or the Japanese Saghalien. Bull. of the Biogeographical Society of Japan, 6(11): 97–121.
3. Satô M. 1936. Notes on the lichen flora of Tisioma or the Kuriles. Shokubutusugaku Zasshi, 50: 610–617.
4. Рассадина К.А. 1967. Новые и интересные виды и формы у *Hypogymnia*. Новости систематики низших растений, 4: 289–300.
5. Ромс О.Г. 1967. Несколько порошкоплодных лишайников южной части о. Сахалин. Український ботанічний журнал, 24(1): 102–104.
6. Окснер А.Н., Блюм О.Б. 1971. К флоре лишайников советского Дальнего Востока. I. Сем. Peltigeraceae. Новости систематики низших растений, 8: 249–263.
7. Домбровская А.В. 1987. Род *Stereocaulon* на Дальнем Востоке. В кн.: Ботанические исследования за Полярным кругом. Апатиты: Наука, с. 47–65.
8. Инсаров Г.Э., Пчелкин А.В. 1984. Количественные характеристики состояния эпифитной лихенофлоры Курильского заповедника. М.: Гос. комитет СССР по гидрометеорологии АН СССР, 174 с.
9. Бредкина Л.И., Добрыш А.А., Макарова И.И., Титов А.Н. 1992. К флоре лишайников острова Кунashir (Курильские острова). Новости систематики низших растений, 28: 90–94.
10. Titov A., Tibell L. 1993. *Chaenothecopsis* in the Russian Far East. Nordic Journal of Botany, 13(3): 313–329. <https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.1993.tb00055.x>
11. Добрыш А.А. 1999. Новые и редкие виды рода *Rhizocarpon* (*Rhizocarpaceae*, Lichens) с островов Итуруп (Курильские острова) и Сахалин. Ботанический журнал, 84(7): 133–135.
12. Чабаненко С.И. 1999. Лишайники Курильского заповедника (остров Кунашир). В кн.: Исследование растительного покрова российского Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, с. 221–228. (Труды ботанических садов ДВО РАН; т. 1).
13. Чабаненко С.И. 2002. Конспект флоры лишайников юга российского Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 232 с.
14. Joneson S., Kashiwadani H., Tschabalenko S., Gage S. 2004. *Ramalina* of the Kurile 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)
15. Макрый Т.В., Таран А.А., Чабаненко С.И. 2010. *Collema complanatum* (Collemataceae) – новый вид для лихенофлоры России. Ботанический журнал, 95(7): 989–991.

16. Davydov E.A., Tchabanenko S.I., Makryi T.V., Khanin V.A. **2011**. The second confirmed record of *Umbilicaria pulvinaria* (Lichenized Ascomycota) since its original description in 1914. *Turczaninowia*, 14(2): 119–122.
17. Davydov E.A., Yakovchenko L.S., Urbanavichene I., Konoreva L., Chesnokov S., Kharpukhayeva T., Obermayer W. **2020**. *Umbilicaria orientalis* – a new species of *Umbilicaria* subg. *papillophora* with an East Asian distribution: morphological delimitation and molecular evidence. *The Lichenologist*, 52(5): 353–364. <https://doi.org/10.1017/S0024282920000389>
18. Davydov E.A., Yakovchenko L., Konoreva L., Chesnokov S., Ezhkin A., Galanina I., Paukov A. **2021**. New records of lichens from the Russian Far East. II. Species from forest habitats. *Opuscula Philolichenum*, 20: 54–70.
19. Галанина И.А. **2013**. Лишайники пихтово-елового и лиственничного лесов с подлеском из бамбука курильского на юге острова Сахалин. *Вестник СВНЦ ДВО РАН*, 2(34): 86–94.
20. Kondratyuk S., Löök L., Zarei-Darki B., Haji Moniri M., Tchabanenko S., Galanina I., Yakovchenko L., Ezhkin A., Hur J. **2013**. Five new *Caloplaca* species (*Teloschistaceae*, Ascomycota) from Asia. *Acta Botanica Hungarica*, 55(1–2): 41–60. <https://doi.org/10.1556/ABot.55.2013.1-2.4>
21. Ежкин А.К. **2016**. Лишайники памятника природы «Стародубские дубняки» на острове Сахалин. *Вестник Сахалинского музея*, 1(23): 248–253.
22. Ежкин А.К., Галанина И.А. **2014**. Дополнение к лихенофлоре острова Сахалин. *Новости систематики низших растений*, 48: 233–248.
23. Ежкин А.К., Галанина И.А. **2016**. Эпифитные лишайники лиственных деревьев города Южно-Сахалинск и особенности их распределения по степени чувствительности к антропогенному воздействию. *Вестник СВНЦ ДВО РАН*, 4: 95–107.
24. Ежкин А.К., Кордюков А.В. **2016**. Особенности изменения параметров эпифитного лишайникового покрова в окрестностях вулкана Менделеева (о-в Кунашир, Южные Курилы). *Бюл. Ботанического сада-института*, 15: 23–25.
25. Скирина И.Ф., Салохин А.В., Царенко Н.А., Скирин Ф.В. **2016**. Новые местонахождения редких и охраняемых лишайников острова Сахалин. *Turczaninowia*, 19(2): 54–63. <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.19.2.6>
26. 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*, *Caliciales*) in north-eastern Asia. *The Lichenologist*, 49(6): 617–672. <https://doi.org/10.1017/S0024282917000536>
27. Zhurbenko M.P., Ezhkin A.K., Skirina I.F., Ohmura Y. **2017**. *Dactylospora anziae*, a new lichenicolous ascomycete on *Anzia* from East Asia. *Folia Cryptogamica Estonica*, 54: 13–16. <https://doi.org/10.12697/fce.2017.54.03>
28. Ezhkin A.K. **2018**. *Megalospora porphyritis* (Tuck.) RC Harris, a new record for Russia. *Botanica Pacifica*, 7(2): 143–145. <https://doi.org/10.17581/bp.2018.07208>
29. Konoreva L.A., Tchabanenko S.I., Ezhkin A.K., Schumm F., Chesnokov S.V. **2018**. New and noteworthy lichen and allied fungi records from Sakhalin Island, Far East of Russia. *Herzogia*, 31(1): 276–292. <https://doi.org/10.13158/099.031.0123>
30. Konoreva L., Chesnokov S., Yakovchenko L., Ohmura Y., Davydov E.A. **2020**. New records to the lichen biota of Russia. I – Sakhalin Region, with new records for the Russian Far East and the Asian part of Russia. *Botanica Pacifica*, 9(2): 161–173. <https://doi.org/10.17581/bp.2020.09203>
31. Кордюков А.В., Ежкин А.К. **2018**. Широколиственные рощи бассейна р. Арканзас (о. Сахалин). *Проблемы региональной экологии*, 2: 56–59. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-12056>
32. Ezhkin A.K., Jørgensen P.M. **2018**. New records of *Pannariaceae* (Lichenized Ascomycota) from Sakhalin and the Kuril Islands, Russian Far East. *Evansia*, 35(2): 43–52. <https://doi.org/10.1639/0747-9859-35.2.043>
33. Ezhkin A.K., Schumm F. **2018**. New and noteworthy records of lichens and allied fungi from Sakhalin Island, Russian Far East, II. *Folia Cryptogamica Estonica*, 55: 45–50. <https://doi.org/10.12697/fce.2018.55.06>
34. Ежкин А.К. **2019**. Дополнение к лихенофлоре заповедника «Курильский» (о-в Кунашир). *Бюл. Ботанического сада-института ДВО РАН*, 22: 36–43. <https://doi.org/10.17581/bbgi2204>
35. Ежкин А.К. **2022**. Лишайники реликтовых лиственничников о. Шикотан (Курильские острова). *Вестник Сахалинского музея*, 4(41): 20–29.
36. Ежкин А.К. **2022**. Напочвенные лишайники термальных местообитаний Южных Курильских островов. *Геосистемы переходных зон*, 6(4): 380–387. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.4.380-387>
37. Ежкин А.К. **2023**. Дополнение к флоре лишайников острова Шикотан (Южные Курилы). *Вестник СВНЦ ДВО РАН*, 2: 65–75. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2023-2-65-75>
38. Galanina I.A., Ezhkin A.K. **2019**. The genus *Rinodina* in the Kuril Islands (Russian Far East). *Turczaninowia*, 22(4): 5–16. <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.22.4.1>
39. Gerasimova J.V., Ezhkin A.K., Beck A. **2018**. Four new species of *Bacidia* s.s. (*Ramalinaceae*, *Lecanorales*) in the Russian Far East. *The Lichenologist*, 50: 603–625. <https://doi.org/10.1017/S0024282918000397>
40. Gerasimova J.V., Ezhkin A.K., Davydov E.A., Beck A. **2021**. Multilocus-phylogeny of the lichen-forming genus *Bacidia* s. str. (*Ramalinaceae*, *Lecanorales*) with special emphasis on the Russian Far East. *The Lichenologist*, 53(6): 441–455. <https://doi.org/10.1017/S0024282921000396>
41. Гагарина Л.В., Ежкин А.К. **2020**. To the study of the lichen genus *Usnea* (*Parmeliaceae*) in Kunashir Island (Sakhalin Region, Russia). *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 54: 467–478. <https://doi.org/10.31111/nsnr/2020.54.2.467>

42. Tchabanenko S.I., Konoreva L.A., Chesnokov S.V. **2018.** Lichens collected in the Sakhalin Botanical Garden: New records to Russia, the Russian Far East and Sakhalin Island. *Botanica Pacifica*, 7: 71–79. <https://doi.org/10.17581/bp.2018.07111>
43. Каганов В.В., Ежкин А.К. **2019.** Новые местонахождения редких и охраняемых лишайников с острова Сахалин. *Бюл. Ботанического сада-института ДВО РАН*, 21: 1–8. <https://doi.org/10.17581/bbgi2101>
44. Каганов В.В., Ежкин А.К. **2023.** Дополнение к флоре лишайников острова Сахалин. *Ботанический журнал*, 108(12): 1128–1134. <https://doi.org/10.31857/S0006813623120050>
45. Popov E.S., Chesnokov S.V., Konoreva L.A., Ezhkin A.K., Stepanchikova I.S., Kuznetsova E.S., Himelbrant D.E., Galanina I.A., Tchabanenko S.I. **2020.** *Stictis* s.l. (Ostropales, Ascomycota) in the Russian Far East. *Botanica Pacifica*, 9(2): 95–102. <https://doi.org/10.17581/bp.2020.09201>
46. Yakovchenko L., Davydov E.A., Paukov A., Konoreva L., Chesnokov S., Ohmura Y. **2020.** New records of arcticalpine lichens from the Russian Far East. *Herzogia*, 33(2): 455–472. <https://doi.org/10.13158/heia.33.2.2020.455>
47. Galanina I.A., Ezhkin A.K., Ohmura Y. **2021.** The genus *Rinodina* (*Physciaceae*, Lichenized Ascomycota) of the Sakhalin Island (Russian Far East). *Botanicheskii Zhurnal*, 106(2): 147–165. <https://doi.org/10.31857/S0006813621020034>
48. Frolov I.V., Prokophiev I.A., Yakovchenko L.S., Galanina I.A., Ezhkin A.K. **2022.** *Coppiniella extremiorientalis* (*Teloschistaceae*, lichenized Ascomycota), a new species from the Russian Far East and a new genus to the region. *Phytotaxa*, 549(2): 219–229. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.549.2.7>
49. Толпышева Т.Ю., Варлыгина, Т.И. **2021.** К изучению лишайников о. Итуруп (Курильские острова). *Бюл. Московского общества испытателей природы. Отдел биологический*, 126(3): 20–24.
50. Chesnokov S.V., Konoreva L.A. **2021.** Addition to the lichen flora of Iturup Island (Sakhalin Region, Russian Far East). *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 55: 379–392. <https://doi.org/10.31111/nsnr/2021.55.2.379>
51. Chesnokov S.V., Konoreva L.A. **2022.** Checklist of lichens of Shikotan Island (Southern Kuril Islands, Russian Far East). *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 56: 413–440. <https://doi.org/10.31111/nsnr/2022.56.2.413>
52. Ezhkin A.K., Galanina I.A., Romanyuk F.A. **2023.** First data on lichens from Matua Island, Far East of Russia. Families *Physciaceae* and *Caliciaceae*. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 7(2): 206–211. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.2.206-211>
53. Chesnokov S.V., Pan'kova V.V., Konoreva L.A. **2023.** *Fissurina inabensis* (*Graphidaceae*, Ascomycota), a new record to Russia from Shikotan Island. *Turczaninowia*, 26 1: 116–123. <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.26.1.12> <http://turczaninowia.asu.ru>
54. Glazkova E.A., Konoreva L.A., Chesnokov S.V. **2023.** To study of the lichen biota of Chirpoi Island (Sakhalin Region, Kuril Islands). *Bull. of Botanical Garden Institute FEB RAS*, (30): 1–9. <https://doi.org/10.17581/bbgi3001>
55. Ежкин А.К. **2020.** Лишайники памятника природы «Лагуноозерный реликтовый лес» (остров Кунашир). *Биота и среда заповедных территорий*, 2: 38–48. <https://doi.org/10.25808/26186764.2020.71.46.002>
56. Ежкин А.К. **2020.** Лишайники памятника природы «Высокогорья горы Чехова» (остров Сахалин). *Биота и среда заповедных территорий*, 4: 25–38. <https://doi.org/10.25808/26186764.2020.97.66.002>
57. Galanina I.A., Ezhkin A.K., Yakovchenko L.S. **2018.** *Rinodina megistospora* (*Physciaceae*) in the Russian Far East. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 52(1): 133–139. <https://doi.org/10.31111/nsnr/2018.52.1.133>
58. Ezhkin A.K., Davydov E.A. **2024.** *Fuscopannaria mediterranea* and *F. sorediata* (*Pannariaceae*, lichenized Ascomycota), new records for the Far East of Russia. *Botanica Pacifica*, 13(1): 1–5. <https://doi.org/10.17581/bp.2024.13107>
59. Ежкин А.К. **2019.** Лишайники древесных субстратов в местах проявления сольфатарной активности на Южных Курильских островах. *Геосистемы переходных зон*, 3(2): 256–263. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.256-263>
60. Ежкин А.К., Давыдов Е.А. **2021.** Новые данные о лишайниках рода *Umbilicaria* Hoffm. с островов Парамушир и Сахалин. *Вестник СВНЦ ДВО РАН*, 1: 75–80. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2021-1-75-80>
61. Ежкин А.К. **2023.** Дополнение к флоре лишайников острова Шикотан (Южные Курилы). *Вестник СВНЦ ДВО РАН*, 2: 65–75. DOI: 10.34078/1814-0998-2023-2-65-75
62. Степанчикова И.С., Гагарина Л.В. **2014.** Сбор, определение и хранение лихенологических коллекций. В кн.: *Флора лишайников России: Биология, экология, разнообразие, распространение и методы изучения лишайников*. М.; СПб.: КМК, с. 204–219.
63. Коротеева Т.И. **2016.** Гербарий мохообразных в ИМГИГ ДВО РАН. *Бюл. Ботанического сада-института ДВО РАН*, 15: 41–42.

List of publications on the lichen flora of the Sakhalin Region

- Oxner A.N. **1948.** [Little-known and new lichens for USSR]. *Botanicheskii zhurnal of NA USSR*, 5(2): 92–99. (In Ukr.).
- Satô M. **1936.** Notes on the lichen flora of Minami-Karahuto, or the Japanese Saghalien. *Bull. of the Biogeographical Society of Japan*, 6(11): 97–121.
- Satô M. **1936.** Notes on the lichen flora of Tisioma or the Kuriles. *Shokubutusugaku Zasshi*, 50: 610–617.
- Rassadina K.A. **1967.** [New and interesting species and forms of the genus *Hypogymnia*]. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 4: 289–300. (In Russ.).

5. Roms O.G. 1967. [Few powdered lichens of the southern part of Sakhalin Island]. *Ukraïns'kii botanichnii zhurnal*, 24(1): 102–104. (In Russ.).
6. Oxner A.N., Blyum O.B. 1971. [To lichen flora of the Soviet Far East. I. Family *Peltigeraceae*]. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 8: 249–263. (In Russ.).
7. Dombrovskaya A.V. 1987. [The genus *Stereocaulon* in the Russian Far East]. In: *Botanicheskie issledovaniya za Polyarnym krugom*. Apatity: Nauka, p. 47–65. (In Russ.).
8. Insarov G.E., Pchelkin A.V. 1988. [Quantitative characteristics of the state of the epiphytic lichen flora of the "Kurilskiy" Reserve]. Moscow: Gos. komitet SSSR po gidrometeorologii AN SSSR, 174 p. (In Russ.).
9. Bredkina L.I., Dobrysh A.A., Makarova I.I., Titov A.N. 1992. [To flora of lichens of Kunashir Island (Kuril Islands)]. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 28: 90–94. (In Russ.).
10. Titov A., Tibell L. 1993. *Chaenothecopsis* in the Russian Far East. *Nordic Journal Botany*, 13: 313–329. <https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.1993.tb00055.x>
11. Dobrysh A.A. 1999. [New and rare species of the genus *Rhizocarpon* (*Rhizocarpaceae*, Lichens) from Iturup Island (Kuril Islands) and Sakhalin Island]. *Botanicheskii zhurnal = Botanical Journal*, 84(7): 133–135. (In Russ.).
12. Tchabanenko S.I. 1999. [Lichens of the "Kurilskiy" Reserve (Kunashir Island)]. In: [Study of the vegetation cover of the Russian Far East]. Vladivostok: Dal'nauka, p. 221–228. (*Trudy botanicheskikh sadov DVO RAN*; vol. 1). (In Russ.).
13. Tchabanenko S.I. 2002. [Summary of lichen flora of the south of the Russian Far East]. Vladivostok: Dal'nauka, 232 p. (In Russ.).
14. Joneson S., Kashiwadani H., Tschabanenko S., Gage S. 2004. *Ramalina* of the Kurile 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)
15. Makryi T.V., Taran A.A., Tchabanenko S.I. 2010. *Collema complanatum* (*Collemataceae*) – a new species for lichen flora of Russia. *Botanicheskii zhurnal = Botanical Journal*, 95(7): 989–991. (In Russ.).
16. Davydov E.A., Tchabanenko S.I., Makryi T.V., Khanin V.A. 2011. The second confirmed record of *Umbilicaria pulvinaria* (Lichenized Ascomycota) since its original description in 1914. *Turczaninowia*, 14(2): 119–122.
17. Davydov E.A., Yakovchenko L.S., Urbanavichene I., Konoreva L., Chesnokov S., Kharpukhayeva T., Obermayer W. 2020. *Umbilicaria orientalis* – a new species of *Umbilicaria* subg. *papillophora* with an East Asian distribution: morphological delimitation and molecular evidence. *The Lichenologist*, 52(5): 353–364. <https://doi.org/10.1017/S0024282920000389>
18. Davydov E.A., Yakovchenko L., Konoreva L., Chesnokov S., Ezhkin A., Galanina I., Paukov A. 2021. New records of lichens from the Russian Far East. II. Species from forest habitats. *Opuscula Philolichenum*, 20: 54–70.
19. Galanina I.A. 2013. Lichens of fir-spruce and larch forests with the kuril bamboo understory in the south of Sakhalin Island. *Bull. of the North-East Scientific Center FEB RAS*, 2(34): 86–94. (In Russ.).
20. Kondratyuk S., Lökös L., Zarei-Darki B., Haji Moniri M., Tchabanenko S., Galanina I., Yakovchenko L., Ezhkin A., Hur J. 2013. Five new *Caloplaca* species (*Teloschistaceae*, Ascomycota) from Asia. *Acta Botanica Hungarica*, 55(1–2): 41–60. <https://doi.org/10.1556/ABot.55.2013.1-2.4>
21. Ezhkin A.K. 2016. [Lichens of the Natural Reserve "Starodubskie dubnyaki" on Sakhalin Island]. *Bulletin of Sakhalin Museum*, 1(23): 248–253. (In Russ.).
22. Ezhkin A.K., Galanina I.A. 2014. Additions to the lichen biota of the Sakhalin Island. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 48: 233–248. (In Russ.).
23. 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. *Bull. of the North-East Scientific Center FEB RAS*, 4: 95–107. (In Russ.).
24. Ezhkin A.K., Kordyukov A.V. 2016. Peculiarities of epiphytic lichen cover parameters change in surrounding of the Mendeleev Volcano, the Kunashir Island. *Bull. of Botanical Garden Institute FEB RAS*, 15: 23–25. (In Russ.).
25. Skirina I.F., Salokhin A.V., Tsarenko N.A., Skirin F.V. 2016. New locations of protected lichens of Sakhalin Island. *Turczaninowia*, 19(2): 54–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.19.2.6>
26. 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*, *Caliciales*) in north-eastern Asia. *The Lichenologist*, 49(6): 617–672. <https://doi.org/10.1017/S0024282917000536>
27. Zhurbenko M.P., Ezhkin A.K., Skirina I.F., Ohmura Y. 2017. *Dactylospora anziae*, a new lichenicolous ascomycete on *Anzia* from East Asia. *Folia Cryptogamica Estonica*, 54: 13–16. <https://doi.org/10.12697/fce.2017.54.03>
28. Ezhkin A.K. 2018. *Megalospora porphyritis* (Tuck.) RC Harris, a new record for Russia. *Botanica Pacifica*, 7(2): 143–145. <https://doi.org/10.17581/bp.2018.07208>
29. Konoreva L.A., Tchabanenko S.I., Ezhkin A.K., Schumm F., Chesnokov S.V. 2018. New and noteworthy lichen and allied fungi records from Sakhalin Island, Far East of Russia. *Herzogia*, 31(1): 276–292. <https://doi.org/10.13158/099.031.0123>
30. Konoreva L., Chesnokov S., Yakovchenko L., Ohmura Y., Davydov E.A. 2020. New records to the lichen biota of Russia. 1 – Sakhalin Region, with new records for the Russian Far East and the Asian part of Russia. *Botanica Pacifica*, 9(2): 161–173. <https://doi.org/10.17581/bp.2020.09203>
31. Kordyukov A.V., Ezhkin A.K. 2018. The broadleaf forests of the Arkansas river basin (Sakhalin). *Problems of Regional Ecology*, 2: 56–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-12056>
32. Ezhkin A.K., Jørgensen P.M. 2018. New records of *Pannariaceae* (Lichenized Ascomycota) from Sakhalin and the Kuril Islands, Russian Far East. *Evansia*, 35(2): 43–52. <https://doi.org/10.1639/0747-9859-35.2.043>

33. Ezhkin A.K., Schumm F. **2018.** New and noteworthy records of lichens and allied fungi from Sakhalin Island, Russian Far East, II. *Folia Cryptogamica Estonica*, 55: 45–50. <https://doi.org/10.12697/fce.2018.55.06>
34. Ezhkin A.K. **2019.** Addition to lichen biota of the “Kurilskiy” Reserve (Kunashir Island). *Bull. of Botanical Garden Institute FEB RAS*, 22: 36–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.17581/bbgi2204>
35. Ezhkin A.K. **2022.** Lichens of relic larch forests on Shikotan Island (Kurile Islands). *Bulletin of Sakhalin Museum*, 4(41): 20–29. (In Russ.).
36. Ezhkin A.K. **2022.** Epigaeic lichens in thermal habitats on the Southern Kuriles. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 6(4): 380–387. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.4.380-387>
37. Ezhkin A.K. **2023.** Addition to the lichen flora of Shikotan Island (Southern Kurils). *Bulletin of the North-East Scientific Center FEB RAS*, 2: 65–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2023-2-65-75>
38. Galanina I.A., Ezhkin A.K. **2019.** The genus *Rinodina* in the Kuril Islands (Russian Far East). *Turczaninowia*, 22(4): 5–16. <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.22.4.1>
39. Gerasimova J.V., Ezhkin A.K., Beck A. **2018.** Four new species of *Bacidia* s.s. (*Ramalinaceae*, *Lecanorales*) in the Russian Far East. *The Lichenologist*, 50: 603–625. <https://doi.org/10.1017/S0024282918000397>
40. Gerasimova J.V., Ezhkin A.K., Davydov E.A., Beck A. **2021.** Multilocus-phylogeny of the lichen-forming genus *Bacidia* s. str. (*Ramalinaceae*, *Lecanorales*) with special emphasis on the Russian Far East. *The Lichenologist*, 53(6): 441–455. <https://doi.org/10.1017/S0024282921000396>
41. Gagarina L.V., Ezhkin A.K. **2020.** To the study of the lichen genus *Usnea* (*Parmeliaceae*) in Kunashir Island (Sakhalin Region, Russia). *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 54: 467–478. <https://doi.org/10.31111/nsnr/2020.54.2.467>
42. Tchabanenko S.I., Konoreva L.A., Chesnokov S.V. **2018.** Lichens collected in the Sakhalin Botanical Garden: New records to Russia, the Russian Far East and Sakhalin Island. *Botanica Pacifica*, 7: 71–79. <https://doi.org/10.17581/bp.2018.07111>
43. Kaganov V.V., Ezhkin A.K. **2019.** New habitats of protected species of lichens found on the Sakhalin Island. *Bull. of Botanical Garden Institute FEB RAS*, 21: 1–8. (In Russ.). <https://doi.org/10.17581/bbgi2101>
44. Kaganov V.V., Ezhkin A.K. **2023.** Addition to the lichen flora of Sakhalin Island. *Botanicheskii Zhurnal = Botanical Journal*, 108(12): 1128–1134. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0006813623120050>
45. Popov E.S., Chesnokov S.V., Konoreva L.A., Ezhkin A.K., Stepanchikova I.S., Kuznetsova E.S., Himelbrant D.E., Galanina I.A., Tchabanenko S.I. **2020.** *Stictis* s.l. (*Ostropales*, *Ascomycota*) in the Russian Far East. *Botanica Pacifica*, 9(2): 95–102. <https://doi.org/10.17581/bp.2020.09201>
46. Yakovchenko L., Davydov E.A., Paukov A., Konoreva L., Chesnokov S., Ohmura Y. **2020.** New records of arcticalpine lichens from the Russian Far East. *Herzogia*, 33(2): 455–472. <https://doi.org/10.13158/heia.33.2.2020.455>
47. Galanina I.A., Ezhkin A.K., Ohmura Y. **2021.** The genus *Rinodina* (*Physciaceae*, *Lichenized Ascomycota*) of the Sakhalin Island (Russian Far East). *Botanicheskii Zhurnal*, 106(2): 147–165. <https://doi.org/10.31857/S0006813621020034>
48. Frolov I.V., Prokophiev I.A., Yakovchenko L.S., Galanina I.A., Ezhkin A.K. **2022.** *Coppinsiella extremitorientalis* (*Teloschistaceae*, lichenized *Ascomycota*), a new species from the Russian Far East and a new genus to the region. *Phytotaxa*, 549(2): 219–229. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.549.2.7>
49. Tolpysheva T.Yu., Varlygina T.I. **2021.** To study the lichens of Iturup Island (Kuril Islands). *Bull. of Moscow Society of Naturalists. Biological series*, 126(3): 20–24. (In Russ.).
50. Chesnokov S.V., Konoreva L.A. **2021.** Addition to the lichen flora of Iturup Island (Sakhalin Region, Russian Far East). *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 55: 379–392. <https://doi.org/10.31111/nsnr/2021.55.2.379>
51. Chesnokov S.V., Konoreva L.A. **2022.** Checklist of lichens of Shikotan Island (Southern Kuril Islands, Russian Far East). *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 56: 413–440. <https://doi.org/10.31111/nsnr/2022.56.2.413>
52. Ezhkin A.K., Galanina I.A., Romanyuk F.A. **2023.** First data on lichens from Matua Island, Far East of Russia. Families *Physciaceae* and *Caliciaceae*. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 7(2): 206–211. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.2.206-211>
53. Chesnokov S.V., Pan'kova V.V., Konoreva L.A. **2023.** *Fissurina inabensis* (*Graphidaceae*, *Ascomycota*), a new record to Russia from Shikotan Island. *Turczaninowia*, 26(1): 116–123. <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.26.1.12>
54. Glazkova E.A., Konoreva L.A., Chesnokov S.V. **2023.** To study of the lichen biota of Chirpoi Island (Sakhalin Region, Kuril Islands). *Bull. of Botanical Garden Institute FEB RAS*, 30: 1–9. <https://doi.org/10.17581/bbgi3001>
55. Ezhkin A.K. **2020.** Lichens of the “Lagunoozernyy Relict Forest” Protected area on Kunashir Island. *Biodiversity and Environment of Protected Areas*, 2: 38–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.25808/26186764.2020.71.46.002>
56. Ezhkin A.K. **2020.** Lichens of the natural monument “Highlands of Chekhov Mountain”, Sakhalin Island. *Biodiversity and Environment of Protected Areas*, 4: 25–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.25808/26186764.2020.97.66.002>
57. Galanina I.A., Ezhkin A.K., Yakovchenko L.S. **2018.** *Rinodina megistospora* (*Physciaceae*) in the Russian Far East. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*, 52(1): 133–139. <https://doi.org/10.31111/nsnr/2018.52.1.133>
58. Ezhkin A.K., Davydov E.A. **2024.** *Fuscopannaria mediterranea* and *F. sorediata* (*Pannariaceae*, lichenized *Ascomycota*), new records for the Far East

- of Russia. *Botanica Pacifica*, 13(1): 1–5. <https://doi.org/10.17581/bp.2024.13107>
59. Ezhkin A.K. **2019**. Lichens of wood substrates in areas of solfataric activity on Southern Kuriles. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(2): 256–263. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.256-263>
60. Ezhkin A.K., Davydov E.A. **2021**. New records of lichens of the genus *Umbilicaria* Hoffm. from Paramushir and Sakhalin Islands. *Bulletin of the North-East Scientific Center FEB RAS*, 1: 75–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2021-1-75-80>
61. Ezhkin A.K. **2023**. Addition to lichen flora of Shikotan Island (the Southern Kurils). *Bulletin of the North-East Scientific Center FEB RAS*, 2: 65–75. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2023-2-65-75>
62. Stepanchikova I.S., Gagarina L.V. **2014**. Taking up, identifying and storing lichenological collections. In: *Russia's lichen flora: biology, ecology, diversity, distribution, and methods of studying lichens*. Moscow; St. Petersburg: KMK Scientific Press, 204–219. (In Russ.).
63. Koroteeva T.I. **2016**. Bryophyte herbarium in Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS. *Bull. of Botanical Garden Institute FEB RAS*, 15: 41–42.

ПРИЛОЖЕНИЕ / APPENDIX

Таблица 1. Количество смонтированных образцов (% от общего количества смонтированных) и видов (% от количества представленных в инвентаризованной части гербария), распределенных по родам

Table 1. Number of mounted samples (percent of mounted samples) and submitted species (percent of species represented in the inventoried part of the herbarium) distributed by genera

Род Genus	Количество образцов Number of samples	Количество видов Number of species
1 <i>Acrocordia</i>	7 (0.59)	2 (0.65)
2 <i>Alectoria</i>	3 (0.25)	1 (0.33)
3 <i>Alyxoria</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
4 <i>Amandinea</i>	4 (0.34)	1 (0.33)
5 <i>Anzia</i>	33 (2.80)	3 (0.98)
6 <i>Arctoparmelia</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
7 <i>Arthonia</i>	2 (0.17)	2 (0.65)
8 <i>Arthothelium</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
9 <i>Bacidia</i>	27 (2.29)	6 (1.95)
10 <i>Bactrospora</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
11 <i>Biatora</i>	2 (0.17)	2 (0.65)
12 <i>Bilimbia</i>	5 (0.42)	1 (0.33)
13 <i>Brigantiaeaa</i>	3 (0.25)	2 (0.65)
14 <i>Bryobilimbia</i>	4 (0.34)	1 (0.33)
15 <i>Bryocaulon</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
16 <i>Bryoria</i>	23 (1.95)	2 (0.65)
17 <i>Buellia</i>	7 (0.59)	4 (1.30)
18 <i>Calicium</i>	6 (0.51)	2 (0.65)
19 <i>Caloplaca</i>	9 (0.76)	3 (0.98)
20 <i>Calvitimela</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
21 <i>Candelaria</i>	4 (0.34)	1 (0.33)
22 <i>Cetraria</i>	3 (0.25)	2 (0.65)
23 <i>Chaenotheca</i>	5 (0.42)	3 (0.98)
24 <i>Chrysotrichix</i>	1 (0.08)	1 (0.33)

Род	Количество образцов	Количество видов
25 <i>Cladonia</i>	68 (5.77)	19 (6.19)
26 <i>Cliostomum</i>	1 (0.08)	2 (0.65)
27 <i>Coccocarpia</i>	3 (0.25)	2 (0.65)
28 <i>Coenogonium</i>	1 (0.08)	2 (0.65)
29 <i>Collema</i>	30 (2.55)	5 (1.63)
30 <i>Coppiniella</i>	6 (0.51)	1 (0.33)
31 <i>Dendriscosticta</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
32 <i>Diploschistes</i>	3 (0.25)	1 (0.33)
33 <i>Dolichousnea</i>	5 (0.42)	2 (0.65)
34 <i>Eopyrenula</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
35 <i>Evernia</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
36 <i>Fauriea</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
37 <i>Flavoparmelia</i>	3 (0.25)	1 (0.33)
38 <i>Flavopunctelia</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
39 <i>Fuscopannaria</i>	15 (1.27)	6 (1.95)
40 <i>Glaucomaria</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
41 <i>Graphis</i>	12 (1.02)	3 (0.98)
42 <i>Heterodermia</i>	14 (1.19)	6 (1.95)
43 <i>Hypocenomyce</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
44 <i>Hypogymnia</i>	23 (1.95)	7 (2.28)
45 <i>Icmadophila</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
46 <i>Imshaugia</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
47 <i>Ionaspis</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
48 <i>Kurokawia</i>	4 (0.34)	2 (0.65)
49 <i>Lasallia</i>	1 (0.08)	2 (0.65)
50 <i>Lecanactis</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
51 <i>Lecanographa</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
52 <i>Lecanora</i>	8 (0.68)	2 (0.65)
53 <i>Lecidea</i>	7 (0.59)	3 (0.98)
54 <i>Lecidella</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
55 <i>Lendemerella</i>	5 (0.42)	1 (0.33)
56 <i>Lepra</i>	1 (0.08)	2 (0.65)
57 <i>Lepraria</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
58 <i>Leptogium</i>	15 (1.27)	5 (1.63)
59 <i>Lethariella</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
60 <i>Lichenomphalia</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
61 <i>Lithographa</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
62 <i>Lobaria</i>	98 (8.32)	12 (3.91)
63 <i>Lobarina</i>	3 (0.25)	1 (0.33)
64 <i>Lopadium</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
65 <i>Megalaria</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
66 <i>Megalospora</i>	17 (1.44)	4 (1.30)
67 <i>Melanelia</i>	5 (0.42)	1 (0.33)

Род	Количество образцов	Количество видов
68 <i>Melanhalea</i>	2 (0.17)	2 (0.65)
69 <i>Menegazzia</i>	3 (0.25)	2 (0.65)
70 <i>Micarea</i>	1 (0.08)	2 (0.65)
71 <i>Mikhtomia</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
72 <i>Mycobilimbia</i>	7 (0.59)	2 (0.65)
73 <i>Mycoblastus</i>	3 (0.25)	2 (0.65)
74 <i>Myelochroa</i>	4 (0.34)	3 (0.98)
75 <i>Naetrocymbae</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
76 <i>Nephroma</i>	4 (0.34)	2 (0.65)
77 <i>Nephromopsis</i>	5 (0.42)	2 (0.65)
78 <i>Nipponoparmelia</i>	3 (0.25)	2 (0.65)
79 <i>Normandina</i>	6 (0.51)	1 (0.33)
80 <i>Ochrolechia</i>	1 (0.08)	3 (0.98)
81 <i>Oropogon</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
82 <i>Pannaria</i>	17 (1.44)	2 (0.65)
83 <i>Parmelia</i>	25 (2.12)	8 (2.61)
84 <i>Parmeliella</i>	5 (0.42)	2 (0.65)
85 <i>Parmeliopsis</i>	5 (0.42)	1 (0.33)
86 <i>Parmotrema</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
87 <i>Peltigera</i>	26 (2.21)	7 (2.28)
88 <i>Pertusaria</i>	10 (0.85)	1 (0.33)
89 <i>Phaeophyscia</i>	24 (2.04)	6 (1.95)
90 <i>Physcia</i>	8 (0.68)	7 (2.28)
91 <i>Physciella</i>	5 (0.42)	3 (0.98)
92 <i>Physconia</i>	54 (4.58)	6 (1.95)
93 <i>Platismatia</i>	4 (0.34)	1 (0.33)
94 <i>Polyblastidium</i>	14 (1.19)	4 (1.30)
95 <i>Polyozosia</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
96 <i>Protopannaria</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
97 <i>Protoparmelia</i>	0.08	1 (0.33)
98 <i>Pseudocyphellaria</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
99 <i>Pseudoschismatomma</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
100 <i>Pyrenula</i>	3 (0.25)	1 (0.33)
101 <i>Pyxine</i>	4 (0.34)	1 (0.33)
102 <i>Ramalina</i>	9 (0.76)	4 (1.30)
103 <i>Ramboldia</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
104 <i>Rhizocarpon</i>	1 (0.08)	3 (0.98)
105 <i>Ricasolia</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
106 <i>Rinodina</i>	293 (24.87)	25 (8.14)
107 <i>Ropalospora</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
108 <i>Rufoplaca</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
109 <i>Santessonella</i>	8 (0.68)	1 (0.33)
110 <i>Schaereria</i>	1 (0.08)	1 (0.33)

Род	Количество образцов	Количество видов
111 <i>Sclerococcum</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
112 <i>Scoliciosporum</i>	2 (0.17)	2 (0.65)
113 <i>Stereocaulon</i>	2 (0.17)	2 (0.65)
114 <i>Sticta</i>	6 (0.51)	2 (0.65)
115 <i>Tephromela</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
116 <i>Tetramelas</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
117 <i>Thamnolia</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
118 <i>Toensbergia</i>	3 (0.25)	1 (0.33)
119 <i>Trapeliopsis</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
120 <i>Umbilicaria</i>	12 (1.02)	7 (2.28)
121 <i>Usnea</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
122 <i>Vahliella</i>	4 (0.34)	1 (0.33)
123 <i>Varicellaria</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
124 <i>Vulpicida</i>	2 (0.17)	2 (0.65)
125 <i>Xanthomendoza</i>	14 (1.19)	1 (0.33)
126 <i>Xanthoparmelia</i>	1 (0.08)	2 (0.65)
127 <i>Xanthoria</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
128 <i>Xylographa</i>	1 (0.08)	2 (0.65)
129 <i>Xylopsora</i>	19 (1.61)	1 (0.33)
<i>Всего</i>	1178	307
<i>Total</i>		

Примечание. Выделены наиболее представительные по количеству видов и образцов роды.

Note. The most representative genera in terms of the number of species and samples are highlighted.

Таблица 2. Количество смонтированных образцов (% от общего количества смонтированных) и видов (% от количества представленных в инвентаризованной части гербария), распределенных по семействам

Table 2. Number of mounted samples (percent of mounted samples) and submitted species (percent of species represented in the inventoried part of the herbarium) distributed by families

Семейство Family	Количество образцов Number of samples	Количество видов Number of species
1 <i>Arthoniaceae</i>	3 (0.25)	3 (0.98)
2 <i>Brigantiaeaceae</i>	3 (0.25)	2 (0.65)
3 <i>Byssolomataceae</i>	1 (0.08)	2 (0.65)
4 <i>Caliciaceae</i>	23 (1.95)	9 (2.93)
5 <i>Candelariaceae</i>	4 (0.34)	1 (0.33)
6 <i>Chrysotrichaceae</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
7 <i>Cladoniaceae</i>	68 (5.77)	19 (6.19)
8 <i>Coccocarpiaceae</i>	3 (0.25)	2 (0.65)
9 <i>Coenogoniaceae</i>	1 (0.08)	2 (0.65)
10 <i>Collemataceae</i>	45 (3.82)	10 (3.26)
11 <i>Coniocybaceae</i>	5 (0.42)	3 (0.98)
12 <i>Dacampiaceae</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
13 <i>Graphidaceae</i>	16 (1.36)	4 (1.30)

Семейство	Количество образцов	Количество видов
14 <i>Hygrophoraceae</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
15 <i>Hymeneliaceae</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
16 <i>Icmadophilaceae</i>	3 (0.25)	2 (0.65)
17 <i>Incertae sedis</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
18 <i>Lecanographaceae</i>	3 (0.25)	2 (0.65)
19 <i>Lecanoraceae</i>	11 (0.93)	5 (1.63)
20 <i>Lecideaceae</i>	11 (0.93)	4 (1.30)
21 <i>Lobariaceae</i>	109 (9.25)	18 (5.86)
22 <i>Lopadiaceae</i>	3 (0.25)	1 (0.33)
23 <i>Megalosporaceae</i>	17 (1.44)	4 (1.30)
24 <i>Monoblastiaceae</i>	6 (0.51)	2 (0.65)
25 <i>Naetrocymbaceae</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
26 <i>Nephromataceae</i>	5 (0.42)	2 (0.65)
27 <i>Ochrolechiaceae</i>	4 (0.34)	3 (0.98)
28 <i>Ophioparmaceae</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
29 <i>Pannariaceae</i>	46 (3.90)	12 (3.91)
30 <i>Parmeliaceae</i>	161 (13.67)	55 (17.92)
31 <i>Peltigeraceae</i>	26 (2.21)	7 (2.28)
32 <i>Pertusariaceae</i>	11 (0.93)	3 (0.98)
33 <i>Physciaceae</i>	427 (36.25)	59 (19.22)
34 <i>Pyrenulaceae</i>	3 (0.25)	1 (0.33)
35 <i>Ramalinaceae</i>	52 (4.41)	18 (5.86)
36 <i>Ramboldiaceae</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
37 <i>Rhizocarpaceae</i>	1 (0.08)	3 (0.98)
38 <i>Roccellaceae</i>	3 (0.25)	2 (0.65)
39 <i>Schaereriaceae</i>	2 (0.17)	2 (0.65)
40 <i>Sclerococcaceae</i>	1 (0.08)	1 (0.33)
41 <i>Scoliciosporaceae</i>	2 (0.17)	2 (0.65)
42 <i>Sporastatiaceae</i>	3 (0.25)	1 (0.33)
43 <i>Stereocaulaceae</i>	3 (0.25)	3 (0.98)
44 <i>Teloschistaceae</i>	37 (3.14)	9 (2.93)
45 <i>Tephromelataceae</i>	8 (0.68)	4 (1.30)
46 <i>Trapeliaceae</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
47 <i>Umbilicariaceae</i>	22 (1.87)	10 (3.26)
48 <i>Vahliellaceae</i>	4 (0.34)	1 (0.33)
49 <i>Varicellariaceae</i>	2 (0.17)	1 (0.33)
50 <i>Verrucariaceae</i>	6 (0.51)	1 (0.33)
51 <i>Xylographaceae</i>	2 (0.17)	3 (0.98)
<i>Всего</i>	1178	307
<i>Total</i>		

Примечание. Выделены наиболее представительные по количеству видов и образцов семейства.

Note. The most representative families in terms of the number of species and samples are highlighted.

Таблица 3. Количество смонтированных образцов (% от общего количества смонтированных) и видов (% от количества представленных в инвентаризованной части гербария), распределенных по порядкам

Table 3. Number of mounted samples (percent of mounted samples) and submitted species (percent of species represented in the inventoried part of the herbarium) distributed by orders

Порядок Order	Количество образцов Number of samples	Количество видов Number of samples
1 <i>Agaricales</i>	1 (0.10)	1 (0.33)
2 <i>Arthoniales</i>	10 (0.97)	9 (2.94)
3 <i>Baeomycetales</i>	4 (0.39)	4 (1.31)
4 <i>Caliciales</i>	452 (44.05)	68 (22.22)
5 <i>Candelariales</i>	4 (0.39)	1 (0.33)
6 <i>Coniocybales</i>	5 (0.49)	3 (0.98)
7 <i>Hymeneliales</i>	1 (0.10)	1 (0.33)
8 <i>Incertae sedis</i>	1 (0.10)	1 (0.33)
9 <i>Lecanorales</i>	305 (29.73)	109 (35.62)
10 <i>Lecideales</i>	15 (1.46)	5 (1.63)
11 <i>Monoblastiales</i>	6 (0.58)	2 (0.65)
12 <i>Ostropales</i>	16 (1.56)	6 (1.96)
13 <i>Peltigerales</i>	238 (23.20)	53 (17.32)
14 <i>Pertusariales</i>	18 (1.75)	9 (2.94)
15 <i>Pleosporales</i>	2 (0.19)	1 (0.33)
16 <i>Pyrenulales</i>	3 (0.29)	1 (0.33)
17 <i>Rhizocarpales</i>	4 (0.39)	4 (1.31)
18 <i>Schaereriales</i>	3 (0.29)	2 (0.65)
19 <i>Teloschistales</i>	60 (5.85)	15 (4.90)
20 <i>Umbilicariales</i>	24 (2.34)	11 (3.59)
21 <i>Verrucariales</i>	6 (0.58)	1 (0.33)
<i>Всего Total</i>	1178	307

Примечание. Выделены наиболее представительные по количеству видов и образцов порядки.

Note. The most representative orders in terms of the number of species and samples are highlighted.

Об авторах

Ежкин Александр Константинович (<https://orcid.org/0000-0002-2242-2250>), кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии растений и геоэкологии, куратор гербария, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, ezhkin@yandex.ru
Каганов Владимир Владимирович (<https://orcid.org/0000-0003-1444-9813>), аспирант, младший научный сотрудник лаборатории экологии растений и геоэкологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, vladimirkaganov@mail.ru

About the Authors

Ezhkin, Alexander K. (<https://orcid.org/0000-0002-2242-2250>), Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, the Laboratory of plant ecology and geoecology, herbarium curator, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, ezhkin@yandex.ru
Kaganov, Vladimir V. (<https://orcid.org/0000-0003-1444-9813>), Postgraduate, Junior Researcher, the Laboratory of plant ecology and geoecology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, vladimirkaganov@mail.ru

Поступила 07.07.2024

Принята к публикации 25.07.2024

Received 7 July 2024

Accepted 25 July 2024

© Авторы, 2024 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2024.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЕ УЧЕНЫЕ



Александр Викторович Рыбин (20.05.1958–11.01.2024)

Известный в России специалист в области петрологии и вулканологии, кандидат геолого-минералогических наук. На протяжении 20 лет являлся руководителем лаборатории вулканологии и вулканоопасности ИМГиГ ДВО РАН. Организатор комплексных вулканологических экспедиций в труднодоступные районы Курильской островной дуги. Под руководством А.В. Рыбина Институт проводил ежегодные комплексные научные экспедиции по исследованию труднодоступных островов Курильской гряды. С разной степенью детальности выполнены вулканологические и геоморфолого-геологические исследования на островах Кунашир, Итуруп, Чирпой, Уруп, Симушир, Кетой, Ушишир, Расшуа, Матуа, Шиашкотан, Онекотан. Основатель и руководитель Сахалинской группы реагирования на вулканические извержения (SVERT) – единственной в Сахалинской области структуры, занимающейся мониторингом вулканической активности. Автор и соавтор более 190 научных публикаций, посвященных различным аспектам изучения вулканизма Курильской островной дуги.

УДК 551.21

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.3.244-254>
<https://www.elibrary.ru/rwwhz>

Комплексные вулканологические исследования на Курильских островах под руководством А.В. Рыбина

Complex volcanological studies in the Kuril Islands under the leadership of Aleksander V. Rybin

Современный вулканизм в целом и активные вулканы Курильской островной дуги в частности изучены к настоящему времени недостаточно. Во многом это обусловлено значительной протяженностью архипелага, труднодоступностью большинства объектов из-за отсутствия транспортного сообщения и недостаточно развитой внутриостровной инфраструктуры (постоянное население присутствует только на островах Парамушир, Итуруп, Кунашир). Это касается как целых островов (преимущественно центральной части дуги –

Шиашкотан, Расшуа, Матуа, Симушир и др.), планомерные геолого-вулканологические работы на которых были прекращены почти полвека назад и в последующие годы проводились в лучшем случае эпизодически, так и отдельных вулканов, расположенных на крупных заселенных островах (Пик Фусса, Татаринова, Иван Грозный, Атсонупури, Львиная Пасть, Руруй и др.), посещение которых ввиду отсутствия дорог требует организации специальных экспедиций с использованием водомоторной или вертолетной техники.

Начиная с 2000-х годов на Центральные и Северные Курильские острова, а также в труднодоступные районы Южных Курил было проведено более двух десятков комплексных вулканологических экспедиций [1–5], организованных заведующим лабораторией вулканологии и вулканоопасности ИМГиГ ДВО РАН А.В. Рыбиным. Устройство и проведение этих экспедиций было нетривиальной задачей, сопряженной с решением сложных организационных и логистических вопросов, требовало упорства и целеустремленности.

Настоящее сообщение посвящено описанию экспедиций и работ, выполненных благодаря энтузиазму ученого-вулканолога и организатора современных вулканологических исследований на Курильских островах – Александра Викторовича Рыбина.

Будущий вулканолог А.В. Рыбин родился в районном центре Юрино, на лесоучастке, расположенному на левом берегу Волги (Марийская АССР, ныне – республика Марий Эл). Его родителей направили туда после окончания института. С трех лет жил в районном центре, учился в Юринской средней школе. В детстве увлекался рыбалкой на Волге, ба-

скетболом, зимой – лыжами (в школьные годы получил звание кандидата в мастера спорта по лыжным гонкам). После окончания школы в 1975 г. пробовал поступить в Марийский политехнический институт, но не прошел по конкурсу. С 1 сентября того же года по комсомольской линии был направлен на работу в Карасьядскую среднюю школу Юринского района, где работал учителем физкультуры и труда. Работал также и на ваяльно-войлокном комбинате в пос. Юрино в должности фурнитурщика кожгалантерейного цеха. Осенью 1976 г. был призван в ряды Советской армии. Службу проходил в учебном центре в Переславле-Залесском, затем в секретных войсках космической связи в г. Красноярске. В 1978 г. поступил на подготовительное отделение Новосибирского государственного университета, а через год, достойно пройдя вступительные испытания, был зачислен на геологический факультет этого университета (по специальности «геологическая съемка, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых»). Практику проходил на Алтае, Чукотке, Сахалине. С Сахалином он связал свою жизнь, посвятив ее изучению вулканизма Курильских островов.



Рекогносцировочные работы по изучению береговых обнажений о. Симушир с борта маломерного судна, 2011 г.

Фото А.В. Дегтерева

Reconnaissance to study coastal outcrops on Simushir Island from the board of a boat, 2011. Photo by A. Degtrev

После окончания университета по распределению был направлен на работу в Сахалинский комплексный научно-исследовательский институт Академии наук СССР (СахКНИИ ДВНЦ АН СССР), который в том же году был переименован в Институт морской геологии и геофизики (ИМГиГ) Дальневосточного научного центра АН СССР (ныне ИМГиГ ДВО РАН). 19 сентября 1984 г. Александр Викторович был зачислен в лабораторию геологических формаций на должность инженера, в которой по трудовому договору должен был проработать три года. Первые два года работы под руководством заведующего лабораторией к.г.-м.н. О.А. Мельникова занимался формационным анализом кайнозойских образований Камчатки.

В 1986 г. в связи с реорганизацией структуры института был переведен в лабораторию петрологии и геохимии (зав. лабораторией д.г.-м.н. Б.Н. Пискунов). К этому времени сформировались его научные интересы, связанные с изучением вулканализма Курильской островной дуги. Первые годы работы были посвящены исследованиям природы кислого вулканализма.

Из характеристики А.В. Рыбина от 22.10.1986 г., составленной Б.Н. Пискуновым*: «...В дальнейшем интересы А.В. Рыбина связаны с петрологией вулканических комплексов и интрузивных массивов Курильских островов. Владеет современными методами минералогического и петрографического анализов, статистической обработки результатов наблюдений. Глубоко познал основы геологии Курильских островов и своими исследованиями вносит вклад в совершенствование знаний по этой проблеме. В экспедициях 1985–1986 гг. выполнял самостоятельные задания и проявил себя как квалифицированный инициативный сотрудник...».

В 1989 г. начал работу над кандидатской диссертацией. Научными руководителями были д.г.-м.н. Б.Н. Пискунов и д.г.-м.н. Г.Б. Ферштатер (Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварецкого, Екатеринбург).

За это время повысился профессиональный уровень и опыт его научной работы, подкрепляемый регулярными полевыми работами на Южных Курилах. В характеристике докторанта отмечалось, что в процессе глубокого изучения гранитоидного магматизма было обосновано возрастное расчленение интрузий, впервые детально описан состав амфиболов и пироксенов, изучены взаимоотношения фаз внедрений и соотношения интрузий и вулканических пород»*.

В 1998 г. в докторской совете ДВГИ ДВО РАН А.В. Рыбин защитил кандидатскую диссертацию на тему «Неоген-четвертичный кислый магматизм Курильской островной дуги», основная цель которой заключалась в установлении закономерностей проявления и условий формирования кислых пород в пределах Курильской островной дуги. В основу работы был положен фактический материал, полученный во время полевых работ 1986–1998 гг. на островах Кунашир, Итуруп, Уруп, Симушир, Чирпой в составе экспедиций ИМГиГ ДВО РАН. В докторской работе было использовано 250 новых анализов (петрогенные окислы и микроэлементы) и около 400 микрозондовых определений состава по-родообразующих минералов, 20 определений абсолютного возраста K-Ar-методом, 36 анализов газовой фазы в породах и минералах. По результатам аттестации 1 сентября 1999 г. А.В. Рыбин переведен на должность старшего научного сотрудника лаборатории геологии островных дуг.

Работы А.В. Рыбина, выполненные на этом этапе, внесли заметный вклад не только в решение фундаментальных проблем островодужного вулканализма, связанных с познанием природы формирования кислых пород Курильской островной дуги и их петролого-геохимических и минералогических особенностей [6, 7], но и в изучение практических вопросов геологии, таких какрудоносность магматических образований [8]. В частности, им совместно с В.Я. Данченко, идейным лидером и инициатором изучения рудного потенциала вулканитов Курильской дуги, были охарак-

* Из личного дела Рыбина А.В. (Архив ИМГиГ ДВО РАН. Ф. 1. Оп. № 5. Д. 186).

теризованы геохимические ассоциации, минералы-носители и геологическое положение рудопроявлений, содержащих редкие металлы в виде минеральных или изоморфных примесей в типично островодужных золото-серебряных, колчеданно-полиметаллических и иных рудах, а также в собственно редкометалльных проявлениях. Выявлено широкое распространение рениеносной минерализации на Курильских островах и проведено сравнение по составу молибден-рениевых минералов и руд Курильских островов с рудами рениеносных месторождений мира. В настоящее время эти результаты используются производственными организациями при проведении поисково-разведочных работ на Курильских островах.

В 2000 г. А.В. Рыбин был назначен на должность заведующего лабораторией вулканологии и вулканоопасности. К этому времени его научные интересы сместились в сторону проблематики современного активного вулканизма. В 2003 г. по его инициативе на базе ИМГиГ ДВО РАН создается Сахалинская группа реагирования на вулканические изверже-

ния (Sakhalin Volcanic Eruptions Response Team (SVERT)) [9], руководителем которой он оставался до 2020 г. Работа по созданию Сахалинской группы реагирования на вулканические извержения на начальном этапе осуществлялась совместно с Сахалинским филиалом Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН (СФ ФИЦ ЕГС РАН) и ФГУ НПП «Росгеолфонд» при поддержке Аляскинской вулканологической обсерватории (Alaska Volcano Observatory (AVO), University of Alaska, Fairbanks) и Камчатской группы реагирования на вулканические извержения (KVERT) (<http://www.imgg.ru/ru/teams/svert>). В настоящее время SVERT остается единственной структурой, осуществляющей мониторинг вулканической активности на территории Сахалинской области, используя для этого главным образом данные дистанционного зондирования (спутниковые снимки среднего и высокого разрешения).

В это же время, совместно с лабораторией палеогеографии Тихоокеанского института географии ДВО РАН, начаты работы по ре-



Вулкан Кудрявый, о. Итуруп, 1997 г. Фото А.В. Рыбина

Kudryavy Volcano, Iturup Island, 1997. Photo by A. Rybin

конструкции истории вулканической активности и развития природной среды Курильских островов в плейстоцен-голоцене на основе тefрохронологических и палеогеографических методов.

В 2006–2008 гг. А.В. Рыбин являлся начальником вулканологического отряда и в 2007 г. координатором с российской стороны экспедиционной части «Курильского биокомплексного проекта: человеческая уязвимость и способность к восстановлению при субарктических изменениях», финансируемого Национальным научным фондом США (NSF ARC-0508109 (https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=0508109), руководитель – Б. Фицхью, Вашингтонский университет). Экспедиции в рамках Курильского биокомплексного проекта, представляющего уникальное междисциплинарное полевое исследование Курильских островов, предпринятое для изучения истории заселения и связанной с ним динамики взаимодействия человека с окружающей средой [10], без преувеличения стали знаковым событием для науки островного региона.

На труднодоступных и отдаленных островах были проведены комплексные исследования, в которых принимали участие археологи, геологи, вулканологи, палеогеографы из Университета штата Вашингтон (г. Сиэтл, США), Университета префектуры Хоккайдо (Япония), Сахалинского областного краеведческого музея, академических институтов ДВО РАН (ИМГиГ, ТИГ, ИВиС, СВКНИИ) [1–3, 11]. Вулканологическим отрядом в рамках проекта были получены уникальные данные, характеризующие современную и голоценовую вулканическую активность на островах Уруп, Симушир, Кетой, Янкича и Рыпонкича (о-ва Ушишир), Расшуа, Матуа, Шиашкотан, Онекотан. Сведения о состоянии активных вулканов были получены впервые за несколько десятков лет, а геоморфологические и палеогеографические работы для большинства объектов стали пионерными, заложив основу для дальнейшего изучения этих объектов [12–15].

11–19 июня 2009 г. на Центральных Курильских островах произошло мощное эксплозивно-эффузивное извержение вулкана Пик Сарычева на о. Матуа, одно из самых силь-



Участники экспедиции «Курильский биокомплексный проект – 2007». А.В. Рыбин четвертый справа.

Participants of the expedition “Kuril Biocomplex Project – 2007”. Aleksander V. Rybin is fourth from the right.

ных в регионе за историческое время (впервые отмечались пеплопады на территории Сахалина и Хабаровского края). Оно вошло в число 10 наиболее крупных извержений мира за последние 50 лет по объему выброшенного диоксида серы (1 млн т). Первые признаки готовящегося извержения были зафиксированы группой SVERT: на спутниковых снимках NOAA AVHRR и Terra MODIS за 11 июня 2009 г. была выявлена термальная аномалия, свидетельствующая об усилении теплового излучения в кратерной зоне вулкана. Под руководством А.В. Рыбина была организована экстренная экспедиция по изучению последствий этого неординарного вулканического события, в которой приняли участие сотрудники не только ИМГиГ, но и других институтов ДВО РАН – ТИГ, ИАПУ, ТОИ им. В.И. Ильинчева [11].

В ходе работ, проходивших с 26 по 28 июня 2009 г., были получены уникальные материалы, позволяющие охарактеризовать фациальный и вещественный состав продуктов извержения, оценить его геологический и экологический эффекты. Кроме того, в условиях сжатого графика и сложных условий удалось выполнить рекогносцировочные тефрохронологические исследования, направленные на изучение активности вулкана Пик Сарычева в позднем голоцене. Эти данные послужили основой для организации детальных работ по комплексному изучению о. Матуа в 2010 г., получивших финансовую поддержку в рамках грантов ДВО РАН («Комплексное геолого-геофизическое исследование вулканического центра Пик Сарычева – остров Матуа как эталонного долгоживущего центра Средних Курил», № 10-III-Д-08-043) и РФФИ («Сильные извержения вулкана Пик Сарычева в голоцене и оценка их воздействия на окружающую среду», № 10-05-00797-а). Доставка вулканологического отряда на о. Матуа в 2010 г. обеспечивалась парусным учебным судном «Надежда» Морского государственного университета (МГУ) им. адмирала Г.И. Невельского (г. Владивосток). В состав экспедиции вошли сотрудники институтов ДВО РАН (ИМГиГ, ИВиС, ТИГ) и зарубежные коллеги из университетов штатов Аляска (г. Фербенкс) и Вашингтон (г. Сиэтл, США). В течение ав-

густа 2010 г. были выполнены исследования плейстоцен-голоценового вулканизма о. Матуа и продолжено изучение последствий мощного взрыво-эффузивного извержения вулкана Пик Сарычева.

В результате проведенных исследований была реконструирована история взрыво-эффузивной активности вулкана Пик Сарычева в голоцене и получены прецизионные аналитические данные, характеризующие эволюцию магматического очага вулкана. Палеогеографические работы дали возможность более полно охарактеризовать голоценовую вулканическую активность на о. Матуа и оценить ее влияние на развитие природной среды. Кроме того, впервые выполнены изотопно-geoхимические исследования разновозрастных взрыво-эффузивных образований о. Матуа, позволившие выделить основные этапы магматической эволюции субдукционной системы. В частности,



Вулканологический отряд на о. Матуа, 2009 г.

На заднем плане – вершина вулкана Пик Сарычева, 2009 г. Фото Н.Г. Разжигаевой

Volcanological team on Matua Island, 2009. The top of the volcano, Sarychev Peak, is on the background, 2009.

Photo by N. Razjigaeva

было показано петрологическое сходство пород центрального и северного звеньев Курильской островной дуги, что свидетельствует об их формировании над «горячей» геохимически обогащенной, изотопно-деплетированной литосферной мантией. Изменения составов вулканических пород о. Матуа в плейстоцене–голоцене дают основание предполагать смену геодинамического режима формирования. Также в ходе экспедиции «попутно» были изучены последствия фреатического извержения вулкана Экарма [16].

В июне–июле 2011 г. на Центральных Курильских островах совместно с коллегами из ИВиС ДВО РАН проводились комплексные геолого-вулканологические и тефрохронологические исследования с целью изучения эруптивной истории четвертичных вулканов о. Симушир. Основными объектами экспедиционных работ были действующие вулканы Пик Прево и Заварицкого. Также была исследована кальдера Броутона с внутренним конусом Уратман, не относящаяся в настоящее время к действующим вулканам. В ходе экспедиционных работ изучено более 20 разрезов почвенно-пирокластических чехлов, вскрытых зачистками и шурфами мощностью 4–7 м. Значительная их часть фиксировала эруптивную деятельность вулканов за достаточно длительный период времени, по нашим предположениям – около 10–12 тыс. лет. Каждый отдельный разрез был детально описан и опробован.

В 2012–2014 гг. вулканологи ИМГиГ ДВО РАН совместно с коллегами из ДВГИ ДВО РАН изучали неоген–четвертичный вулканизм о. Кунашир и плейстоцен–голоценовую активность действующих вулканов Тятя и Менделеева. Были продолжены работы, начатые в окрестностях вулкана Тятя по инициативе А.В. Рыбина в 2002 г., когда были описаны почвенно-пирокластические чехлы в районе Урвитово и водопада Птичий. В результате была получена серия новых радиоуглеродных дат, характеризующих активность вулкана с конца плейстоцена.

Кроме того, в этот период по инициативе А.В. Рыбина совместно с представителями Курильской программы осуществлялся поиск перспективных площадок для установки сей-

мических станций, планируемых к развертке геофизической сети мониторинга сейсмической и вулканической активности на островах Кунашир и Итуруп (к сожалению, проект не получил развития).

В 2015 г. под руководством А.В. Рыбина осуществлены комплексные наземные геолого-геофизические и геоэкологические исследования по обоснованию выбора тестовых участков на островах Курильской гряды для проведения полевых наземных испытаний спектрального аппаратурно-программного комплекса в рамках проекта НИОКР «Мониторинг-СГ» (заказчик – Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева) [4]. В ходе полевых



Работы по описанию и опробованию почвенно-пирокластического чехла в центральной части о. Симушир, 2011 г. Фото А.И. Пасько

Description and sampling of the soil-pyroclastic cover in the central part of Simushir Island, 2011. Photo by A. Pasko

работ были обследованы тестовые участки на островах Итуруп, Уруп, Чирпой, Симушир, Янкича, Чирикотан, Шиашкотан, Онекотан, Харимкотан и Атласова. В состав экспедиции входили специалисты из научных учреждений России (ИМГиГ ДВО РАН, ДВГИ ДВО РАН, ИГЕМ РАН, НИИ КС им. А.А. Максимова – филиала ГКНПЦ им. М.В. Хруничева) и Республики Беларусь (БГУ), а также киногруппа «Центрнаучфильм». Техническим заданием было определено обследование 12 участков в зонах вулканической и сейсмической активности и выбор из них четырех наиболее типичных, характеризующих ландшафтную обстановку Южных, Центральных и Северных Курил. Проведено изучение спектральных характеристик прикратерных частей и окрестностей активных вулканов экспериментальным спектральным аппаратно-программным комплексом. Детальные вулканологические исследования включали изучение фациального и вещественного состава продуктов эруптивной деятельности, оценку геолого-геоморфологических и геоэкологических эффектов извержений и современного состояния активных вулканов Курильских островов, оценку последствий недавних извержений вулканов Сноу, Чирикотан, Кудрявый. Кроме того, впервые была выполнена детальная батиметрическая съемка кальдерного озера Кольцевое на о. Онекотан (Северные Курилы), в результате которой установлено, что оно в настоящее время занимает четвертую позицию в списке глубочайших озер России и является самым глубоким озером Дальнего Востока России и крупнейшим озером Сахалинской области.

В период с 1 июня по 3 июля 2017 г. сотрудники ИМГиГ ДВО РАН принимали участие в экспедиционных работах на о. Матуа (Центральные Курильские острова), которые проводились в рамках реализации грантового проекта Русского географического общества (РГО) «Комплексные вулканологические и геоэкологические исследования на о. Матуа (Средние Курильские острова): сильные эксплозивные извержения вулкана Пик Сарычева в верхнем плейстоцене – голоцене и оценка их воздействия на окружающую среду» (<https://www.rgo.ru/ru/granty/grantovyy-konkurs-2017>)

[5]. В состав экспедиционного отряда от ИМГиГ ДВО РАН вошли 6 человек. Доставка в район проведения исследований осуществлялась на большом десантном корабле «Адмирал Невельской» Тихоокеанского флота (ТОФ) в рамках совместной экспедиции Министерства обороны Российской Федерации, РГО и ТОФ. Основными задачами экспедиции 2017 г. являлись геолого-вулканологическое картирование островов Матуа и Топорковый, палеовулканологические исследования, включающие комплекс тефрохронологических и геохимических работ, направленных на реконструкцию эруптивной деятельности вулкана Пик Сарычева за последние тысячелетия, и оценка вулканической опасности [17]. Отметим, что параллельно на острове проводили работу еще два полевых отряда: Сахалинского областного краеведческого музея (Южно-Сахалинск) и Географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Москва).

В 2017–2019 гг. А.В. Рыбин занялся активным изучением катастрофических эксплозивных извержений о. Итуруп. Совместно с коллегами из ИГМ СО РАН им. В.С. Соболева (г. Новосибирск) изучены кальдерные извержения вулканов Ветрового и Львиная Пасть. В частности, получены первые данные о возрасте, вещественном составе и природе мощных кальдерных извержений. Кроме того, с помощью тефрохронологических исследований и радиоуглеродного датирования изучены голоценовые пеплопады центральной части о. Итуруп [18, 19].

По инициативе А.В. Рыбина по единой методике проведены комплексные исследования и типизация термальных вод и сольфатарных газов Сахалина и Южных Курильских островов. Выделено тринадцать гидрохимических типов термальных вод по кислотности, газовому и химическому составам. Даны рекомендации по использованию различных типов термальных источников для создания систем мониторинга вулканической активности и применению гидротерм в народно-хозяйственных целях. Проведена батиметрическая эхолотная съемка внутрикальдерных озер Курильских островов: Горячего и Кипящего (о. Кунашир),

Бирюзового (о. Симушир), Черного (о. Онекотан). По результатам съемки составлены батиметрические схемы озер, впервые получены трехмерные изображения их подводной части.

Александр Викторович ушел из жизни совсем недавно, оставив нам – его коллегам и ученикам – богатый фактический материал, полученный благодаря его энтузиазму, воле, научной интуиции и организаторским способностям. Материал включает представительные коллекции образцов вулканитов (в том числе лав, пирокластики, вулканических пеплов), подробные описания опробованных геологических разрезов, точки наблюдения отложений, фотоматериалы и пр., которые при соответствующем подходе позволят продвинуться в изучении вулканизма Курильской островной дуги.



Изучается разрез пирокластических отложений в районе перешейка Ветровой, о. Итуруп, 2018 г.

Фото С.З. Смирнова

Study of the section of pyroclastic deposits in the area of the Vetrovoy Isthmus, Iturup Island, 2018.

Photo by S. Smirnov

Список литературы

- Левин Б.В., Фитцхью Б., Бурджуа Д., Рыбин А.В., Разжигаева Н.Г., Белоусов А.Б., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Фролов Д.И., Нищко Т.И., Харламов А.А., Коротеев И.Г. **2007**. Комплексная экспедиция на Курильские острова в 2006 г. (I этап). *Вестник ДВО РАН*, 1: 144–148. EDN: IMQGON
- Левин Б.В., Фитцхью Б., Бурджуа Д., Рыбин А.В., Пинегина Т.К., Кайстренко В.М., Сасорова Е.В., Разжигаева Н.Г., Белоусов А.Б., Копаница А.В., Борисов С.А., Носов М.А., Василенко Н.Ф., Фролов Д.И., Ивельская Т.Н., Прытков А.С., Евдокимов Ю.В., Жарков Р.В., Козлов Д.Н., Ганзей К.С., Кравчуновская Е.А., Чибисова М.В., Чирков С.А., Нищко Т.И., Харламов А.А., Коротеев И.Г. **2008**. Комплексная экспедиция на Средние Курильские острова в 2007 г. (II этап). *Вестник ДВО РАН*, 3: 111–121. EDN: LACQFP
- Левин Б.В., Фитцхью Б., Буржуа Д., Рыбин А.В., Разжигаева Н.Г., Накагава М., Пономарева В.В., Василенко Н.Ф., Фролов Д.И., Прытков А.С., Копаница А.В., Жарков Р.В., Козлов Д.Н., Ганзей К.С., Чибисова М.В., Чирков С.А., Нищко Т.И., Гурьянов В.Б., Коротеев И.Г., Дегтерев А.В. **2009**. Комплексная экспедиция на Курильские острова в 2008 г. (III этап). *Вестник ДВО РАН*, 2: 134–142. EDN: LATAGD
- Рыбин А.В., Богомолов Л.М., Дегтерев А.В., Чибисова М.В., Копаница А.В., Власова И.И., Сабирова Н.Д., Сабиров Р.Н., Осенняя И.Ф., Шестакова О.М., Гурьянов В.Б., Зарочинцев В.С., Коротеев И.Г., Климанцов И.М., Давыдова М.Ю., Чаплыгин И.В., Чаплыгин О.В., Беляев Ю.В., Пасенюк А.А., Орлов Д.С., Королев А.Н., Коровин Г.В., Тарасов А.А., Павлов С.В., Кириллов И.А. **2015**. Международная экспедиция Курилы – 2015. *Вестник ДВО РАН*, 6: 181–192. EDN: VMAZZL
- Рыбин А.В., Дегтерев А.В., Дудченко И.П., Гурьянов В.Б., Романюк Ф.А., Климанцов И.М. **2017**. Комплексные исследования на острове Матуя в 2017 году. *Геосистемы переходных зон*, 4(1): 21–29. <http://dx.doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.4.021-029>
- Рыбин А.В., Пискунов Б.Н. **1992**. Плагиограниты и гранодиориты о. Кунашир – эволюция состава или петрохимическая зональность? *Тихоокеанская геология*, 11(2): 31–40.
- Пискунов Б.Н., Рыбин А.В. **2000**. Петрогохимические типы гранитоидов Курильской островной дуги. *Доклады РАН*, 371(1): 93–95.
- Данченко В.Я., Рыбин А.В., Штейнберг Г.С. **1999**. Рениеносная минерализация Курильских островов. *Тихоокеанская геология*, 18(4): 85–98.
- Чибисова М.В., Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Романюк Ф.А. **2023**. Сахалинская группа реагирования на вулканические извержения (SVERT): 20 лет мониторинга вулканической активности на Куриль-

- ских островах. *Геосистемы переходных зон*, 7(4): 448–453. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.4.448-453>
10. Fitzhugh B. **2018.** The Kuril Biocomplexity Project: Anatomy of an Interdisciplinary Research Program in the North Pacific. In: S. Silliman (ed.). *Engaging Archaeology: 25 Case Studies in Research Practice*. Hoboken: Wiley, p. 61–69. <https://doi.org/10.1002/9781119240549.ch7>
 11. Левин Б.В., Рыбин А.В., Разжигаева Н.Г., Василенко Н.Ф., Фролов Д.И., Майор А.Ю., Салюк П.А., Жарков Р.В., Прятков А.С., Козлов Д.Н., Чернов А.Г., Чибисова М.В., Гурьянов В.Б., Коротеев И.Г., Дегтерев А.В. **2009.** Комплексная экспедиция «Вулкан Сарычева – 2009» (Курильские острова). *Вестник ДВО РАН*, 6: 98–104. EDN: LACQNR
 12. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Белянина Н.И., Гребенникова Т.А., Арсланов Х.А., Пшеничникова Н.Ф., Рыбин А.В. **2013.** Роль климатического и вулканогенного факторов в формировании органогенных отложений и развитии ландшафтов о. Симушир (Центральные Курилы) в среднем–позднем голоцене. *Тихоокеанская геология*, 32(3): 55–67. <https://doi.org/10.1134/s1819714013030068>; EDN: QIXIBD
 13. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Мохова Л.М., Копотева Т.А., Рыбин А.В., Харламов А.А. **2009.** Торфяник о. Кетой – опорный разрез среднего–позднего голоцена Центральных Курил. *Тихоокеанская геология*, 28(6): 65–80. <https://doi.org/10.1134/s1819714009060050>; EDN: KKXGMK
 14. Razjigaeva N.G., Ganzev L.A., Grebenikova T.A., Mokhova L.M., Rybin A.V., Nazarova L.B., Arslanov K.A., Maksimov F.E., Petrov A.Yu., Zazovskaya E.P. **2022.** Environmental changes since 14 ka BP in the southernmost Kuril islands (North-Western Pacific) and regional correlation of events. *Journal of Asian Earth Sciences*, 226 (105088). <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2022.105088>
 15. Martynov A.Y., Kimura J.I., Martynov Y.A., Rybin A.V. **2009.** Geochemistry of late Cenozoic lavas on Kunashir Island, Kurile Arc. *Island Arc.* USA, Springer Publ. 19 p. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2009.00684.x>
 16. Рыбин А.В., Дегтерев А.В., Кравчуновская Е.А., Чибисова М.В., Нерода А.С., Мелекесцев И.В., Разжигаева Н.Г., Чашин С.А., Чирков С.А., Коротеев И.Г., Арсланов Х.А. **2012.** Слабое фреатическое извержение вулкана Экарма (Курильские о-ва) в июне 2010 г. как возможный предвестник его будущего сильного магматического извержения. *Вулканология и сейсмология*, 5: 13–24. <https://doi.org/10.1134/s0742046312050041>
 17. Мартынов Ю.А., Рыбин А.В., Дегтерев А.В., Остапенко Д.С., Мартынов А.Ю. **2015.** Геохимическая эволюция вулканизма о. Матуа (Центральные Курилы). *Тихоокеанская геология*, 34(1): 13–24. <https://doi.org/10.1134/s1819714015010042>; EDN: TKAQEP
 18. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Смирнов С.З., Мартынов Ю.А., Дегтерев А.В. **2018.** Петрохимические особенности вулканических комплексов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 2(4): 377–385. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.377-385>
 19. Смирнов С.З., Соколова Е.Н., Кузьмин Д.В., Тимина Т.Ю., Рыбин А.В., Дегтерев А.В. **2017.** Кислые магмы кальдерных извержений острова Итуруп: первые результаты исследования расплавных включений во вкрашенниках пемз кальдеры Львиная Пасть и перешейка Ветровой. *Тихоокеанская геология*, 36(1): 52–69. <https://doi.org/10.1134/s1819714017010080>; EDN: VMPQWC

References

1. Levin B.W., Fitzhugh B., Bourgeois J., Rybin A.V., Razzhigaeva N.G., Belousov A.B., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I., Nushko T.I., Kharlamov A.A., Koroteev I.G. **2007.** Complex expedition to the Kuril Islands in 2006 (I stage). *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 1: 144–148. (In Russ).
2. Levin B.W., Fitzhugh B., Bourgeois J., Rybin A.V., Pinegina T.K., Kaistrenko V.M., Sasorova E.V., Razzhigaeva N.G., Belousov A.B., Kopanina A.V., Borisov S.A., Nosov M.A., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Ivelskaya T.N., Prytkov A.S., Evdokimov Yu.V., Zharkov R.V., Kozlov D.N., Ganzev K.S., Kravchunovskaya E.A., Chibisova M.V., Chirkov S.A., Nushko T.I., Kharlamov A.A., Koroteev I.G. **2008.** The complex expedition to the Central Kuril Islands in 2007 (II stage). *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 3: 111–121. (In Russ).
3. Levin B.W., Fitzhugh B., Bourgeois J., Rybin A.V., Razzhigaeva N.G., Nakagawa M., Ponomareva V.V., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Prytkov A.S., Kopanina A.V., Zharkov R.V., Kozlov D.N., Ganzev K.S., Chibisova M.V., Chirkov S.A., Nushko T.I., Gur'yanov V.B., Koroteev I.G., Degtrev A.V. **2009.** Complex expedition to the Kuril Islands in 2008 (III stage). *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 2: 134–142. (In Russ).
4. Rybin A.V., Bogomolov L.M., Degtrev A.V., Chibisova M.V., Kopanina A.V., Vlasova I.I., Sabirova N.D., Sabirov R.N., Osennyyaya I.F., Shestakova O.M., Guryanov V.B., Zarochintsev V.S., Koroteev I.G., Klimantsov I.M., Davydova M.Yu., Chaplygin I.V., Chaplygin O.V., Belyaev Yu.V., Pasenyuk A.A., Orlov D.S., Korolev A.N., Korovin G.V., Tarasov A.A., Pavlov S.V., Kirillov I.A. **2015.** International expedition “Kurile Islands 2015”. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 6: 181–192. (In Russ).
5. Rybin A.V., Degtrev A.V., Dudchenko I.P., Guryanov V.B., Romanyuk F.A., Klimantsov I.M. **2017.** Comprehensive research on Matua Island in 2017. *Geosistemy pereходnykh zon = Geosystems of Transition Zones*,

- 4(1): 21–29. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.4.021-029>
6. Rybin A.V., Piskunov B.N. **1992**. Plagiogranites and granodiorites of the Kunashir Island: composition evolution or petrochemical zonation? *Geology of the Pacific Ocean*, 2: 31–40. (In Russ.)
 7. Piskunov B.N., Rybin A.V. **2000**. Petrogeochemical types of granitoid in the Kuril island arc. *Doklady Earth Sciences*, 371: 362–364.
 8. Dantchenko V.Ya., Rybin A.V., Shtenberg G.S. **1999**. Rhenium-bearing mineralization in the Kuril Islands. *Geology of the Pacific Ocean*, 18(4): 85–98. (In Russ.)
 9. Chibisova M.V., Degterev A.V., Rybin A.V., Romanyuk F.A. **2023**. Sakhalin Volcanic Eruption Response Team (SVERT): 20 years of monitoring of volcanic activity on the Kuril Islands. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 7(4): 448–453. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.4.448-453>
 10. Fitzhugh B. **2018**. The Kuril Biocomplexity Project: Anatomy of an Interdisciplinary Research Program in the North Pacific. In: S. Silliman (ed.). *Engaging Archaeology: 25 Case Studies in Research Practice*. Hoboken: Wiley, p. 61–69. <https://doi.org/10.1002/9781119240549.ch7>
 11. Levin B.W., Rybin A.V., Razzhigaeva N.G., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Mayor A.Y., Salyuk P.A., Zharkov R.V., Prytkov A.S., Kozlov D.N., Chernov A.G., Chibisova M.V., Gur'yanov V.B., Koroteev I.G., Degterev A.V. **2009**. Complex expedition “Sarychev volcano-2009” (Kuril Islands). *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 6: 98–104. (In Russ.)
 12. Razjigaeva N.G., Ganzev L.A., Belyanina N.I., Grebennikova T.A., Arslanov Kh.A., Pshenichnikova N.F., Rybin A.V. **2013**. Role of climatic and volcanogenic factors in the formation of organogenic sediments and the development of landscapes on Simushir Island (Central Kurile Islands) in the middle-late Holocene. *Russian Journal of Pacific Geology*, 7(3): 199–211. <https://doi.org/10.1134/s1819714013030068>
 13. Razzhigaeva N.G., Ganzev L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Kopotova T.A., Rybin A.V., Kharlamov A.A. **2009**. The peat bog of Keto Island: The Middle-Upper Holocene reference section of the Central Kuriles. *Russian Journal of Pacific Geology*, 3(6): 570–584. <https://doi.org/10.1134/s1819714009060050>
 14. Razjigaeva N.G., Ganzev L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Rybin A.V., Nazarova L.B., Arslanov K.A., Maksimov F.E., Petrov A.Yu., Zazovskaya E.P. **2022**. Environmental changes since 14 ka BP in the southernmost Kuril islands (North-Western Pacific) and regional correlation of events. *Journal of Asian Earth Sciences*, 226 (105088). <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2022.105088>
 15. Martynov A.Y., Kimura J.I., Martynov Y.A., Rybin A.V. **2009**. Geochemistry of late Cenozoic lavas on Kunashir Island, Kurile Arc. *Island Arc. USA*, Springer Publ. 19 p. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2009.00684.x>
 16. Rybin A.V., Degterev A.V., Kravchunovskay E.A., Chibisova M.V., Neroda A.S., Melekestsev I.V., Razzhigaeva N.G., Chashchin S.A., Chirkov S.A., Koroteev I.G., Arslanov Kh.A. **2012**. A weak phreatic eruption of June 2010 on Ekarma Volcano, Kuril Islands as a possible precursor of a future large magmatic eruption. *Journal of Volcanology and Seismology*, 6, 290–305. <https://doi.org/10.1134/s0742046312050041>
 17. Martynov Yu.A., Rybin A.V., Degterev A.V., Ostapenko D.S., Martynov A.Yu. **2015**. Geochemical evolution of volcanism of Matua Island in the Central Kurils. *Russian Journal of Pacific Geology*, 9(1): 11–21. <https://doi.org/10.1134/s1819714015010042>
 18. Rybin A.V., Chibisova M.V., Smirnov S.Z., Martynov Y.A., Degterev A.V. **2018**. Petrochemical features of volcanic complexes of Medvezh'ya caldera (Iturup Island, Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(4): 377–385. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.377-385>
 19. Smirnov S.Z., Sokolova E.N., Kuzmin D.V., Timina T.Y., Rybin A.V., Degterev A.V. **2017**. Felsic magmas of the caldera-forming eruptions on the Iturup Island: the first results of studies of melt inclusions in phenocrysts from pumices of the Lvinaya Past and Vetrovoy Isthmus calderas. *Russian Journal of Pacific Geology*, 11(1): 46–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/s1819714017010080>

Артем Владимирович Дегтерев

Марина Владимировна Чибисова

E-mail: d_a88@mail.ru

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

Artem V. Degterev

Marina V. Chibisova

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

ЮБИЛЕИ

**Олег Васильевич Веселов**

21 августа 2024 г. исполнилось 85 лет
одному из старейших работников
Института морской геологии и геофизики
ДВО РАН –
Веселову Олегу Васильевичу.

В Институте Олег Васильевич Веселов с 1965 г., прошел путь от старшего лаборанта до ведущего научного сотрудника, кандидата геолого-минералогических наук. Один из первых и основных исследователей природы глубинного теплового потока Тихоокеанской окраины Азии и дальневосточных морей, он участвовал в геотермических исследованиях в Охотском, Японском, Восточно-Китайском, Южно-Китайском, Филиппинском морях, Тихом и Индийском океанах, в разработке аппаратуры и методики таких исследований; в 34 наземных экспедициях на территории Сахалинской и Амурской областей, Хабаровского и Приморского краев.

Научные результаты этих исследований представлены в более чем 200 публикациях, из которых особо хочется выделить следующие: «Карта теплового потока СССР», «Каталог данных о тепловом потоке Востока Азии, Австралии и запада Тихого океана» (1982 г.), «Геолого-геофизический атлас Курило-Камчатской островной системы» (1987 г.), «Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана» (2003 г.), «Атлас Курильских островов» (2009 г.), электронный «Геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока» (2009–2012).

Олег Васильевич был основным исполнителем в проведении комплексного анализа строения осадочного чехла Охотского моря и Срединно-Курильского прогиба, результатами которого стали монографии «Тектоническое районирование и углеводородный потенциал Охотского моря» (2006 г.) и «Геолого-геофизическая характеристика и нефтегазоносность Срединно-Курильского прогиба» (2009 г.).

На протяжении многих лет Олег Васильевич руководит аспирантами в ИМГиГ ДВО РАН. Его профессионализм, мудрость, терпение, заинтересованное отношение к судьбам молодых людей помогли многим из них стать кандидатами наук.

Как авторитетного специалиста в области геодинамических проблем Дальнего Востока, его постоянно привлекают к рецензированию статей, поступающих в редакции журналов «Тихоокеанская геология», «Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле», «Известия Томского политехнического университета», «Инжениринг георесурсов», «Геосистемы переходных зон».



Геотермические измерения на Восточно-Луговской газосодержащей площади (Анивский район). На снимке сотрудники лаборатории геотермии О.В. Веселов и А.В. Кочергин. 1977 г.



На борту НИС «Морской геофизик», Татарский пролив. 1973 г

В день юбилея в адрес Олега Васильевича было сказано много теплых слов и замечательных пожеланий в знак глубокого уважения и любви тех, кто имел возможность быть и работать с ним рядом. Олег Васильевич – признанный профессионал, тонкий знаток своего дела, человек широкого кругозора. Он замечательный человек, настоящий друг. Коллеги, ровесники и младшее поколение, учатся у него мудрости и терпению, выдержке и устойчивости в сложных ситуациях.

Редколлегия и редакция журнала «Геосистемы переходных зон», коллеги и друзья поздравляют Олега Васильевича с юбилеем и желают еще много-много лет оставаться таким же энергичным и преданным любимой науке.

