

V ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ПРИРОДНЫЕ КАТАСТРОФЫ» г. Южно-Сахалинск, Сахалинская область 27-31 мая 2024 г.



Приглашаем ученых и специалистов, аспирантов и студентов принять участие в конференции «Геодинамические процессы и природные катастрофы», которая состоится 27–31 мая 2024 года в г. Южно-Сахалинск. В 2024 году отмечается 300 лет Российской академии наук, и мы надеемся, что эта конференция гармонично вольется в череду важнейших научных событий в России. Надеемся, что на полях нашего научного форума сможем достойно отметить это событие не только с нашими старыми друзьями, но и с теми учеными, которые еще не посещали остров Сахалин. На конференции планируется обсуждение актуальных научных проблем, которые волнуют ученых не только Дальневосточного региона России. Среди них природные катастрофы, методы оценки их опасности и риска, а также современные технологии геофизического мониторинга в сейсмоактивных и цунамиопасных регионах.

СЕКЦИИ И ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

Исследования Земли против угроз природно-техногенных катастроф на территории Дальнего Востока и Восточной Сибири

- Геологическое строение земной коры и ее отдельных структурных единиц разного масштаба
- Основные этапы и стадии развития земной коры и верхней мантии Азиатско-Тихоокеанского региона
- Вещественный состав (литологический, минеральный, химический, элементный, изотопный) различных геологических сред и объектов
- Поиск и прогнозирование месторождений полезных ископаемых

Круглый стол Геофизический мониторинг и развитие методов прогноза землетрясений

Обсуждение вопросов прогноза землетрясений, наблюдательной сейсмологии, оценки сейсмической опасности, современных движений земной коры, геофизического мониторинга

Динамика моря, вопросы изменения климата

- Потоки вещества и энергии в гидросфере
- Генерации цунами, цунамиопасность
- Моделирование и прогнозы морских опасных явлений в океанах и морях
- Геолого-геоморфологическим аспектам стратегии освоения ресурсов морских побережий Дальнего Востока и восточного сектора Арктики

Живые системы и геологическая среда

- Влияние на живые организмы и экосистемы природного (вулканическая и поствулканическая активность, засуха, засоление, погодные и климатические аномалии и др.) и антропогенного стресса (нерациональное хозяйствование, рекреационная нагрузка)
- Анализ адаптивных стратегий живых организмов под давлением факторов окружающей среды
- Изучение биологического разнообразия и проблемы инвазий как маркеров благополучия окружающей среды, анализ состояния экосистем по данным аэрокосмических исследований Земли

В программе конференции планируются однодневные экскурсии, которые позволят познакомиться с историей и природой острова Сахалин. Более подробную информацию разместим во втором циркуляре.

К началу работы конференции будут изданы тезисы докладов. Объем тезисов не должен превышать одну страницу машинописного текста. Избранные доклады по решению организационного комитета конференции будут рекомендованы для публикации в журнале ИМГиГ ДВО РАН «**Геосистемы переходных зон**» (<http://journal.imgg.ru>), индексируемом РИНЦ и входящем в Перечень ВАК.

РЕГИСТРАЦИЯ УЧАСТНИКОВ

ЗАЯВКА оформляется онлайн на сайте конференции <http://geopronh.ru> или посредством отправки регистрационной формы по адресу geopronh2024@imgg.ru до **1 марта 2024 г.** Файл регистрационной формы прилагается к первому циркуляру конференции, а также размещен на ее официальной странице в сети интернет <http://geopronh.ru>. Образец оформления тезисов доклада приложен к информационному сообщению.

Оргвзнос 5000 руб. оплачивается при регистрации. Для аспирантов и молодых ученых в возрасте до 35 лет **3000 руб.** За счет оргвзноса обеспечивается оргнабор участника конференции и организация кофе-брейков. Информация о гостиницах г. Южно-Сахалинска будет дана во втором циркуляре. Программа конференции будет разослана участникам вместе с третьим циркуляром, а также размещена на сайте конференции.

АДРЕС ОРГКОМИТЕТА:

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

Web-страница конференции:
<http://geopronh.ru>
E-mail: geopronh2024@imgg.ru

ОРГАНИЗАТОР	СО-ОРГАНИЗАТОРЫ		
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН	Питомник растений «Магнолия Парк»	Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН	Сахалинский государственный университет

ОСНОВНЫЕ ДАТЫ:

- до 1 ФЕВРАЛЯ 2024 г. – Второй циркуляр.
- до 1 МАРТА 2024 г. – Заявка на участие в конференции.
- до 1 АПРЕЛЯ 2024 г. – Представление тезисов докладов.
- до 15 АПРЕЛЯ 2024 г. – Третий циркуляр.

Научный журнал

Учредитель и издатель:

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения
Российской академии наук

Издаётся с января 2017 г.

Периодичность издания 4 раза в год

Scientific journal

Founder and Publisher:

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

Published since January 2017

Periodicity: Quarterly

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

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

Журнал:

- индексируется в **Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)**;
- регистрируется в системе **CrossRef**. Научным публикациям присваивается идентификатор – DOI;
- включен в каталог **Ulrich's Periodicals Directory**;
- включен в международную базу научных журналов открытого доступа – **Directory of Open Access Journals (DOAJ)**;
- входит в **Перечень ВАК** – Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

1.6.1. Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика (*геолого-минералогические*)

1.6.3. Петрология, вулканология (*геолого-минералогические*)

1.6.9. Геофизика (*геолого-минералогические; физико-математические*)

1.6.14 Геоморфология и палеогеография (*географические*)

1.6.17. Океанология (*географические; геолого-минералогические; физико-математические*)

1.6.20. Геоинформатика, картография (*физико-математические*)

1.6.21. Геоэкология (*географические; геолого-минералогические*)

1.5.15. Экология (*биологические*)

1.1.8. Механика деформируемого твердого тела (*технические; физико-математические*)

- отнесен в Перечне ВАК к журналам II категории (K2).

The Journal is:

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

1.6.1. General and regional geology. Geotectonics and geodynamics (*Geology and Mineralogy*)

1.6.3. Petrology and volcanology (*Geology and Mineralogy*)

1.6.9. Geophysics (*Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics*)

1.6.14 Geomorphology and Paleogeography (*Geography*)

1.6.17. Oceanology (*Geography; Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics*)

1.6.20. Geoinformatics and cartography (*Physics and Mathematics*)

1.6.21. Geoecology (*Geography; Geology and Mineralogy*)

1.5.15. Ecology (*Biology*)

1.1.8. Mechanics of deformable solids (*Physics and Mathematics; Engineering*)

- it is assigned to the K2 category in the VAK list.

Адрес учредителя и издателя

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

Postal address

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

© ИМГиГ ДВО РАН, 2023

Редакционная коллегия*Главный редактор*

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

Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

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

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

Editorial Board*Editor-in-Chief*

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Executive Secretary

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

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

Редакционная коллегия

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

Editorial Board

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

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

Переводчики **Качесова Галина Сергеевна**
Новикова Татьяна Юрьевна

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. 14.8.
Тираж 150 экз. Заказ 8028. Свободная цена.
Дата выхода в свет 21.12.2023.

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

Translators **Galina S. Kachesova**
Tatiana Yu. Novikova

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 14.8.
Number of copies 150. Order no. 8028. Free price.
Date of publishing 21.12.2023.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

Геофизика. Сейсмология

Н.А. Сычева. Исследование сеймотектонических деформаций земной коры Алтае-Саянской горной области. Часть II . . . 335

Океанология. Геоморфология и палеогеография

Н.Г. Разжигаева, Л.А. Ганзей, Т.А. Гребенникова, А.А. Харламов, А.В. Лоскутов, Р.Ф. Булгаков. Геологические свидетельства проявлений сильных цунами на побережье острова Итуруп (Курильские острова) за последние 3500 лет 357

Геоморфология и палеогеография

Н.Г. Разжигаева, Л.А. Ганзей, Т.А. Гребенникова, Л.М. Мохова, Х.А. Арсланов. Озерные палеоархивы изменений природной среды полуострова Песчаный, Японское море (южное Приморье) 375

Механика деформируемого твердого тела.

Геомеханика

И.А. Пантелеев, В.И. Окунев, В.А. Новиков. Синхронизация мультифрактальных свойств непрерывной акустической эмиссии при подготовке и реализации подвижки по модельному разлому 405

Региональная геология. Геомеханика

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

П.А. Каменев, А.Р. Лукманов. О некоторых закономерностях развития трещиноватости в терригенных породах острова Сахалин 419

Вулканология, петрология

МОНИТОРИНГ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

А.В. Дегтерев, М.В. Чибисова. Вулканическая активность на Курильских островах в 2022 г. 427

Хроника научной жизни

Научное сотрудничество Вьетнамской академии наук и технологий (ВАНТ) и ТОИ ДВО РАН. *Р.Б. Шакиров, Н.С. Сырбу, М.Г. Валитов, Г.Н. Шкабарня, А.Л. Веникова, Н.Л. Соколова, Е.В. Мальцева.* 439

Сахалинская группа реагирования на вулканические извержения (SVERT): 20 лет мониторинга вулканической активности на Курильских островах. *М.В. Чибисова, А.В. Дегтерев, А.В. Рыбин, Ф.А. Романюк.* 448

Тематический и авторский указатели статей, опубликованных в журнале «Геосистемы переходных зон» в 2023 г. (том 7) 454

Geophysics. Seismology

N.A. Sycheva. Study of seismotectonic deformations of the Earth's crust in the Altai-Sayan Mountain region. Part II 335

Oceanology. Geomorphology and Paleogeography

N.G. Razjigaeva, L.A. Ganzey, T.A. Grebennikova, A.A. Kharlamov, A.V. Loskutov, R.F. Bulgakov. Geological evidence of strong tsunami manifestations on the Iturup Island (Kuril Islands) at last 3500 years. 357

Geomorphology and Paleogeography

N.G. Razjigaeva, L.A. Ganzey, T.A. Grebennikova, L.M. Mokhova, Kh.A. Arslanov. Lacustrine paleoarchives of environmental changes of Peschany Peninsula, Sea of Japan (South Primorye) 375

Mechanics of deformable solids.

Geomechanics

I.A. Panteleev, V.I. Okunev, V.A. Novikov. Synchronization of multifractal properties of continuous acoustic emission during the preparation and implementation of dynamic slip in model fault 405

Regional geology. Geomechanics

SHORT REPORT

P.A. Kamenev, A.R. Lukmanov. Patterns of fracturing placement in terrigenous rocks of Sakhalin Island 419

Volcanology, petrology

MONITORING OF GEOLOGICAL HAZARDS

A.V. Degterev, M.V. Chibisova. Volcanic activity on the Kuril Islands in 2022 427

Current scientific events

Scientific cooperation between the Vietnam Academy of Science and Technology (VAST) and POI FEB RAS. *R.B. Shakirov, N.S. Syrbu, M.G. Valitov, G.N. Shkabarnya, A.L. Venikova, N.L. Sokolova, E.V. Malteva.* 439

Sakhalin Volcanic Eruption Response Team (SVERT): 20 years of monitoring of volcanic activity on the Kuril Islands. *M.V. Chibisova, A.V. Degterev, A.V. Rybin, F.A. Romanyuk.* 448

Topical index of articles published in the journal “Geosystems of Transition Zones” in 2023 (volume 7) 455



К 20-летию Чуйского землетрясения

УДК 550.34

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.335-356>
<https://www.elibrary.ru/xkmcum>

Исследование сейсмотектонических деформаций земной коры Алтае-Саянской горной области. Часть II

Н. А. Сычева

E-mail: ivtran@mail.ru

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

Резюме. Статья продолжает изложение результатов исследования сейсмотектонических деформаций (СТД) Алтае-Саянской горной области, опубликованных в предыдущем номере журнала «Геосистемы переходных зон». Она представляет детальные результаты исследования СТД двух зон Алтае-Саянской области: Горного Алтая (области Чуйского землетрясения) и территории, которая включает в себя хр. Академика Обручева, южную часть Восточных Саян и Южное Прибайкалье. Расчет СТД выполнен на основе подходов, предложенных в работах Ю.В. Ризниченко и С.Л. Юнга. Выводы о направленности СТД основаны на данных о фокальных механизмах очагов землетрясений (591 событие), произошедших с 1963 по 2021 г. Для рассматриваемых районов дано описание сейсмичности и построены карты СТД. По картам СТД определены направления осей укорочения и удлинения и отмечен тип деформационных обстановок. На основе усредненных тензоров СТД, полученных для глубин 0–35 км (сейсмогенный слой), построены распределения коэффициента Лодэ–Надаи, угла вида напряженного состояния (угол вида обобщенно-плоской деформации, фазовый угол тензора-девиатора СТД) и вертикальной компоненты. Очаговая область Чуйского землетрясения характеризуется деформацией горизонтального сдвига, через которую проходит полоса с режимом транспрессии (Чаган-Узунский блок). Территория, включающая в себя хр. Академика Обручева, южную часть Восточных Саян и Южное Прибайкалье, по деформационной обстановке делится на две части. Граница проходит вдоль Дархатской впадины: западнее от нее проявляются режимы сжатия, транспрессии и горизонтального сдвига; восточнее – растяжения, транстенсии и переходный режим от вертикального сдвига к растяжению. Чаган-Узунский блок и хр. Академика Обручева испытывают воздымание, а территория восточнее Дархатской впадины – опускание.

Ключевые слова: землетрясение, фокальный механизм, режимы СТД, удлинение и укорочение осей деформаций, интенсивность СТД, коэффициент Лодэ–Надаи, Алтае-Саянская горная область

Study of seismotectonic deformations of the Earth's crust in the Altai-Sayan Mountain region. Part II

Naylya A. Sycheva

E-mail: ivtran@mail.ru

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

Abstract. The article continues to describe the results of the study of seismotectonic deformation (STD) of the Altai-Sayan Mountain region which were presented in previous Issue of «Geosystems of Transition Zones» journal. Given work presents the results of a STD study of two zones of the Altai-Sayan region: the Altai Mountains (the region of the Chuya earthquake) and the territory that includes the Academician Obruchev ridge, the southern part of the Eastern Sayan Mountains and the Southern Baikal region. The STD computation has been performed on the basis of the approaches proposed by well-known publications of Yu.V. Riznichenko and S.L. Yunga. The derivations on STD directions are based on focal mechanisms data (591 events) that occurred from 1963 to 2021). For the considered areas, a description of seismicity is given and STD maps are constructed. According to the STD maps, the directions of the axes of shortening and elongation are determined and the deformation modes is marked. The distributions of the Lode–Nadai coefficient, the angle of kind

of the stressed state (the angle of the generalized plane deformation, the phase angle of STD tensor-deviator) and the vertical component (ZZ) have been constructed using the obtained averaged STD tensors for seismogenic layer of 0–35 km depths. The zone around Chuya earthquake source site is characterized by horizontal shear deformation, with a band of transpression (Chagan-Uzun block) passing through this zone. The territory, which includes Academician Obruchev ridge, the southern part of the Eastern Sayan Mountains and the Southern Baikal region is divided into two parts according to the deformation regime. The boundary runs along the Darkhat depression: the regimes of compression, transpression and horizontal shear occur in zones lying to the west of it; the regimes tension, transtension, and the transitional regime from vertical shear to tension occurs to the east. The Chagan-Uzun block and the Academician Obruchev ridge are uplifted, and the territory to the east of the Darkhat depression is lowered.

Keywords: earthquake, focal mechanism, STD regimes, elongation and shortening of strain axes, STD intensity, Lode–Nadai coefficient, Altai-Sayan Mountain region

Для цитирования: Сычева Н.А. Исследование сейсмотектонических деформаций земной коры Алтае-Саянской горной области. Часть 2. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 4, с. 335–356. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.4.335-356>; <https://www.elibrary.ru/xkmcum>

For citation: Sycheva N.A. Study of seismotectonic deformations of the Earth crust in the Altai-Sayan Mountain region. Part 2. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 4, pp. 335–356. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.4.335-356>; <https://www.elibrary.ru/xkmcum>

Финансирование и благодарности

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (тема № 122040600089-4). Автор признателен рецензентам за конструктивные замечания и рекомендации.

Funding and Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Schmidt Institute of Earth Physics of the Russian Academy of Sciences (theme no. 122040600089-4). The Author would like to thank the respected Reviewers for the constructive suggestions and recommendations.

Введение

27 сентября 2003 г. на территории Горного Алтая в долине р. Чуя в горной перемычке между Чуйской и Курайской впадинами произошло землетрясение с магнитудой $M_S = 7.3^*$, $\phi = 50.06^\circ\text{N}$, $\lambda = 87.97^\circ\text{E}$ [1]. За всю историю сейсмологических наблюдений на юге Горного Алтая землетрясения такой магнитуды не наблюдались [2, 3]. Этому землетрясению посвящено много работ [2–6 и др.]. В 2023 г. исполнилось 20 лет со дня землетрясения, однако оно продолжает вызывать живой интерес в научных кругах. Например, В.А. Ашурков [7] предлагает область Чуйско-Курайского землетрясения сделать полигоном выявления причин возникновения таких событий: «Чуйское землетрясение 2003 года представляет уникальную возможность взглянуть на проблему прогноза землетрясений с иной точки зрения, нежели принято сегодня, поставив во главу угла причину возникновения и процесс (механизм) подготовки землетрясения» [7, с. 58]. Уникальность землетрясения, считает автор, состоит в том, что со времени Чуйского землетрясения 1923 г. прошло 80 лет и этот период можно считать временем

подготовки события 2003 г. «Если отследить от начала зарождения до финальной стадии (сброса накопленной энергии очага) подготовку землетрясения, предоставляется реальная возможность выйти на «засечку» установления оперативного (дни, часы) времени следующего землетрясения в этой области» [7, с. 58]. В работе [5] также рекомендуется всестороннее изучение состояния геологической среды Чуйско-Курайской очаговой зоны с целью дальнейшего прогноза сильных событий в этом районе. В частности, отмечено, что нет оснований полагать, будто сейсмическая активность Северо-Чуйского «треугольника» (очаговая область Чуйского землетрясения) разрешилась сейсмическими ударами 2003 г. Но также нет оснований полагать, что сейсмическая активность Северо-Чуйского «треугольника» будет постоянно поддерживаться на высоком энергетическом уровне сентября–октября 2003 г.

Чуйское землетрясение не только повысило интерес исследователей к этому региону, но и способствовало развитию сети Алтае-Саянского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизи-

* Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2003 год (отв. ред. О.Е. Старовойт). Обнинск: ГС РАН, 2003–2004.

ческая служба Российской академии наук» (АСФ ФИЦ ЕГС РАН). Если до 2003 г. сейсмическая сеть региона насчитывала 26 цифровых сейсмологических станций [8], то на конец 2021 она выросла до 53 станций [9] (рис. 1 а). Расширение сети позволяет наиболее полно регистрировать сейсмические события, происходящие в этом регионе.

На рис. 1 а показаны эпицентры землетрясений, произошедших в Алтае-Саянской горной области. При построении данной карты сейсмичности использовался каталог землетрясений, сформированный из приложений к ежегоднику «Землетрясения России» (<http://www.ceme.gsras.ru/zr/>) за 1997–2021 гг. по регионам «Алтай и Саяны» и «Прибайкалье, Забайкалье» ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.ceme.gsras.ru/new/catalog/>). Каталог включает 18029 землетрясений, он был описан в первой части статьи [10]. Для большей части землетрясений в каталоге приведен энергетический класс, для событий последних лет указывается локальная магнитуда или магнитуда из соответствующих публикаций. Приводимые при рассмотрении землетрясений магнитуды взяты из источников данных об этих землетрясениях. Звездочками на карте отмечены события с $M \geq 6$: Чуйское (2003 г.) и его сильные афтершоки, Култукское (2008 г.), два Тувинских землетрясения (2011 и 2012 гг.), два землетрясения, которые произошли в восточной части Казахстана (2017 и 2019 гг.) и Хубсугульское (2021 г.).

В предыдущей нашей работе по Алтае-Саянской горной области [10] представлены результаты исследования сейсмотектонических деформаций земной коры на этой территории. Выполнена оценка распределения сейсмичности, расчет среднегодовой скорости СТД, выделены области проявления сейсмической активности и интенсивных сейсмотектонических деформаций. На рис. 1 штриховым контуром обозначены области, для которых в первой части статьи [10] были получены наиболее подробные карты СТД (рис. 1 б). Большая часть землетрясений, отмеченных звездочками на рис. 1 а, произошла в выделенных областях: в левой – Чуйское и его сильные афтершоки, в правой – Тувинские, Култукское и Хубсугульское землетрясения. Хубсугульское

землетрясение 2021 г. является крупнейшим на Хубсугульском разломе. В связи с этим событием сейсмически активизирован участок границы древнего Тувино-Монгольского микроконтинента, в котором размещены параллельные рифтовые впадины: Хубсугульская, Дархатская, а также Бусингольская, состоящая из трех линейно вытянутых впадин [11].

Геодинамические процессы Алтае-Саянской горной области и Южного Прибайкалья на основе сейсмологических данных описывались во многих работах [12–20]. Исследования проводились на основе анализа фокальных механизмов сильных землетрясений, либо к сейсмическим данным применялся метод сейсмотектонических деформаций или катакластического анализа. Поле деформации земной коры этого региона по данным ГНСС (Глобальной навигационной спутниковой системы) получено в работах [21–23], результаты оценки напряженного состояния земной коры по геолого-структурным данным описаны в работе [24].

Использование метода СТД на основе подходов, предложенных С.Л. Юнга, позволяет строить карты СТД, где одновременно отображается как направление осей укорочения и удлинения, так и режимы деформации. Такое представление результатов позволяет сравнивать картину СТД как с полем деформации по ГНСС-данным, так и с полем напряжений, рассчитанным на основе МКА (метод катакластического анализа) и других методов, а также сравнивать данные результаты с результатами по СТД, полученными нами [25–27] и другими исследователями для разных регионов мира.

Целью данной работы является анализ сейсмичности и характеристик СТД для двух районов Алтае-Саянской горной области: Горный Алтай и область, включающая хр. Академика Обручева, южную часть Восточных Саян и Южное Прибайкалье.

Первая область вызывает интерес в связи с произошедшим в 2003 г. Чуйским землетрясением. Вторая – в связи с расположением в этой части большинства сильных землетрясений последнего времени, а также активизацией сейсмического процесса на этой территории в связи с Хубсугульским землетрясением. Рассмотрение этих областей в выбранном аспекте

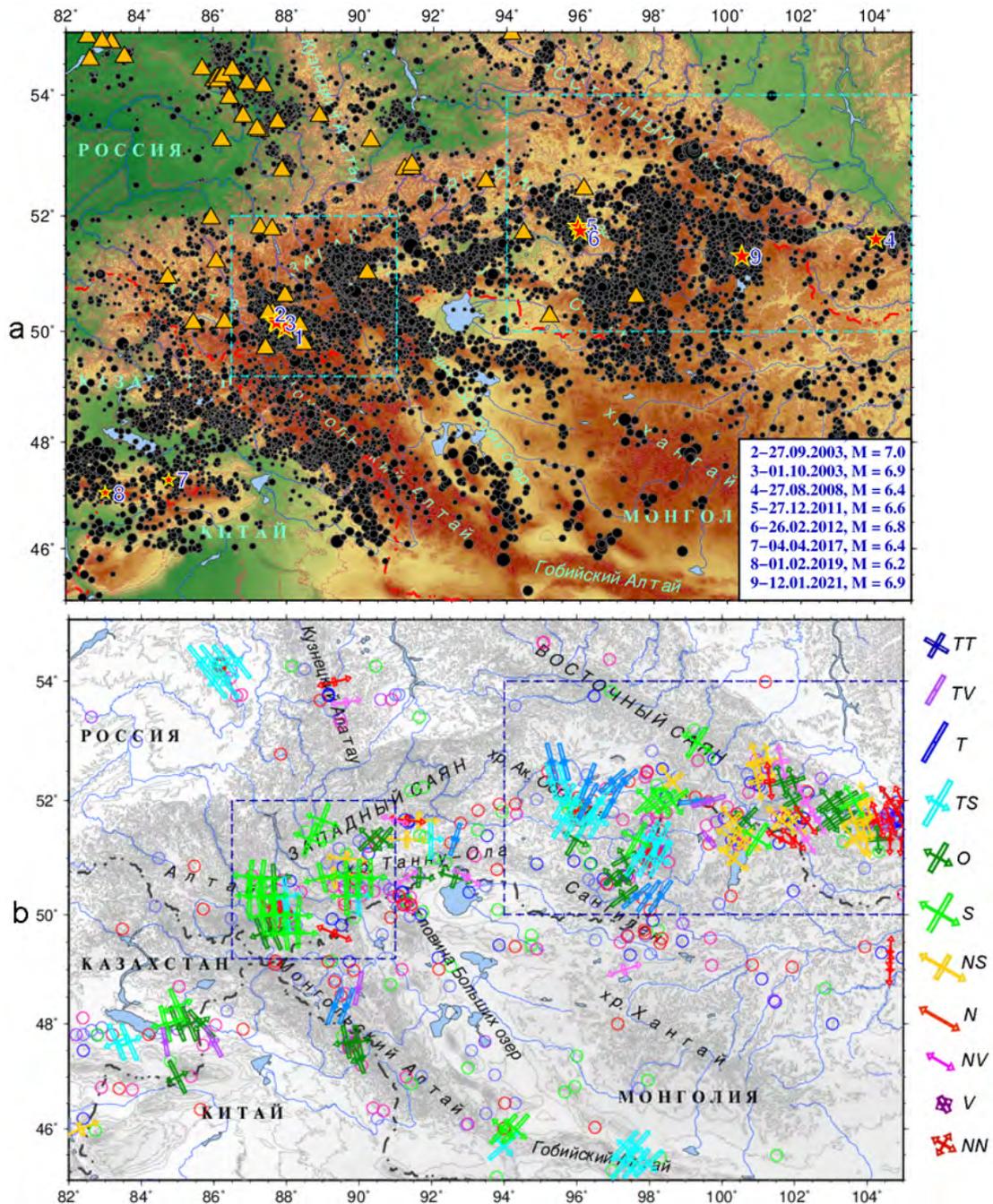


Рис. 1. (а) Эпицентры 18 029 землетрясений, произошедших с 1997 по 2021 г. (каталог ЕГС РАН). Треугольники – положение сейсмических станций АСФ ФИЦ ЕГС РАН. Звездочки – положение землетрясений с $M \geq 6$. Цифры на карте отмечены землетрясения, дата и магнитуда которых приведены в легенде. (б) Карта СТД, построенная по сетке с шагом 0.33° и с радиусом круговой области $R = 0.35^\circ$. Количество узловых точек – 152 (по данным [10]). Здесь и на других картах штрих-пунктирные линии – государственные границы. Классификация режимов СТД: *TT* – всестороннее сжатие, *TV* – переходный режим от вертикального сдвига к сжатию, *T* – сжатие, *TS* – транспрессия, *O* – косой сдвиг, *S* – горизонтальный сдвиг, *NS* – транстension, *N* – растяжение, *NV* – переходный режим от вертикального сдвига к растяжению, *V* – вертикальный сдвиг, *NN* – всестороннее растяжение. Штриховым контуром обозначены области, для которых в первой части статьи [10] были получены наиболее подробные карты СТД.

Fig. 1. (a) Epicenters of 18,029 earthquakes that occurred from 1997 to 2021 (the UGS RAS catalogue). Triangles – the position of seismic stations of the ASB FRC UGS RAS. Asterisks indicate the position of earthquakes with $M \geq 6$. The digits on the map denote the earthquakes, which data and magnitudes are given by the legend. (b) STD map was built on a grid with a step of 0.33° and with a radius of the circular area $R = 0.35^\circ$. Number of nodal points – 152 according to [10]. Here and on other maps, dash-dotted lines – state boundaries. The classification of STD modes: *TT* – all-round compression, *TV* – transitional mode from vertical shift to compression, *T* – compression, *TS* – transpression, *O* – oblique, *S* – horizontal shift, *NS* – transtension, *N* – tension, *NV* – transitional mode from vertical shift to tension, *V* – vertical shift, *NN* – all-round tension. Dashed outline indicate the areas, for which the most detailed STD map in the first part of the article [10] were built.

обеспечено наличием представительной базы данных по фокальным механизмам очагов землетрясений.

Исходные данные и методика

В основе исследований лежит метод расчета сейсмотектонических деформаций с использованием данных о фокальных механизмах очагов землетрясений. Методика расчета СТД, коэффициента Лодэ–Надаи μ_e и угла напряженного состояния ω по С.Л. Юнга (угол вида обобщенно-плоской деформации, фазовый угол тензора-девиатора СТД) представлена в первой части статьи [10], а также в нашей с соавторами монографии [28] и здесь не рассматривается.

Банк данных о фокальных механизмах очагов, используемый в данной статье при расчете, включает в себя 591 землетрясение с $K \geq 9$ (1963–2021 гг.). При описании отдельных землетрясений магнитуда приводится из рассматриваемых источников. Около 25 % землетрясений имеют класс $K = 9.5$ ($M = 3.25$). Наиболее равномерно представлен

период с 1993 по 2003 г. Глубина землетрясений до 35 км. Каталог фокальных механизмов собран из различных источников. Пересчет магнитуды землетрясения в класс осуществлялся по формуле: $K = 1.8M + 4$ [29], эта же зависимость использовалось и при пересчете класса в магнитуду.

Фокальные механизмы землетрясений, произошедших в рассматриваемых областях, представлены на рис. 2: Горный Алтай – 103 события; хр. Академика Обручева, южная часть Восточных Саян и Южное Прибайкалье – 240 событий. Эти события составляют 59 % от всего каталога фокальных механизмов землетрясений Алтае-Саянской горной области [10]. На рис. 2 и на других картах обозначены локальные и региональные разломы по [30].

При проведении расчетов направленности сейсмотектонической деформации посредством осреднения исходных данных геоструктурная область подразделяется на элементарные подобласти с некоторым радиусом, центры которых размещаются в узлах (узловые точки) специально выбранной сетки. Выбор

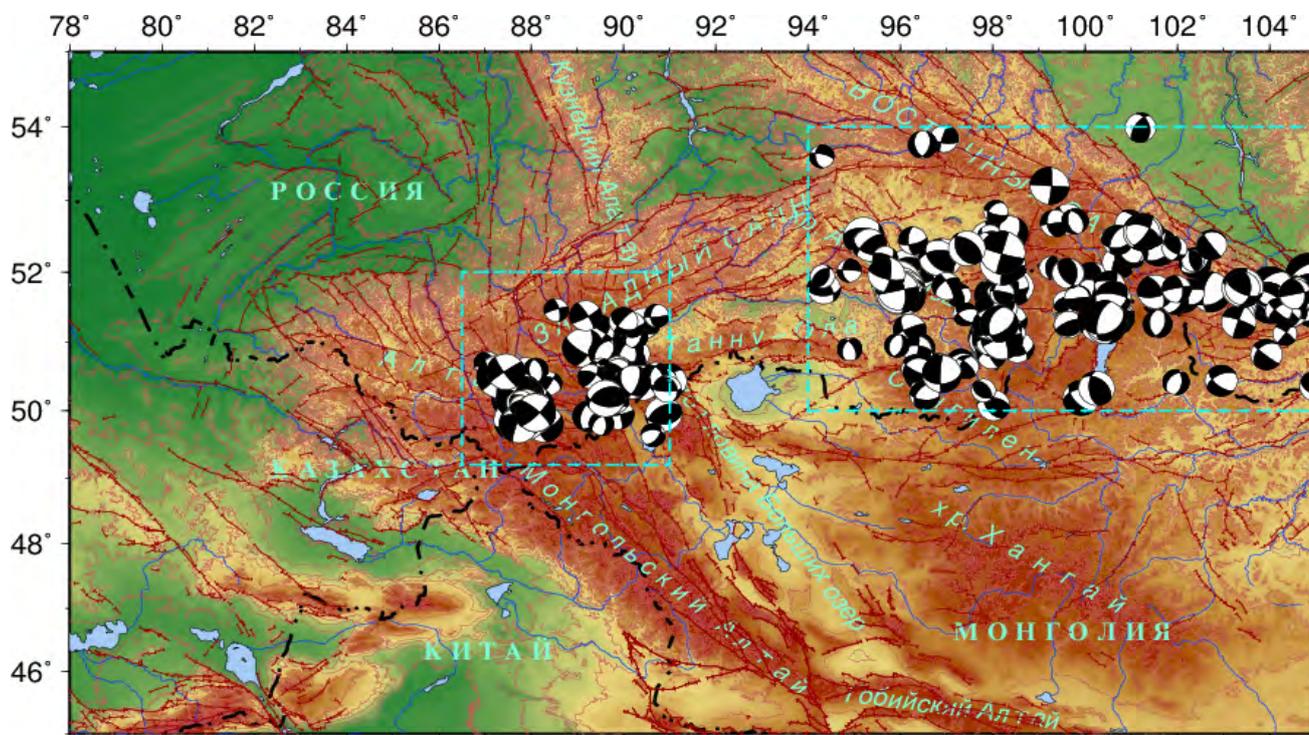


Рис. 2. Фокальные механизмы очагов землетрясений, произошедших на выделенных территориях исследования: область слева – с 1973 по 2019 г; справа – с 1972 по 2021 г. Коричневые линии здесь и серые на других картах – локальные и региональные разломы по [30].

Fig. 2. Focal mechanisms of earthquakes occurred in the specified study areas: on the left – from 1973 to 2019; on the right – from 1972 to 2021. Brown lines herein and grey lines on the maps below denote the location of local and regional faults according to [30].

узловых точек осуществлен по двум сеткам: с шагом 0.2° (~20 км) и с шагом 0.33° (~33 км). В первом случае рассматривается область с радиусом $R = 0.25^\circ$ (~25 км), во втором $R = 0.35^\circ$ (~35 км). Первый набор параметров позволяет выделить локальные особенности, второй приводит к более сглаженной картине.

Результаты

Для территорий, очерченных на рис. 2 прямоугольниками, построены диаграммы распределения азимутов осей сжатия и растяжения, а также графики зависимости числа землетрясений от угла погружения (рис. 3). Значения углов простираения при этом усреднялись с шагом 5° , а углов погружения – с шагом 10° .

Для Горного Алтая (см. рис. 3 а) выделяется два направления оси сжатия – северо-северо-западное и северное, ось растяжения имеет субширотное направление. Количественное распределение числа осей сжатия и растяжения в зависимости от угла погружения имеет

идентичный вид. Положение большей части этих осей близкое к субгоризонтальному.

Для второй рассматриваемой территории (см. рис. 3 б) ось сжатия также имеет два направления – северо-северо-восточное и северо-восточное, ось растяжения меняет свое направление от северо-западного до северо-северо-западного. Положение оси сжатия для 32 % землетрясений субвертикальное (более 50°), для 52 % – субгоризонтальное (до 30°). Положение оси растяжения субвертикальное для 23 % событий и субгоризонтальное для 58 %.

Статистические характеристики параметров осей главных напряжений позволяют определить некоторые закономерности деформационных процессов. Согласно рис. 3, направления осей сжатия и растяжения, а также углы погружения осей для двух рассматриваемых регионов отличаются друг от друга, что может являться отражением разных деформационных обстановок. Ниже представлены описание сейсмичности и результаты расчета СТД для каждого региона отдельно.

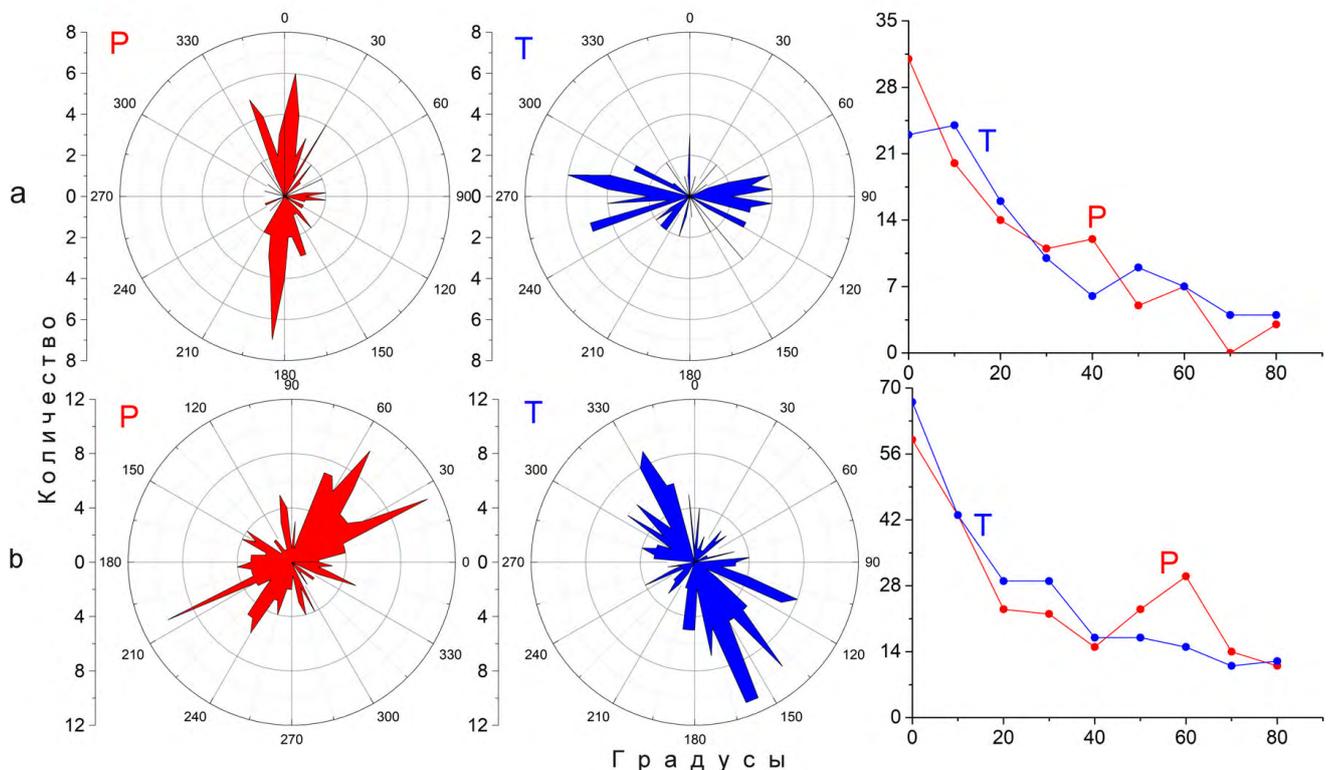


Рис. 3. Диаграммы направлений и количественная зависимость от угла погружения осей сжатия (P) и растяжения (T): а – для Горного Алтая, б – для хр. Академика Обручева, южной части Восточных Саян и Южного Прибайкалья.

Fig. 3. Direction diagrams and quantitative dependence on the plunge angle of the compression (P) and tension (T) axes: а – for Gorny Altai, б – for Academic Obruchev ridge, the southern part of the Eastern Sayany Mountains and the Southern Baikal region.

Горный Алтай (Чуйская и Курайская впадины)

Чуйско-Курайская зона новейших впадин расположена в юго-восточной части Горного Алтая на границе Айгулакско-Курайского и Чуйско-Сайлюгемского поднятий. В пределах зоны Сукорский (Чаган-Узунский) тектонический блок разделяет единую структуру на две крупных депрессии: Курайскую и Чуйскую впадины. Границами зоны являются: с севера – Курайский, с юга – Чарышско-Теректинский глубинные разломы. Восточным ограничением впадины служит дизъюнктив, отделяющий ее от поднятия хр. Чихачёва [31].

Чуйское землетрясение с $M = 7.3$, произошедшее на территории Горного Алтая 27 сентября 2003 г., сопровождалось активным афтершоковым процессом [32]. До него на этой территории отмечались отдельные землетрясения с $M \geq 5$ (рис. 4 а). Одно из них, о котором упоминается во введении, произошло в 1923 г., его положение близко к координатам Чуйского землетрясения 2003 г. В среднем течении р. Чуй, в Курайской впадине и в западной ча-

сти Чуйской впадины в прошлом происходили сильные землетрясения с интенсивностью, соответствующей на поверхности 9-10 баллам [33]. Ранее это только предполагалось на основании сходства сейсмотектонических условий Горного и Монгольского Алтая [34]. Эти землетрясения оставили на поверхности первичные сейсморазрывы и многочисленные сейсмогравитационные дислокации. Закартированные сейсмодислокации на площади длиной 100 и шириной 30 км соответствуют размерам эпицентральной зоны землетрясения с магнитудой >7 [33].

На рис. 4 б представлены эпицентры землетрясений, которые произошли на этой территории после Чуйского события. Звездочками отмечены положения Чуйского землетрясения и его афтершоков, а также землетрясений с $M \geq 6$, произошедших здесь уже в 2012 и 2013 гг. При анализе сейсмичности Алтая и Саян за 2016 г. в [36] отмечена высокая сейсмическая активность в зоне Чуйского землетрясения 2003 г. Наиболее сильное землетрясение в этом районе с $M = 4.2$ ($M_s = 4.2$)

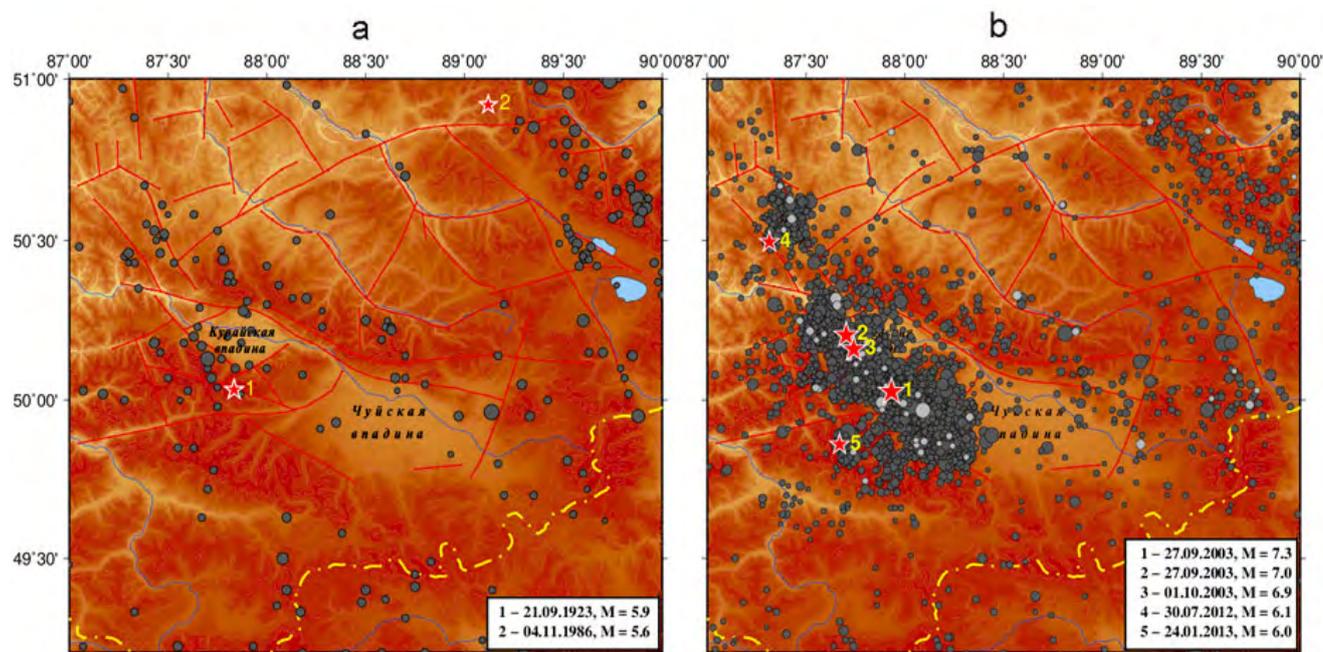


Рис. 4. Эпицентры землетрясений, произошедших с 1923 г. до Чуйского события (27.09.2003, $M = 7.3$) (а) и после него (б). Красные звездочки: слева – эпицентры землетрясений с $M \geq 5$, справа – два главных толчка и афтершоки с $M \geq 6$. Цифрами обозначены землетрясения, для которых указаны дата и магнитуда. Светло-серым на рис. 4 б отмечены землетрясения 2015–2016 гг. (по [35]).

Fig. 4. Epicenters of earthquakes that occurred from 1923 before the Chui event (27.09.2003, $M = 7.3$) (a) and after it (b). Red asterisks: on the left – the epicenters of earthquakes with $M \geq 5$, on the right – two main shocks and aftershocks with $M \geq 6$. The numbers indicate earthquakes, for which the date and magnitude are indicated. Light gray symbols in Fig. 4 b mark the earthquakes in 2015–2016 (according to [35]).

произошло 20.09.2016 вблизи эпицентра главного толчка 2003 г. на стыке Северо-Чуйского и Южно-Чуйского хребтов и Чуйской впадины [35]. Большое количество землетрясений, произошедших в 2015–2016 гг. (на рис. 4 b отмечены светло-серым), свидетельствует об активности всей очаговой зоны Чуйского землетрясения.

Ограниченное число данных по фокальным механизмам не позволяет рассмотреть характеристики СТД как на разных глубинах, так и в разные периоды времени: до Чуйского землетрясения и после него. Период с 1973 до 2003 г. представлен 47 событиями, а с 2003 до 2019 г. – 54.

На рис. 5 приведены карты СТД для двух вариантов расчета, которые позволяют отметить устойчивость результатов расчета и в то же время выделить локальные особенности. Расчет СТД выполнен для слоя 35 км.

Согласно классификации режимов СТД, очаговая область Чуйского землетрясения характеризуется деформацией горизонтального сдвига, в нескольких точках которой отмечается режим транспрессии (рис. 5 а, часть Курайской впадины и Чаган-Узунский блок).

В северной части Чуйской и в восточной части Курайской впадин режим горизонтального сдвига сменяется режимом трансенсии. На рис. 5 b этот режим отсутствует, так как увеличение области осреднения приводит к сглаживанию результата. Режим горизонтального сдвига отмечен и в южной части Шапшальского хребта вдоль долины р. Чулышман. В крайней южной части этой территории проявляется переходный режим от вертикального сдвига к сжатию, а в восточной части – режим сжатия (см. рис. 5 а). Оси укорочения для рассматриваемой территории ориентированы в субмеридиональном направлении.

В работе [37] по материалам сейсмологических исследований с временными сетями станций в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения 2003 г. рассчитано локальное поле тектонических напряжений на основе данных о механизмах очагов афтершоков с помощью МКА [38]. Результаты расчетов представлены по землетрясениям с магнитудами двух диапазонов: $1.0 \leq M_s \leq 3.7$ (420 афтершоков) и $3.8 \leq M_s \leq 5.3$ (82 афтершока) – локальный (линейный размер осреднения до первых ки-

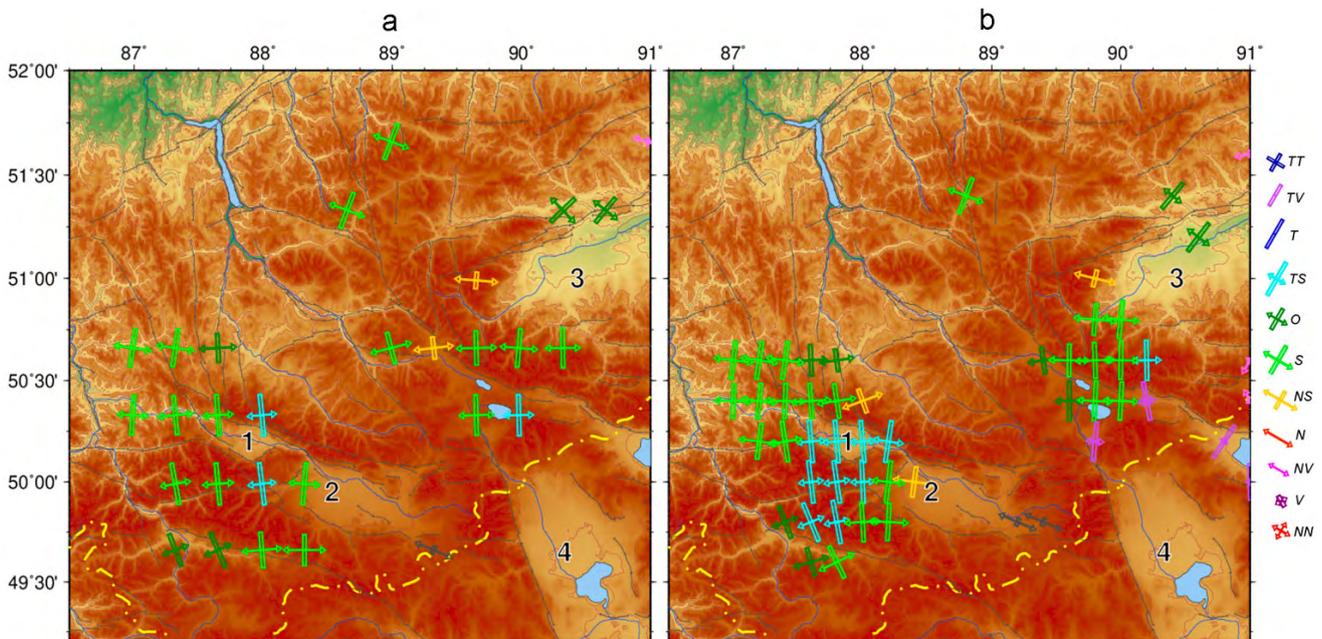


Рис. 5. Карта СТД: (а) – расчет выполнен по узловым точкам, расположенным по сетке с шагом 0.2° и радиусом круговой области $R = 0.25^\circ$; (б) – по сетке с шагом 0.33° и радиусом $R = 0.35^\circ$. Впадины: 1 – Курайская; 2 – Чуйская; 3 – Тувинская; 4 – Котловина Больших озер. Обозначения режимов СТД см. на рис. 1 б.

Fig. 5. STD map: (a) – the computation by nodal points located on a grid with 0.2° step, and a radius of the circular area $R = 0.25^\circ$; (b) – on a grid with 0.33° step and a radius of the circular area $R = 0.35^\circ$. Depressions: 1 – Kuraiskaya; 2 – Chuyskaya; 3 – Tuvinskaya; 4 – Kotlovina Bol'shikh Oser (Basin of the Great Lakes). See in the Fig 1 b the notations of STD modes.

лометров) и субрегиональный (линейный размер осреднения десятки километров) уровни, отвечающие локальной геологической и крупной тектонической структурам соответственно [37].

На верхней панели рис. 6 даны карты СТД и распределение коэффициента Лоде–Надаи μ_c , полученное нами в данной работе*, а на нижней, для сравнения, результаты первого этапа реконструкции напряжений – тип напряженного состояния и распределение коэффициента Лоде–Надаи μ_c из работы [37]. При расчете СТД рассматриваются все землетрясения, попавшие в элементарную область, и вклад каждого определяется весовым коэффициентом. Напомним, что расчет СТД с шагом сетки 0.2° и радиусом круговой области $R = 0.25^\circ$ отображает локальные особенности, а при увеличении шага сетки и радиуса элементарной области результаты сглаживаются. В работе [37] рассматриваются землетрясения локального и субрегионального уровня отдельно. Расчеты СТД, выполненные по сетке с меньшим шагом и меньшим радиусом, будем сравнивать с локальным уровнем из [37], а выполненные по сетке с большим шагом и большим радиусом – с субрегиональным.

По расчетам СТД, для исследуемой территории характерен режим горизонтального сдвига и в двух точках проявляется режим транспрессии (рис. 6 а, верх). Уменьшение шага сетки и радиуса элементарной области приводит к увеличению области с режимом транспрессии (рис. 6 б, верх). По данным [37], на субрегиональном уровне проявляется режим горизонтального сдвига (рис. 6 а, внизу), а на локальном уровне, на фоне режима горизонтального сдвига, появляются две области, для которых отмечены режимы сжатия со сдвигом, сжатия и поддвига (рис. 6 б, внизу). Таким образом, наши результаты не противоречат данным из [37], а некоторые различия обусловлены разным подходом в формировании выборки и выделении области расчета при СТД и МКА (см. об этом в [10]).

Сравнивая наши данные по распределению коэффициента Лоде–Надаи (см. рис. 6 с

и d, верхняя панель) с результатами из работы [37] (см. рис. 6 с и d, внизу), с учетом разного масштаба усреднения, видим, что характерными режимами деформации для очаговой зоны Чуйского землетрясения являются простое сжатие, преобладание простого сжатия и простой сдвиг.

На рис. 7 а представлено распределение коэффициента Лоде–Надаи, угла напряженного состояния ω и вертикальной компоненты усредненных тензоров деформации.

Согласно значению коэффициента Лоде–Надаи, очаговая область Чуйского землетрясения характеризуется сдвиговым режимом, через которую проходит зона преобладания простого сжатия. Южную часть территории Шапшальского хребта с юга характеризует деформация с преобладанием простого сжатия, которая сменяется деформацией простого сдвига, а в северной ее части – деформация с преобладанием простого растяжения.

Распределение угла вида напряженного состояния ω (рис. 7 б) показывает, что зоны, которые характеризуются режимом преобладания простого сжатия, имеют угол близкий к 60° , это также может свидетельствовать о повышенных напряжениях в горизонтальной плоскости. Положительное значение вертикальной компоненты (рис. 7 с) для территории Чаган-Узунского блока указывает на воздымание этой территории.

Согласно построенным картам сейсмичности, наблюдается слабая сейсмичность до 2003 г. и активный сейсмический процесс в очаговой зоне Чуйского землетрясения, продолжающийся до настоящего времени. По картам СТД определены направления осей укорочения и удлинения, а также режимы деформации, характерные для рассматриваемой территории: горизонтальный сдвиг и транспрессия. Судя по распределению коэффициента Лоде–Надаи, исследуемая территория большей частью испытывает деформацию простого сдвига и преобладания простого сжатия. Для большей части рассматриваемой территории характерно воздымание. Область Чаган-Узунского блока характеризуется повышенными напряжениями в горизонтальной плоскости.

* В координатах территории, исследуемой в [37].

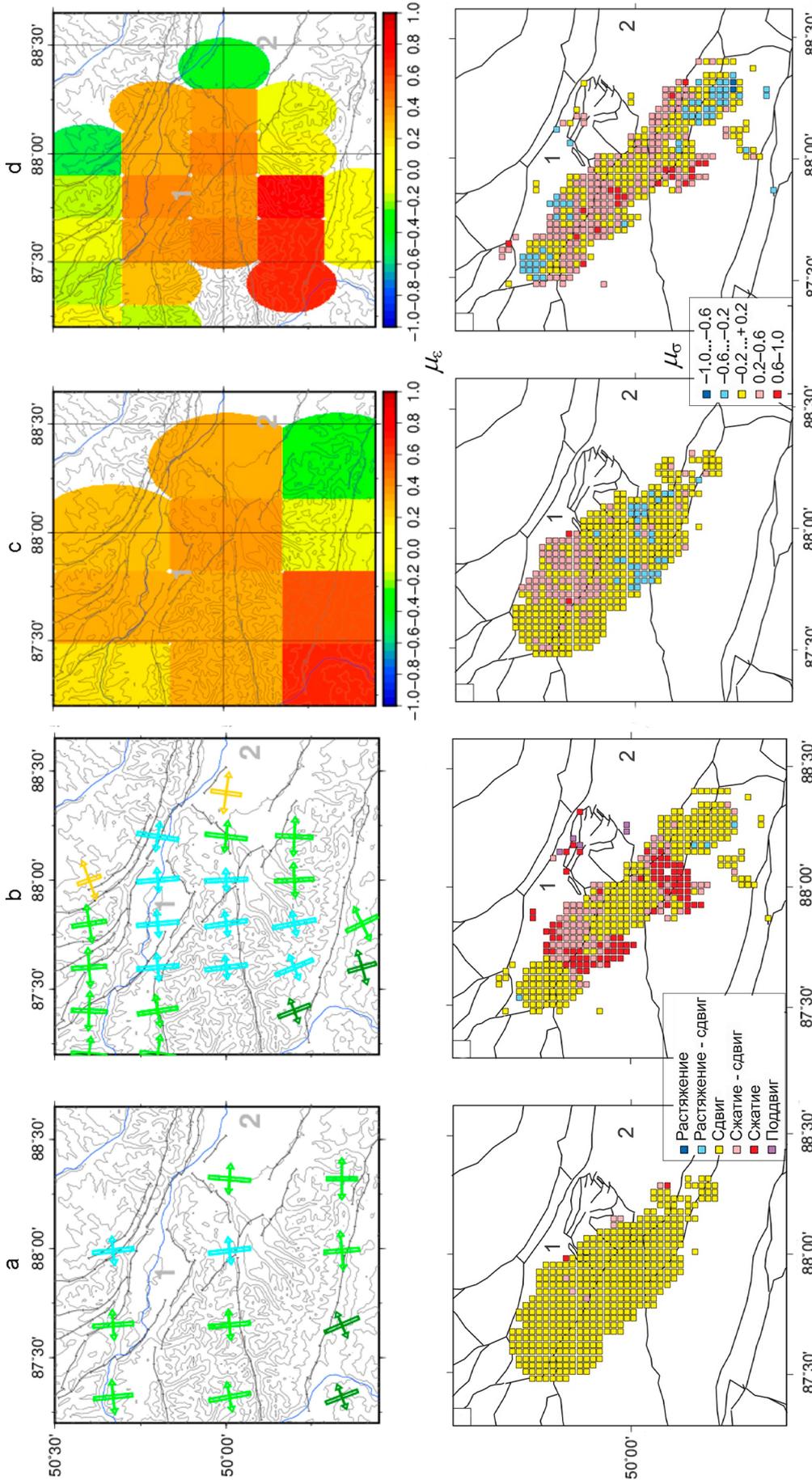


Рис. 6. Верхняя панель: карта STD (a, b) и распределение коэффициента Лодэ-Надаи μ_e (c, d). (a, c) – шаг сетки 0.2° и $R = 0.25^\circ$. Нижняя панель (по [37]): тип напряженного состояния (a, b) и коэффициент Лодэ-Надаи μ_e (c, d). (a, c) – по группе сильных событий с $3.8 \leq M_s \leq 5.3$; (b, d) – по группе слабых событий с $1.0 \leq M_s \leq 3.7$. Впадины: 1 – Курайская; 2 – Чуйская.

Связь значения коэффициента Лодэ-Надаи с режимом STD: $(0.6 < \mu_e \leq 1.0, \text{красный})$ – простое сжатие; $(0.2 < \mu_e \leq 0.6, \text{оранжевый})$ – преобладание простого сжатия; $(-0.2 < \mu_e \leq 0.2, \text{желтый})$ – простой сдвиг; $(-0.6 \leq \mu_e < -0.2, \text{зеленый})$ – преобладание простого растяжения; $(-1.0 \leq \mu_e < -0.6, \text{синий})$ – простое растяжение.

Fig. 6. Upper panel is STD map (a, b) and distribution of the Lode-Nadai coefficient μ_e (c, d). (a, c) – grid step 0.2° and $R = 0.25^\circ$. Lower panel includes maps in accordance with [37]: type of stress state (a, b) and Lode-Nadai coefficient μ_e (c, d). (a, c) – for a group of strong events with $3.8 \leq M_s \leq 5.3$; (b, d) – for the group of weak events with $1.0 \leq M_s \leq 3.7$. The numbers indicate the depressions: 1 – Kuraiskaya, 2 – Chuyskaya.

Relationship between the Lode-Nadai coefficient and the STD regime: $(0.6 < \mu_e \leq 1.0, \text{red})$ – simple compression; $(0.2 < \mu_e \leq 0.6, \text{orange})$ – predominance of simple compression; $(-0.2 < \mu_e \leq 0.2, \text{yellow})$ – simple shift; $(-0.6 \leq \mu_e < -0.2, \text{green})$ – predominance of simple tension; $(-1.0 \leq \mu_e < -0.6, \text{blue})$ – simple tension.

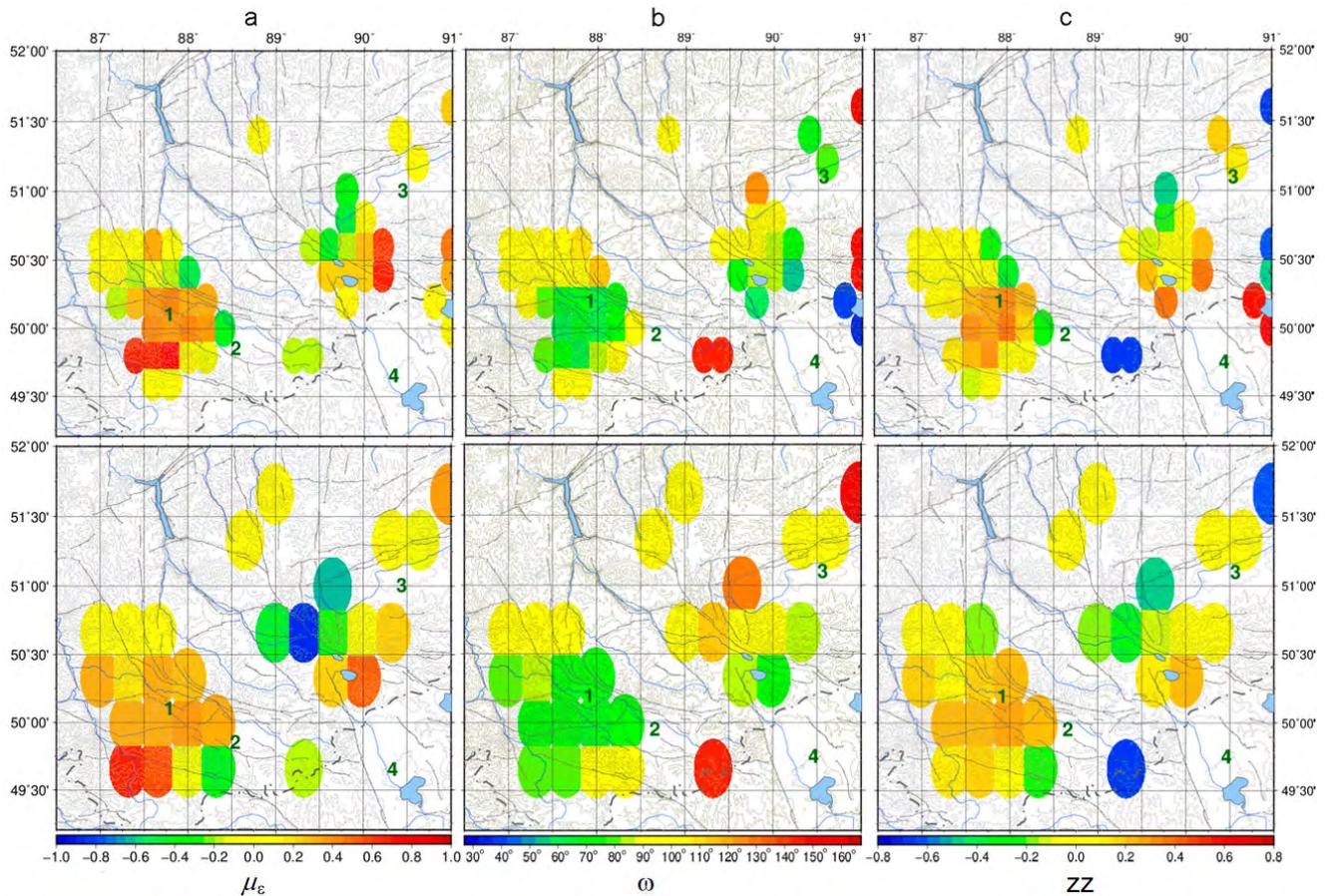


Рис. 7. Распределение параметров СТД. Верхняя панель – расчет выполнен по сетке с шагом 0.2° и $R = 0.25^\circ$; нижняя – с шагом 0.33° и $R = 0.35^\circ$.

(а) коэффициент Лодэ–Надаи μ_ϵ : ($0.6 < \mu_\epsilon \leq 1.0$, красный) – простое сжатие; ($0.2 < \mu_\epsilon \leq 0.6$, оранжевый) – преобладание простого сжатия; ($-0.2 < \mu_\epsilon \leq 0.2$, желтый) – простой сдвиг; ($-0.6 \leq \mu_\epsilon < -0.2$, зеленый) – преобладание простого растяжения; ($-1.0 \leq \mu_\epsilon < -0.6$, синий) – простое растяжение.

(б) угол вида напряженного состояния ω : ($\omega = \pi/6$) – напряжение главного сжатия горизонтально, синий; ($\omega = 5\pi/6$) – растягивающее напряжение горизонтально, красный; ($\omega = \pi/2$) – оси максимального растяжения и сжатия лежат в горизонтальной плоскости, желтый, зеленый и розовый отражают промежуточное положение плоскости напряжения главного сжатия или растяжения.

(с) вертикальная компонента zz : ($0 < zz \leq 1$) – воздымание; ($-1 \leq zz < 0$) – опускание.

Впадины: 1 – Курайская, 2 – Чуйская, 3 – Тувинская, 4 – Котловина Больших озер.

Fig. 7. Distribution of STD parameters. Upper panel is developed on a grid with a step of 0.2° and with $R = 0.25^\circ$; lower panel – with a step of 0.33° and with $R = 0.35^\circ$.

(a) Lode–Nadai coefficient μ_ϵ : ($0.6 < \mu_\epsilon \leq 1.0$, red) – simple compression; ($0.2 < \mu_\epsilon \leq 0.6$, orange) – predominance of simple compression; ($-0.2 < \mu_\epsilon \leq 0.2$, yellow) – simple shift; ($-0.6 \leq \mu_\epsilon < -0.2$, green) – predominance of simple tension; ($-1.0 \leq \mu_\epsilon < -0.6$, blue) – simple tension.

(b) the angle of kind of the stressed state ω : ($\omega \leq \pi/6$) – horizontal main compression stress, blue; ($\omega \geq 5\pi/6$) – horizontal tensile stress, red; ($\omega = \pi/2$) – axes of maximum tension and compression lie in the horizontal plane, yellow, green and pink display the intermediate position of the stress plane of the main compression or tension.

(c) the vertical component zz : ($0 < zz \leq 1$) – uplift; ($-1 \leq zz < 0$) – lowering.

Depressions: 1 – Kuraiskaya, 2 – Chuiskaya, 3 – Tuvinskaya, 4 – Kotlovina Bol'shikh Ozer.

Хребет Академика Обручева, южная часть Восточных Саян и Южного Прибайкалья

Алтае-Саянская горная область на востоке соприкасается со структурами Байкальской рифтовой зоны [39]. Эти два региона характеризуются разным геодинамическим

режимом, что отражается на динамике сейсмического процесса. В Байкальской рифтовой зоне землетрясения большей частью происходят внутри впадин. Механизм формирования растягивающих напряжений внутри рифтовых впадин определяется во многом состоянием мантийного вещества под рифтовыми зонами

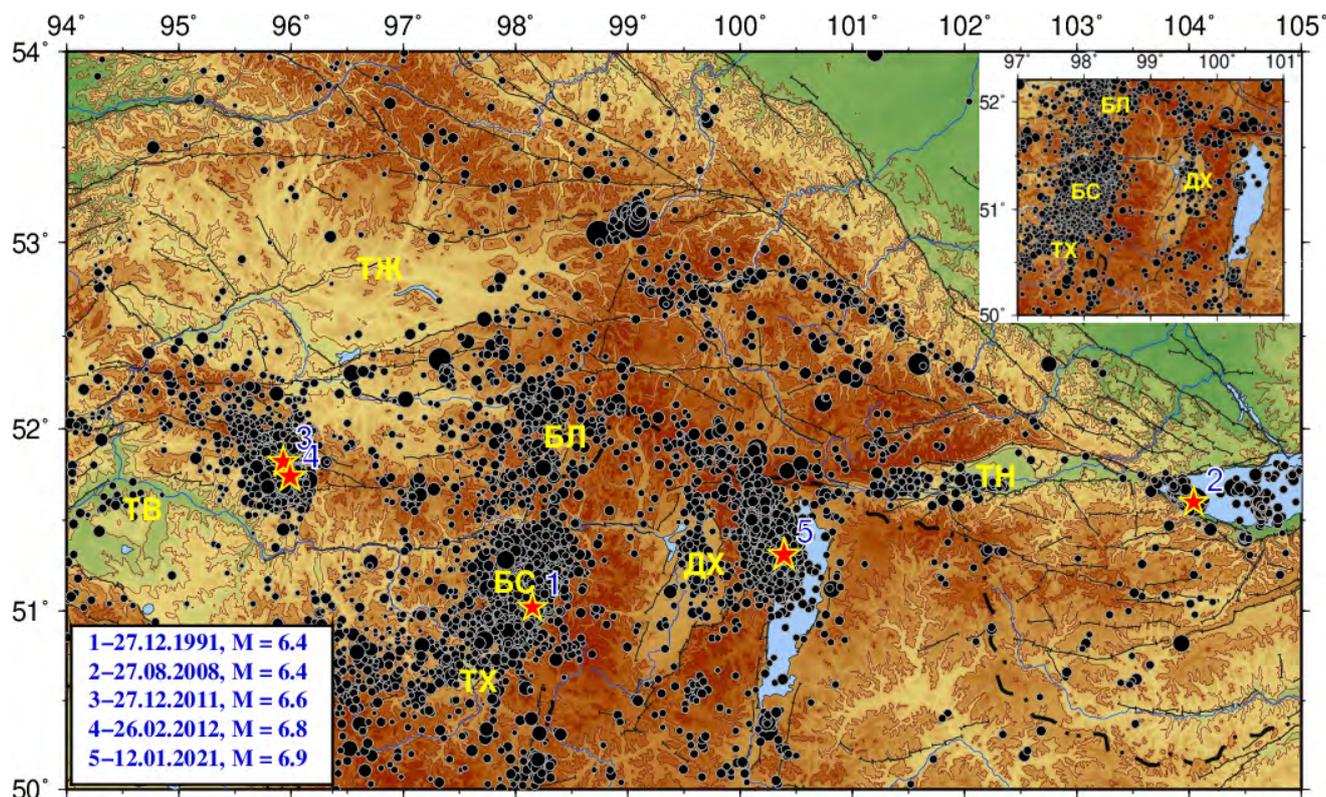


Рис. 8. Эпицентры землетрясений из каталога землетрясений (1997–2021 гг.). Звездочками отмечены эпицентры землетрясений с $M \geq 6$. Впадины: ТЖ – Тоджинская, ТВ – Тувинская, ДХ – Дархатская, ТН – Тункинская, ТХ – Терехольская, БС – Бусингольская, БЛ – Белинская.

Fig. 8. Earthquake epicenters from the catalog of earthquakes (1997–2021). Asterisks show the epicenters of earthquakes with $M \geq 6$. Depressions: ТЖ – Todzhinskaya, ТВ – Tuvinskaya, ДХ – Darkhatskaya, ТН – Tunkinskaya, ТХ – Terekholskaya, БС – Busingolskaya, БЛ – Belinskaya.

[31, 39]. Граница, разделяющая области с разной динамикой сейсмического процесса, проходит вдоль системы, состоящей из трех впадин – Бусингольской, Дархатской и впадины оз. Хубсугул. Бусингольская впадина является пограничной структурой между крупными регионами с различными типами источников сейсмической энергии [39].

На рис. 8 представлены эпицентры землетрясений из каталога землетрясений ЕГС РАН (1997–2021 гг.). Зоны сейсмической активности находятся на хр. Академика Обручева, в области, включающей систему из трех впадин – Терехольской, Бусингольской и Белинской, и в Южном Прибайкалье. Цепочка землетрясений отмечается вдоль Главного Саянского разлома, в Дархатской и Тункинской впадинах.

Наибольшей активностью в рассматриваемом регионе характеризуется зона Восточно-Тувинского нагорья [31], расположен-

ная на крайнем востоке Тувы. Она тяготеет к Белино-Бусингольской межгорной впадине, примыкающей к юго-западному флангу Байкальской рифтовой системы. Сейсмическая активность A_{10}^* , по данным [31], в южной части этой зоны достигает максимальных в Алтае-Саянской области значений, равных 0.4. К землетрясениям этой территории с $M \geq 6$ относятся Култукское, Тувинские землетрясения и Хубсугольское. На карте также показан эпицентр Бусингольского землетрясения 27 декабря 1991 г. (по данным <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>), которое не включено в используемый каталог. Перечисленные зоны сейсмической активности связаны большей частью с афтершоковой деятельностью этих землетрясений.

Бусингольское землетрясение с $M_s = 6.5$ [43] произошло 27 декабря 1991 г. к востоку от одноименной впадины, в Шишхидском

* Число слабых землетрясений энергетического класса $K = 10$ в год на площади 10^3 км².

нагорье. Афтершоковый процесс приурочен к разлому, разделяющему блоки горного обрамления и под острым углом примыкающему к Бусингольской впадине. Это опережающий разлом для Бусингольского разлома. Землетрясение привело к существенному изменению режима всей Белино-Бусингольской зоны. Главной особенностью сейсмической активизации, вызванной Бусингольским землетрясением, является ее пульсирующий характер по всей длине Бусингольской впадины, чего не наблюдалось за инструментальный период для других землетрясений такого же класса [44]. Сейсмическая активность продолжается. Сейсмичность впадины то ослабевает, то усиливается. Можно выделить около десятка циклов рассматриваемой активизации. Циклы активизации в 2004–2005 гг. в этой зоне по энергии оказались интенсивнее, чем активизации нескольких предыдущих лет. Такая активизация вряд ли может быть отнесена к афтершоковому процессу крупного землетрясения [44].

27 августа 2008 г. в районе юго-западного замыкания оз. Байкал произошло *Култукское землетрясение* с $M_w = 6.3$, которое стало весьма заметным и важным событием в сейсмической жизни Южного Прибайкалья. Как отмечено в [40], за более чем полувековой период инструментальных наблюдений во всей акватории озера кроме указанного события было зарегистрировано всего два землетрясения с $M \geq 6.0$: Среднебайкальское 29.08.1959 с $M = 6.8$, $I_0 = 9$ [41] и Южнобайкальское 25.02.1999 с $M_w = 6.0$, $I_0 = 8$. С момента главного толчка до конца года было зарегистрировано около 1800 афтершоков с $K_r \geq 4$ [42]. Следует отметить, что Култукское землетрясение не предварялось форшоками.

Первое Тувинское землетрясение произошло 27 декабря 2011 г., примерно в 100 км восточнее г. Кызыл. После непродолжительного афтершокового процесса, два месяца спустя – 26 февраля 2012 г., практически в той же эпицентральной зоне произошло *второе* землетрясение [45, 46]. Тувинские землетрясения приурочены к осевой части горной цепи, получившей название хребет Академика Обручева. За полвека инструментальных сейсмологи-

ческих наблюдений (с 1963 г.) хр. Академика Обручева в сейсмическом отношении проявил себя умеренно активным. В 1960–1980-х годах здесь неоднократно происходили землетрясения с умеренными магнитудами ($M = 4–5.5$).

Хубсугульское землетрясение 12 января 2021 г. с магнитудой $M_L = 6.9$ [11] произошло на восточной границе Тувино-Монгольского блока. Оно вызвало интенсивный афтершоковый процесс (каталог ЕГС РАН за 2021 г. насчитывает более 6000 событий). В связи с этим землетрясением сейсмически активизирован участок границы вышеуказанного блока, в котором размещены параллельные рифтовые впадины Хубсугульская, Дархатская, а также Бусингольская, состоящая из трех линейно вытянутых впадин. До сих пор район Бусингольской впадины отличался высокой сейсмичностью, район Дархатской – умеренной и Хубсугульской – пониженной сейсмичностью (см. врезку на рис. 8, данные за 1997–2020 гг.).

Карты СТД для исследуемой территории построены по двум наборам параметров расчета (рис. 9). Рассмотрим направление осей укорочения и удлинения, а также режимы СТД. При движении с запада на восток направление осей укорочения меняется от северо-северо-восточного в западной части на северо-восточное в восточной. Также наблюдается уменьшение величины (длины) оси укорочения и увеличение оси удлинения. На рис. 9 а звездочками отмечены положения эпицентров землетрясений с $M > 6$, указанных в легенде к рис. 8. Для каждого из этих событий показаны фокальные механизмы очагов. Оси главных напряжений механизмов отражают региональное направление осей сжатия и растяжения. Направление осей укорочения и удлинения по данным СТД в областях расположения рассматриваемых землетрясений совпадает с направлением осей сжатия и растяжения представленных механизмов.

В области хр. Академика Обручева проявляется два режима деформации: сжатие и транспрессия. В районе Белинской впадины расположена зона с деформацией горизонтального сдвига; в области Бусингольской

* K_r – класс землетрясения по Раутиан.

впадины – режим транспрессии; в районе Терехольской впадины – режим косого сдвига (oblique), который стоит обособленно по классификации режимов STD [47], а южнее, на горе Сангилен, – режим транспрессии. Для

северной части территории оз. Хубсугул характерен режим транстенсии (район очаговой области Хубсугульского землетрясения, 2021 г.). В западной части Тункинской впадины также наблюдается режим транстенсии, восточнее

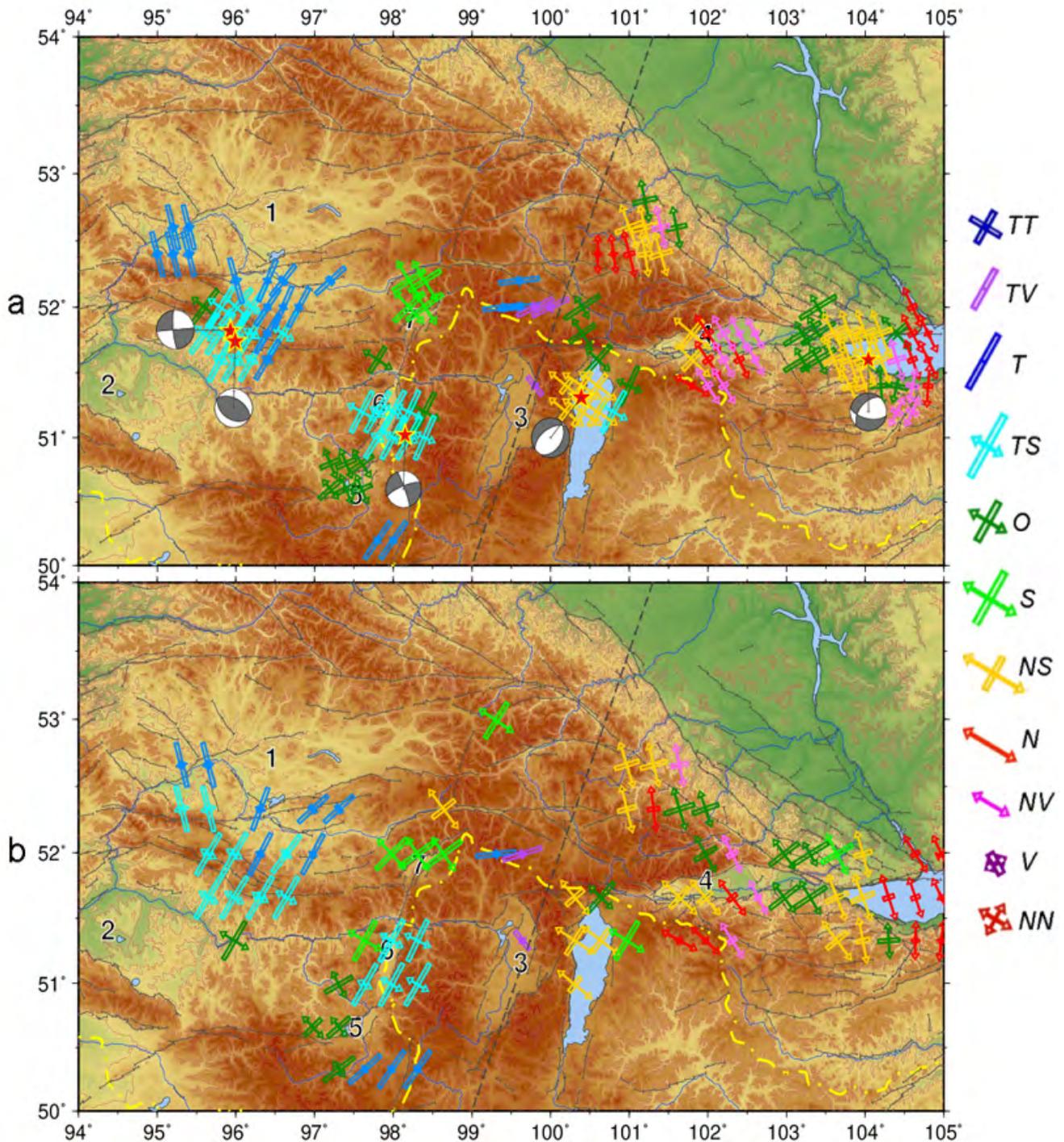


Рис. 9. Карта STD: (а) – расчет выполнен по узловым точкам, расположенным по сетке с шагом 0.2° и радиусом круговой области $R = 0.25^\circ$; (б) – по сетке с шагом 0.33° и радиусом $R = 0.35^\circ$. Впадины: 1 – Тоджинская, 2 – Тувинская, 3 – Дархатская, 4 – Тункинская, 5 – Терехольская, 6 – Бусингольская, 7 – Белинская. Обозначения режимов STD см. на рис. 1 б.

Fig. 9. STD map: (a) – computed by nodal points located along the grid with a step of 0.2° and a radius of the circular area $R = 0.25^\circ$; (b) – on a grid with a step of 0.33° and radius $R = 0.35^\circ$. Depressions: 1 – Todzhinskaya, 2 – Tuvinskaya, 3 – Darkhatskaya, 4 – Tunkinskaya, 5 – Terekholskaya, 6 – Busingolskaya, 7 – Belinskaya. STD modes notations are shown in the Fig. 1 b.

сменяемый режимом растяжения; в центральной части – режим от вертикального сдвига к растяжению и в восточной – режим косого сдвига. В южной части Южного Прибайкалья с запада на восток режим трансенсии сменя-

ется переходным режимом от вертикального сдвига к растяжению и далее переходит в режим растяжения.

На картах СТД (рис. 9 и 10) штриховая линия разделяет области с проявлением разных

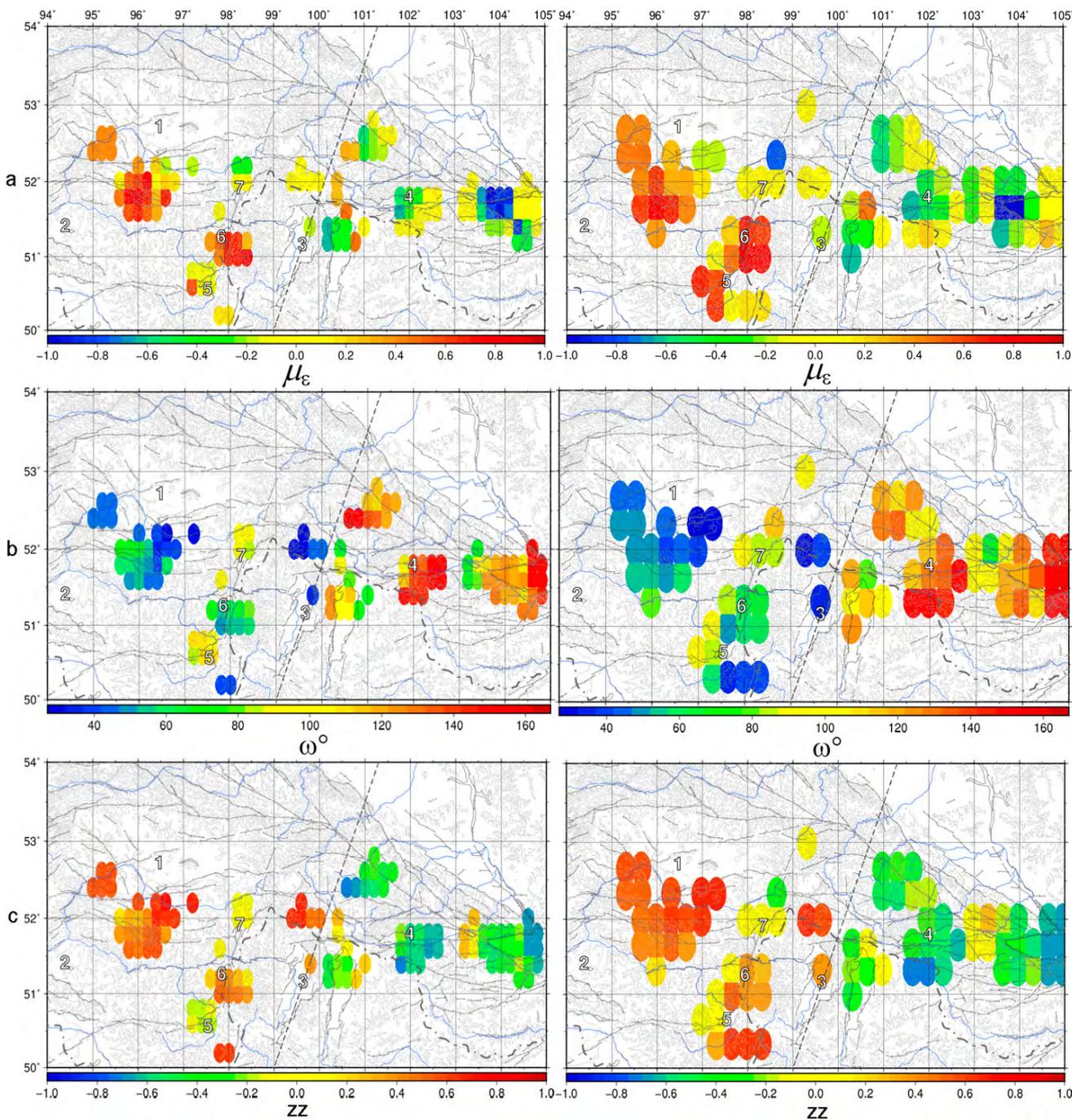


Рис. 10. Распределение параметров СТД, рассчитано: слева – по сетке 0.2° с $R = 0.25^\circ$, справа – по сетке 0.33° с $R = 0.35^\circ$. (а) – Лоде–Надаи μ_ϵ , (б) – угол вида напряженного состояния ω , (с) – вертикальная компонента. Впадины: 1 – Тоджинская, 2 – Тувинская, 3 – Дархатская, 4 – Тункинская, 5 – Терехольская, 6 – Бусингольская, 7 – Белинская. Связь значений параметров μ_ϵ , ω и zz с режимами СТД см. на рис. 7.

Fig. 10. Distribution of STD parameters, determined: on a grid 0.2° , with $R = 0.25^\circ$ – on the left; and that on a grid 0.33° , with $R = 0.35^\circ$ – on the right. (a) – Lode–Nadai μ_ϵ , (b) – the angle of kind of the stressed state ω , (c) – vertical component. Depressions: 1 – Todzhinskaya, 2 – Tuvinskaya, 3 – Darkhatskaya, 4 – Tunkinskaya, 5 – Terekholskaya, 6 – Busingolskaya, 7 – Belinskaya. The relationship of the values of the parameters μ_ϵ , ω and zz with the STD modes, see in Fig. 7.

режимов деформации: западнее от линии – режим сжатия, транспрессии и горизонтального сдвига; восточнее – растяжения, транстенсии и переходный режим от вертикального сдвига к растяжению и от горизонтального сдвига к растяжению. То есть западнее проявляются режимы, включающие в себя в той или иной степени компоненту сжатия, а восточнее – компоненту растяжения. Разные режимы деформации, а также различия в направлении и длине осей укорочения и удлинения относительно штриховой линии указывают на разный геодинамический режим в разделенных линией областях.

Рассмотрим поведение других параметров СТД в рассматриваемой области. На рис. 10 представлено распределение коэффициента Лоде–Надаи, угла вида напряженного состояния и вертикальной компоненты усредненных тензоров деформации.

Согласно значениям коэффициента Лоде–Надаи μ_e (который отражает деформацию в целом) (рис. 10 а), для западной части (относительно штриховой линии) характерен режим преобладания простого сжатия, а для восточной – режим преобладания простого растяжения и простого сдвига.

На большей части территории западнее линии разделения значение угла вида напряженного состояния ω не превышает 40° (рис. 10 б), что указывает на повышенные напряжения сжатия в горизонтальной плоскости, а в восточной части значение угла ω превышает 110° , что указывает на горизонтально растягивающее напряжение.

Согласно распределению вертикальной компоненты усредненных тензоров деформации (рис. 10 с), западная часть испытывает воздымание, а восточная – опускание.

Штриховая линия на рис. 9 и 10 четко разделяет области с резко различными значениями рассматриваемых параметров СТД и указывает на разный механизм формирования напряжений для этих областей. Это различие отмечено во многих работах [31, 39 и др.]. По расчетам СТД граница, разделяющая области с разным режимом деформации, проведена вдоль Дархатской впадины (см. рис. 9). В работе [39] в качестве структуры, разграничивающей регионы с различными типами ис-

точников сейсмической энергии, обозначена Бусингольская впадина. Отсутствие данных по СТД между Бусингольской и Дархатской впадиной не позволяет нам провести более точную границу между этими регионами.

Карты распределения различных параметров СТД для двух рассматриваемых областей показывают различия в их геодинамических обстановках. Для территории Горного Алтая (области Чуйского землетрясения) наблюдается незначительный разброс в исследуемых параметрах СТД и стабильное субмеридиальное направление оси укорочения (см. рис. 5) и оси сжатия (см. рис. 3 а). Вторая территория характеризуется различным напряженно-деформированным состоянием в западной и восточной областях.

Неоднородность поля напряжений, полученного на основе геолого-структурных и морфоструктурных данных, отмечается в работе [24]. Авторы отмечают, что наблюдаемая неоднородность обусловлена наличием различных источников тектонических сил или сочетанием этих воздействий на исследуемой территории.

Наши результаты согласуются с данными и других исследователей. В частности, при рассмотрении фокальных механизмов очагов и сейсмостектонических деформаций в работе [31] отмечено, что «в целом Алтае-Саянская область находится в условиях фонового горизонтального сжатия, но, несмотря на это, на территории встречаются блоки "рифтового" или грабенового типа с близгоризонтальными максимальными удлинениями и близвертикальными максимальными укорочениями» [31, с. 77]. В этой же работе авторами выявлены два крупных блока «орогенного» типа с близвертикальным удлинением и близгоризонтальным укорочением. Один из блоков расположен в пределах хр. Академика Обручева с прилегающей к нему с юга территорией. Исходя из ориентации осей удлинения и укорочения (см. рис. 9), в пределах хр. Академика Обручева нами также отмечено близгоризонтальное максимальное укорочение и близвертикальное максимальное удлинение. В районе же восточнее штриховой линии, где сейсмичность обусловлена рифтогенезом, наблюдается противоположная картина – близгоризонтальное удлинение и близвертикальное укорочение.

Реконструкции природных напряжений земной коры Алтае-Саянской горной области, выполненные с помощью МКА на основе данных о механизмах очагов более 300 землетрясений [20], также показали существенную неоднородность напряженного состояния, выражающуюся в изменчивости простирания и погружения главных осей тензора напряжений, определяющих изменение геодинамического режима земной коры. Таким образом, результаты, полученные в нашей работе, согласуются с данными других исследователей.

Главным результатом настоящей работы является построение карт СТД для Алтае-Саянской горной области [10] и отдельных ее регионов, а также Южного Прибайкалья с использованием классификации режимов СТД, предложенной С.Л. Юнга. Карты позволяют представить напряженно-деформированное состояние среды в целом (а не по отдельным компонентам тензора деформации), что может быть удобно для использования специалистами других областей – геодезии, геофизики и геологии.

Заключение

Методом расчета сейсмотектонических деформаций изучены параметры напряженно-деформированного состояния Алтае-Саянской горной области. Основные результаты по исследованию этой территории представлены в первой части статьи. Плотность представления данных по фокальным механизмам позволила во второй части статьи получить более подробные карты СТД для территории Горного Алтая (очаговая область Чуйского землетрясения) и территории, которая включает в себя хр. Академика Обручева, южную часть Восточных Саян и Южное Прибайкалье. Определены направления осей укорочения, удлинения и режимы деформации для рассматриваемых территорий. Наряду с картами СТД построены карты распределения коэффициента Лоде–Надаи, угла вида напряженного состояния и вертикальной компоненты.

Очаговая область Чуйского землетрясения является зоной деформации горизонтального сдвига, через нее проходит полоса с режимом транспрессии (Чаган-Узунский блок). Оси укорочения на этой территории имеют субмеридиональное направление. Согласно значению

коэффициента Лоде–Надаи, очаговую область Чуйского землетрясения характеризует сдвиговый режим, через нее проходит зона, в которой преобладает режим простого сжатия. Значения угла вида напряженного состояния ω на территории Чаган-Узунского блока близки к 60° , что свидетельствует о повышенных напряжениях в горизонтальной плоскости, а положительное значение вертикальной компоненты в этой области указывает на воздымание этой территории.

Область, которая включает в себя хр. Академика Обручева, южную часть Восточных Саян и Южное Прибайкалье, по режиму деформации делится на две части. Граница проходит вдоль Дархатской впадины: западнее от нее проявляются режимы, включающие в себя в той или иной степени компоненту сжатия (сжатие, транспрессия и горизонтальный сдвиг), а восточнее – компоненту растяжения (растяжение, транстенсия и переходный режим от вертикального сдвига к растяжению), что указывает на разный механизм формирования напряжений в этих областях. Значения вертикальной компоненты усредненных тензоров деформации свидетельствуют, что западнее Дархатской впадины территория испытывает воздымание, а восточнее – опускание.

Настоящая работа позволила оценить сейсмотектонические деформации в областях с хорошим покрытием данными по фокальным механизмам и указала на дефицит подобных данных для получения более подробной деформационной модели земной коры Алтае-Саянской горной области в целом и необходимость накопления сведений об очаговых параметрах землетрясений, происходящих на этой территории.

Список литературы

1. Каталог землетрясений Алтая и Саян за 2003 год. **2006**. Филина А.Г., Подкорытова В.Г., Лескова Е.В. (отв. сост.), Денисенко Г.А., Кузнецова Н.В., Манушина О.А., Подлипская Л.А., Шевелёва С.С., Шевкунова Е.В., Шаталова А.О. *Землетрясения России в 2003 году*. Обнинск: ГС РАН. (См. Приложение к наст. сб. на CD). (In Russ.). URL: http://www.gsras.ru/zr/uploads/files/2003/2003-ER_p055-064.pdf
2. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Фатеев А.В., Филина А.Г. **2009**. Чуйское землетрясение 27 сентября 2003 года

- с $M_s = 7.3$, $K_r = 17$ (Горный Алтай). *Землетрясения Северной Евразии в 2003 году*, 12. Обнинск: ГС РАН, с. 326–343.
3. Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Мараханов А.В., Ушанова Е.А. **2007**. Тектоническая позиция и геологические проявления Алтайского землетрясения 2003 г. *Геотектоника*, 2: 3–23. EDN: HZRTBZ
 4. Гольдин С.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Новиков И.С., Высоцкий Е.М., Фатеев А.В., Колесников Ю.И., Подкорытова В.Г., Лескова Е.В., Ярыгина М.А. **2004**. Чуйское землетрясение и его афтершоки. *Доклады Академии наук*, 395(4): 534–536. EDN: OQQLZT
 5. Семенцов Б.Г. **2005**. Алтайское землетрясение сентября–октября 2003 года. *Природные ресурсы Горного Алтая*, 2: 32–47. URL: <http://altay-geojournals.ru/wp-content/uploads/2015/02/4-5.pdf>
 6. Арефьев С.С., Погребченко В.В., Аптекман Ж.Я., Быкова В.В., Матвеев И.В., Михин А.Г., Молотков С.Г., Плетнев К.Г. **2004**. Предварительные результаты сейсмологических наблюдений в эпицентральной зоне Алтайского землетрясения. Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г. В кн.: *Материалы предварительного изучения*. М.: ИФЗ РАН, с. 61–67.
 7. Ашурков В.А. **2016**. Причина и следствия Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 г. *Проблема прогноза и оценки сейсмической опасности крупных городов*, 20(1–2): 58–86. URL: <http://altay-geojournals.ru/wp-content/uploads/2022/02/8-20.pdf>
 8. Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В. **2009**. Алтай и Саяны. *Землетрясения Северной Евразии*, 12. Обнинск: ГС РАН, с. 139–148.
 9. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г., Дураченко А.А., Гладышев Е.А., Ершов Р.А. **2021**. Алтай и Саяны. *Землетрясения России в 2021 году*. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, с. 38–45.
 10. Сычева Н.А. **2023**. Исследование сейсмотектонических деформаций земной коры Алтае-Саянской горной области. Ч. I. *Геосистемы переходных зон*, 7(3): 223–242. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.223-242>
 11. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Чечельницкий В.В., Шевкунова Е.В., Радзиминович Я.Б., Фатеев А.В., Кобелева Е.А., Гладышев Е.А., Арапов В.В., Артемова А.И., Подкорытова В.Г. **2022**. Хубсугульское землетрясение, 12.01.2021 г. $M_w = 6.7$, $M_L = 6.9$, и афтершоки начального периода. *Физика Земли*, 1: 67–82. <https://doi.org/10.31857/S0002333722010021>; EDN: PADCYH
 12. Мишарина Л.А. **1972**. Напряжения в очагах землетрясений Монголо-Байкальской зоны. В кн.: *Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений*. М.: Наука, с. 161–171.
 13. Жалковский Н.Д., Кучай О.А., Мучная В.И. **1995**. Сейсмичность и некоторые характеристики напряженного состояния земной коры Алтае-Саянской области. *Геология и геофизика*, 36(10): 20–30.
 14. Кузнецова К.И., Лукина Н.В., Кучай О.А. **1999**. Деформации земной коры и верхней мантии: проблема взаимообусловленности (Алтае-Саянская область). *Вулканология и сейсмология*, 4/5: 41–49.
 15. Гольдин С.В., Кучай О.А. **2007**. Сейсмотектонические деформации Алтае-Саянской сейсмоактивной области и элементы блочно-коллизонной геодинамики. *Геология и геофизика*, 48(7): 692–723. EDN: IANKGN
 16. Гольдин С.В., Дядьков П.Г., Дашевский Ю.А. **2001**. Стратегия прогноза землетрясений на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне. *Геология и геофизика*, 42(10): 1484–1496.
 17. Радзиминович Н.А., Мельникова В.И., Саньков В.А., Леви К.Г. **2006**. Сейсмичность и сейсмотектонические деформации земной коры Южно-Байкальской впадины. *Физика Земли*, 11: 44–62. EDN: OPDBIN
 18. Радзиминович Н.А., Баяр Г., Мирошниченко А.И., Дэмбэрэл С., Ульзибат М., Ганзориг Д., Лухнев А.В. **2016**. Механизмы очагов землетрясений и поле напряжений Монголии и прилегающих территорий. *Геодинамика и тектонофизика*, 7(1): 23–38. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-1-0195>
 19. Радзиминович Н.А. **2021**. Механизмы очагов землетрясений юга Байкальского региона и Северной Монголии. *Геодинамика и тектонофизика*, 12(4): 902–908. doi:10.5800/GT-2021-12-4-0562
 20. Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В. **2013**. Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саянской горной области. *Геология и геофизика*, 54(2): 271–291.
 21. Гольдин С.В., Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г. **2005**. Поля смещений земной поверхности в зоне Чуйского землетрясения, Горный Алтай. *Доклады Академии наук*, 405(6): 804–809. EDN: HSKBVH
 22. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Кале Э., Дучков А.Д., Запреева Е.А., Казанцев С.А., Русбек Ф., Брюникс К. **2006**. Поля и модели смещений земной поверхности Горного Алтая. *Геология и геофизика*, 47(8): 923–937. EDN: NDLMOV
 23. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Бойко Е.В., Грибанова Е.И., Семибаламут В.М., Тимофеев А.В., Ярошевич А.В. **2012**. Скорости деформаций и смещения в эпоху сильного землетрясения на Южном Байкале. *Геология и геофизика*, 53(8): 1040–1061. EDN: PBVNQD
 24. Саньков В.А., Парфеевец А.В. **2020**. Кайнозойское напряженное состояние земной коры Монголии по геолого-структурным данным (обзор). *Геодинамика и тектонофизика*, 11(4): 722–742. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-4-0503>

25. Сычева Н.А., Мансуров А.Н. **2017**. Сравнение оценок деформаций земной коры Бишкекского геодинамического полигона на основе сейсмологических и GPS-данных. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(4): 809–825. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0318>
26. Сычева Н.А., Мансуров А.Н. **2020**. Сейсмотектонические деформации литосферы Памира и прилегающих территорий. *Геодинамика и тектонофизика*, 11(4): 785–805. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-4-0507>
27. Сычева Н.А. **2021**. Сейсмотектонические деформации земной коры Центрального и Западного Тянь-Шаня. *Вулканология и сейсмология*, 6: 1–23. EDN: WGMXBF
28. Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Кузиков С.И. **2020**. *Вычислительные технологии в сейсмологических исследованиях (на примере KNET, Северный Тянь-Шань)*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 358 с.; Прил.: 1 электрон. опт. диск (CD). doi:10.30730/978-5-6040621-6-6.2020-2
29. Ризниченко Ю.В. **1985**. *Проблемы сейсмологии: Избранные труды*. М.: Наука, 408 с.
30. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифионов В.Г. **2017**. База данных активных разломов Евразии. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(4): 711–736.
31. Рогожин Е.А., Платонова С.Г. **2002**. *Очаговые зоны сильных землетрясений Горного Алтая в голоцене*. М.: ОИФЗ РАН, 130 с.
32. Лескова Е.В., Еманов А.А. **2006**. Характер деформаций в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения (27 сентября 2003 г., $K = 17$, Горный Алтай) по данным анализа фокальных механизмов афтершоков. *Физическая мезомеханика*, 9(1): 51–55. EDN: IJGIRL
33. Новиков И.С. **2004**. *Морфотектоника Алтая*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, фил. «Гео», 313 с. URL: http://neotec.ginras.ru/comrus/_novikov-i-s-2004-morfotektonika-altaya-glava-7-kaynozoyskaya-tektonika-altaya-i-ee-geomorfologicheskie-proyavleniya.pdf
34. Рогожин Е.А., Богачкин Б.М., Иогансон Л.И., Рейснер Г.И., Баясгалан А., Кочетков В.М., Курушин Р.А. **1995**. Опыт выделения и прослеживания сейсмогенерирующих зон методами геолого-тектонического анализа на территории Западной Монголии и Зайсано-Алтайской складчатой области. *Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии*, 2–3. М.: ОИФЗ РАН, с. 132–152.
35. Денисенко Г.А., Лескова Е.В., Манушина О.А., Подкорытова В.Г., Подлипская Л.А., Шаталова А.О., Шевелева С.С., Шевкунова Е.В. **2018**. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Чуйско-Курайская зона Горного Алтая в 2015–2016 гг. ($M_L \geq 2.5$). *Землетрясения России в 2016 году*. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, с. 180–181. URL: http://www.gsras.ru/zr/uploads/files/2016/2016-ER_p180-181.pdf
36. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В. **2020**. Наблюдения временными сетями: Чуйско-Курайская зона Горного Алтая. *Землетрясения России в 2018 году*. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, с. 117–120.
37. Лескова Е.В., Еманов А.А. **2013**. Иерархические свойства поля тектонических напряжений в очаговой области Чуйского землетрясения 2003 года. *Геология и геофизика*. 54(1): 113–123.
38. Ребецкий Ю.Л. **2007**. *Тектонические напряжения и прочность горных массивов*. М.: Академкнига, 406 с.
39. Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Фатеев А.В., Ярыгина М.А. **2004**. Алтай и Саяны. *Землетрясения Северной Евразии*, 7(1998 г.). Обнинск: ГС РАН, с. 116–125.
40. Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Радзиминович Я.Б., Середкина А.И. **2014**. Култукское землетрясение 27 августа 2008 г. с $M_w=6.3$, $I_0=8-9$ (Южный Байкал). *Землетрясения Северной Евразии*, 17 (2008 г.). Обнинск: ГС РАН, с. 386–407. URL: http://www.gsras.ru/zse/uploads/files/eq_ne_2008/2008-Strong_and_sensible_Eathqueakes-Kultuk-386-407.pdf
41. Голенецкий С.И., Хромовских В.С. (отв. сост.). **1977**. Прибайкалье (2000 до н.э. – 500 н.э.) – 1974 г.; $M \geq 5.0$; $I_0 \geq 6$. В кн.: *Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г.* М.: Наука, с. 315–338. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-novyy-katalog-silnyh-zemletryaseny-na-territorii-sssr-s-drevneyshih-vremen-.pdf>
42. Хайдурова Е.В., Гилёва Н.А. (отв. сост.). **2014**. Каталог Култукской последовательности землетрясений с $K_p > 6.5$ ($N = 414$) в 2008 г., с сильным землетрясением 27 августа 2008 г. с $M_w = 6.3$, $I_0 = 8-9$. *Землетрясения Северной Евразии в 2008 году*, 17. Обнинск: ГС РАН. (Приложение к Ежегоднику № 17 (2008 г.) на CD). URL: <http://www.gsras.ru/zse/app-17.html>
43. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Соловьев В.М., Шевкунова Е.В., Гладышев Е.А., Антонов И.А., Корабельщиков Д.Г., Подкорытова В.Г., Янкайтис В.В., Елагин С.А., Сережников Н.А., Дураченко А.В., Артемова А.И. **2006**. Сейсмологические исследования на территории Алтае-Саянской горной области. *Российский сейсмологический журнал*, 3(2): 20–51. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.2.02>
44. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Рудаков А.Д. **2006**. Общее и индивидуальное в развитии афтершоковых процессов крупнейших землетрясений Алтае-Саянской горной области. *Физическая мезомеханика*, 9(1): 33–43. EDN: IJGIQR
45. Овсюченко А.Н., Бутанаев Ю.В. **2017**. Сейсмическая история Алтае-Саянского региона и место в ней Тувинских землетрясений 2011–2012 гг.

Новые исследования Тувы, 1: 162–178. (In Russ.). EDN: XXWZDN; <https://doi.org/10.25178/nit.2017.1.11>

46. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Селезнев В.С., Фатеев А.В. **2014**. Тувинские землетрясения 27.12.2011 г., ML = 6.7 и 26.02.2012 г., ML = 6.8 и их афтершоки. *Доклады Академии наук*, 456(2): 223–226.
 47. Юнга С.Л. **1997**. О классификации тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу. *Доклады Академии наук*, 352(2): 253–255.
- ## References
1. [Earthquake catalogue of the Altai and the Sayany for 2003]. **2006**. Authors: Filina A.G., Podkorytova V.G., Leskova E.V. (compilers), Denisenko G.A., Kuznetsova N.V., Manushina O.A., Podlipskaya L.A., Sheveleva S.S., Shevkunova E.V., Shatalova A.O. [*The Earthquakes of Russia in 2003*]. Obninsk: GS RAS. (See the Appendix of present digest of articles on CD). (In Russ.). URL: http://www.gsras.ru/zr/uploads/files/2003/2003-ER_p055-064.pdf
 2. Emanov A.F., Emanov A.A., Leskova E.V., Kolesnikov Yu.I., Fateev A.V., Filina A.G. **2009**. [Chuya earthquake 27 September 2003 with Ms = 7.3, Kr = 17 (Gorny Altai)]. [*The earthquakes of the North Eurasia in 2003*], 12. Obninsk: GS RAS, p. 326–343. (In Russ.).
 3. Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Marakhanov A.V., Ushanova E.A. **2007**. Tectonic setting and geological manifestations of the 2003 Altai earthquake. *Geotectonics*, 41(2): 87–104.
 4. Gol'din S.V., Seleznev V.S., Emanov A.F., Filina A.G., Emanov A.A., Novikov I.S., Vysotskii E.M., Fateev A.V., Kolesnikov Yu.I., Podkorytova V.G., Leskova E.V., Yarygina M.A. **2004**. The Chuya earthquake and its aftershocks. *Doklady Earth Sciences*, 395(3): 394–396.
 5. Sementsov B.G. **2005**. [Altai earthquake in September–October]. **2003**. *Prirodnye resursy Gornogo Altaya* = [*Natural resources of Gorny Altai*], 2: 32–47. (In Russ.). URL: <http://altay-geojournals.ru/wp-content/uploads/2015/02/4-5.pdf>
 6. Arefyev S.S., Pogrebchenko V.V., Aptekman Zh.Ya., Bykova V.V., Matveev I.V., Mikhin A.G., Molotkov S.G., Pletnev K.G. **2004**. [Preliminary results of seismological observations in epicentral zone of Altai earthquake. Strong earthquake in the Altai in 27 September 2003]. In: [*The data of preliminary study*]. Moscow: IFZ RAN, p. 61–67. (In Russ.).
 7. Ashurkov V.A. **2016**. [The cause and consequences of Altai (Chuya) earthquake 27.09.2003]. *Problema prognoza i otsenki seismicheskoi opasnosti krupnykh gorodov* = [*The problem of forecast and estimation of seismic danger for large cities*], 20(1–2): 58–86. (In Russ.). URL: <http://altay-geojournals.ru/wp-content/uploads/2022/02/8-20.pdf>
 8. Emanov A.F., Filina A.G., Emanov A.A., Fateev A.V., Leskova E.V. **2009**. [The Altai and Sayany]. [*The earthquakes of the North Eurasia*], 12. Obninsk: GS RAS, p. 139–148. (In Russ.).
 9. Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Shevkunova E.V., Podkorytova V.G., Durachenko A.A., Gladyshev E.A., Ershov R.A. **2021**. [The Altai and Sayany]. *The earthquakes of Russia in 2021*. Obninsk: FRC UGS RAS, p. 38–45. (In Russ.).
 10. Sycheva N.A. **2023**. Study of seismotectonic deformations of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region. Pt I. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 7(3): 223–242. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.223-242>
 11. Emanov A.F., Emanov A.A., Chechel'nitskii V.V., Shevkunova E.V., Radziminovich Ya.B., Fateev A.V., Kobeleva E.A., Gladyshev E.A., Arapov V.V., Artemova A.I., Podkorytova V.G. **2022**. The Khuvsgul earthquake of January 12, 2021 (Mw = 6.7, ML = 6.9) and early aftershocks. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 58(1): 59–73. <https://doi.org/10.1134/s1069351322010025>
 12. Misharina L.A. **1972**. [Stresses in the earthquake focuses of Mongolia-Baikal zone]. In: [*The field of elastic stresses of the Earth and mechanism of earthquake focuses*]. Moscow: Nauka, p. 161–171.
 13. Zhalkovsky N.D., Kuchai O.A., Muchnaya V.I. **1995**. [Seismicity and certain characteristics of stress state of Earth crust of Altai-Sayany area]. *Geology and geophysics*, 36(10): 20–30. (In Russ.).
 14. Kuznetsova K.I., Lukina N.V., Kuchai O.A. **1999**. [Deformation of Earth crust and upper mantle: the problem of interdependence (Altai-Sayany area)]. *Volcanology and seismology*, 4/5: 41–49. (In Russ.).
 15. Gol'din S.V., Kuchai O.A. **2007**. Seismic strain in the Altai-Sayan active seismic area and elements of collisional geodynamics. *Russian Geology and Geophysics*, 48(7): 536–557.
 16. Goldin S.V., Dyad'kov P.G., Dashevskiy Yu.A. **2001**. The South Baikal geodynamic testing ground: Strategy of earthquake prediction. *Russian Geology and Geophysics*, 42(10): 1484–1496. (In Russ.).
 17. Radziminovitch N.A., Melnikova V.I., San'kov V.A., Levi K.G. **2006**. Seismicity and seismotectonic deformations of the crust in the Southern Baikal basin. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 42(11): 904–920. <https://doi.org/10.1134/s1069351306110048>
 18. Radziminovich N.A., Bayar G., Miroshnichenko A.I., Demberel S., Ulziibat M., Ganzorig D., Lukhnev A.V. **2016**. Focal mechanisms of earthquakes and stress field of the crust in Mongolia and its surroundings. *Geodynamics & Tectonophysics*, 7(1): 23–38. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-1-0195>
 19. Radziminovich N.A. **2021**. Focal mechanisms of earthquakes of Southern Baikal Region and Northern Mongolia. *Geodynamics & Tectonophysics*, 12(4): 902–908. doi:10.5800/GT-2021-12-4-0562

20. Rebetsky Yu.L., Kuchai O.A., Marinin A.V. **2013**. Stress state and deformations of the Earth's crust in the Altai-Sayany mountain region. *Russian Geology and Geophysics*, 54(2): 206–222. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.01.011>
21. Goldin S.V., Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G. **2005**. Fields of the Earth's surface displacement in the Chuya earthquake zone in Gornyi Altai. *Doklady Earth Sciences*, 405A(9): 1408–1413. EDN: LJKWIT
22. Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Kale E., Duchkov A.D., Zapreeva E.A., Kazantsev S.A., Rusbek F., Bryuniks K. **2006**. Displacement fields and models of current motion in Gornyi Altai. *Russian Geology and Geophysics*, 47(8): 915–929. EDN: TQNFQZ
23. Timofeev V.Y., Ardyukov D.G., Boyko E.V., Timofeev A.V., Gribanova E.I., Semibalamut V.M., Yaroshovich A.V. **2012**. Strain and displacement rates during a large earthquake in the South Baikal region. *Russian Geology and Geophysics*, 53(8): 798–816. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.06.007>
24. Sankov V.A., Parfeevets A.V. **2020**. The cenozoic crustal stress state of Mongolia according to geological and structural data (review). *Geodynamics & Tectonophysics*, 11(4): 722–742. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-4-0503>
25. Sycheva N.A., Mansurov A.N. **2017**. Comparison of crustal deformation rates estimated from seismic and GPS data on the Bishkek geodynamic polygon. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(4): 809–825. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0318>
26. 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>
27. Sycheva N.A. **2021**. Crustal seismotectonic deformations in Central and Western Tien-Shan. *Journal of Volcanology and Seismology*, 15(6): 414–434. <https://doi.org/10.1134/s0742046321060105>
28. Sycheva N.A., Bogomolov L.M., Kuzikov S.I. **2020**. *Computational technologies in seismological research (on the example of KNET, Northern Tian Shan)*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, 358 p.; Suppl.: 1 electronic optical disks (CD). (In Russ.). doi:10.30730/978-5-6040621-6-6.2020-2
29. Riznichenko Yu.V. **1985**. [Problems of seismology]. Moscow: Nauka, 408 p. (Izbrannye trudy [Selected works]). (In Russ.).
30. Bachmanov D.M., Kozhurin A.I., Trifonov V.G. **2017**. The active faults of Eurasia database. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(4): 711–736. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0314>; EDN: ZWRGN
31. Rogozhin E.A., Platonova S.G. **2002**. [Focal zones of strong earthquakes in Gornyi Altai in Holocene]. Moscow: OIFZ RAN, 130 p. (In Russ.).
32. Leskova E.V., Yemanov A.A. **2006**. Deformation pattern for the epicentral area of Chuya earthquake (September 27, 2003, $K = 17$, Gornyi Altai) according to analysis data for aftershock focal mechanisms. *Physical mesomechanics*, 9(1): 51–55. (In Russ.). EDN: IJGIRL
33. Novikov I.S. **2004**. [Morphotectonics of Altai]. Novosibirsk: Pub. House SB RAS, GEO, 313 p. (In Russ.). URL: http://neotec.ginras.ru/comrus/_novikov-i-s-2004-morfotektonika-altaya-glava-7-kaynozoy-skaya-tektonika-altaya-i-ee-geomorfologicheskije-proyavleniya.pdf
34. Rogozhin E.A., Bogachkin B.M., Ioganson L.I., Reisner G.I., Bayasgalan A., Kochetkov V.M., Kurushin R.A. **1995**. [The experience of separating and tracing of seismogenerating zones by methods of geologo-tectonic analysis on the territory of Western Mongolia and Zaisan-Altai folded area]. [Seismicity and seismic zoning of the North Eurasia], 2–3. Moscow: OIFZ RAN, p. 132–152. (In Russ.).
35. Denisenko G.A., Leskova E.V., Manushina O.A., Podkorytova V.G., Podlipskaya L.A., Shatalova A.O., Sheveleva S.S., Shevkunova E.V. **2018**. [Earthquake catalogues on different regions of Russia. Chuya – Kuray zone of Gornyi Altai in 2015–2016. ($M_L \geq 2.5$)]. *The earthquakes of Russia in 2016*. Obninsk: FRC UGS RAS, p. 180–181. (In Russ.). URL: http://www.gsras.ru/zr/uploads/files/2016/2016-ER_p180-181.pdf
36. Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Shevkunova E.V. **2020**. [The observations by temporal nets: Chuya – Kuray zone of Gornyi Altai]. *The earthquakes of Russia in 2018*. Obninsk: FRC UGS RAS, p. 117–120. (In Russ.).
37. Leskova E.V., Emanov A.A. **2013**. Hierarchical properties of the tectonic stress field in the source region of the 2003 Chuya earthquake. *Russian Geology and Geophysics*, 54(1): 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.12.008>
38. Rebetskii Yu.L. **2007**. [Tectonic stresses and strength of mountain ranges]. Moscow: Akademkniga, 406 p. (In Russ.).
39. Emanov A.F., Filina A.G., Emanov A.A., Fateev A.V., Yarygina M.A. **2004**. [The Altai and Sayany]. [The earthquakes of the North Eurasia], 7 (1998). Obninsk: GS RAS, p. 116–125. (In Russ.).
40. Mel'nikova V.I., Gilyova N.A., Radziminovich Ya.B., Seredkina A.I. **2014**. [Kultuk earthquake in 27 August 2008 with $M_w=6.3$, $I_0=8-9$ (Southern Baikal)]. [The earthquakes of the North Eurasia], 17 (2008). Obninsk: GS RAS, p. 386–407. (In Russ.). URL: http://www.gsras.ru/zse/uploads/files/eq_ne_2008/2008-Strong_and_sensible_Eathqueakes-Kultuk-386-407.pdf
41. Golenetskii S.I., Khromovskikh V.S. (compilers). **1977**. [Pribaikal'e (2000 before n.e. – 500 n.e.) – 1974; $M \geq 5.0$; $I_0 \geq 6$]. In: [New catalogue of strong earthquakes on USSR territory from ancient times till 1975]. Moscow: Nauka, p. 315–338. (In Russ.). URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-novyy-katalog-silnyh-zemletryaseny-na-territorii-sssr-s-drevneyshih-vremen-.pdf>

42. Khaidurova E.V., Gileva N.A. (compilers) **2014**. [Catalogue of Kultuk subsequence of earthquakes with $K_r > 6.5$ ($N = 414$) in 2008, with strong earthquake in 27 August 2008 with $M_w = 6.3$, $I_0 = 8-9$]. [*Earthquakes of the North Eurasia*], 17 (2008). Obninsk: GS RAS. (Appendix to year book № 17 (2008) on CD). (In Russ.). URL: <http://www.gsras.ru/zse/app-17.html>
43. Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Soloviev V.M., Shevkunova E.V., Gladyshev E.A., Antonov I.A., Korabelshchikov D.G., Podkorytova V.G., Yankaitis V.V., Elagin S.A., Serezhnikov N.A., Durachenko A.V., Artemova A.I. **2021**. Seismological studies in the Altai-Sayan mountain region. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal = Russian Journal of Seismology*, 3(2): 20–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.2.02>
44. Emanov A.F., Emanov A.A., Filina A.G., Leskova E.V., Kolesnikov Yu.I., Rudakov A.D. **2006**. The common and individual in development of aftershocks of largest earthquakes in the Altai-Sayan Mountain region. *Physical mesomechanics*, 9(1): 33–43. (In Russ.). EDN: IJGIQR
45. Ovsyuchenko A.N., Butanaev Yu.V. **2017**. Seismic history of the Altai-Sayany region and the 2011–2012 earthquakes in Tuva. *New Research of Tuva*, 1. (In Russ.). <https://doi.org/10.25178/nit.2017.1.11>; EDN: XXWZDN
46. Yemanov A.F., Yemanov A.A., Leskova E.V., Seleznev V.S., Fateev A.V. **2014**. The Tuva earthquakes of December 27, 2011, $M_L = 6.7$, and February 26, 2012, $M_L = 6.8$, and their aftershocks. *Doklady Earth Sciences*, 456(1): 594–597. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14050249>
47. 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.).

Об авторе

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

Поступила 11.10.2023

Принята к публикации 2.11.2023

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 the Russian Academy of Sciences, ivtran@mail.ru

Received 11 October 2023

Accepted 2 November 2023

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



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

УДК 551.21

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.357-374>
<https://www.elibrary.ru/zbrvjc>

Геологические свидетельства проявлений сильных цунами на побережье острова Итуруп (Курильские острова) за последние 3500 лет

Н. Г. Разжигаева^{1,2}, Л. А. Ганзей¹, Т. А. Гребенникова¹, А. А. Харламов³,
А. В. Лоскутов⁴, Р. Ф. Булгаков⁴

@E-mail: nadyar@tig.dvo.ru

¹ Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

³ Институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова, Москва, Россия

⁴ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. Проанализировано распределение отложений цунами в озерно-болотных разрезах на побережье зал. Касатка. Основными объектами являлись болото, образованное на месте полностью заросшего озера лагунного типа, расположенного за грядой дюн, и низменный заболоченный перешеек между озерами Октябрьское и Среднее. Идентифицировано пять крупных событий, определены параметры заплесков и возраст на основании радиоуглеродного датирования и тефростратиграфии. Для подтверждения морского источника песка использованы данные диатомового анализа. Проведена корреляция установленных событий с событиями на сопредельных островах и побережье Восточного Хоккайдо. Найден след только одного сильного исторического цунами, отложения которого лежат выше маркирующего вулканического пепла Та-а (1739 г.) влк. Тарумаи, о. Хоккайдо. Цунами произошло во второй половине XVIII в. Возможно, это след цунами 1780 г., очаг которого находился около о. Уруп. Четыре палеоцунами хорошо сопоставляются по возрасту с мегацунами региона (XVII, XIII вв., 1.5; 2.3–2.4 тыс. кал. л.н.), наиболее ярко проявившимися на берегах Восточного Хоккайдо и оставившими следы в виде покровов морских песков и илов на заболоченных участках Малой Курильской гряды и о. Кунашир. На о. Итуруп мощности цунамигенных отложений намного меньше, как и простираение песчаных покровов вглубь суши. Высказано предположение, что на о. Итуруп величины заплеска установлены в дистальной зоне распространения мегацунами позднего голоцена с очагами на юге Курило-Камчатского желоба, а региональные сильные цунами, известные в период инструментальных наблюдений, не оставили геологических свидетельств в изученных разрезах.

Ключевые слова: палеоцунами, радиоуглеродное датирование, тефра, диатомеи, Южные Курилы, голоцен

Geological evidence of strong tsunami manifestations on the Iturup Island (Kuril Islands) at last 3500 years

Nadezhda G. Razjigaeva^{1,2}, Larisa A. Ganzey¹, Tatiana A. Grebennikova¹,
Andrey A. Kharlamov³, Artem V. Loskutov⁴, Rustam F. Bulgakov⁴

@E-mail: nadyar@tig.dvo.ru

¹ Pacific Geographical Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

² Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

³ Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

⁴ Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. The distribution of tsunami deposits in the lacustrine-swamp sections on the Kasatka Bay coast is analyzed. The main objects were a swamp formed on the place of overgrown lagoon-type lake located behind dune ridge, and a low swampy isthmus between Oktyabrskoe and Srednee lakes. Five major events have been identified, run-up parameters

and age have been determined on the base of radiocarbon dating and tephrostratigraphy. Diatom analysis data were used to confirm the marine origin of the sand. Established events are correlated with data on adjacent islands and the Eastern Hokkaido coast. A trace of only one strong historical tsunami was found, its deposits lie above marking volcanic ash Ta-a (1739) of the Tarumai Volcano, Hokkaido. The tsunami took place in the second half of the 18th century. Perhaps this is a trace of 1780 AD tsunami, the source was located near Urup Island. Four paleotsunamis are well compared in age with the megatsunamis of the region (17th, 13th centuries, 1.5; 2.3–2.4 ka), which most clearly manifested on the Eastern Hokkaido coasts and left sea sands and silts sheets in marshes of the Lesser Kuril Ridge and Kunashir Island. On Iturup, the thickness of tsunami deposits and wide of sand cover is much less. It has been suggested that the peat section of Iturup recorded the run-up values in the distal zone of the Late Holocene megatsunami, which had sources in the southernmost of the Kuril-Kamchatka Trench. Regional strong tsunamis occurred in the period of instrumental observations did not leave geological evidence in the studied sections.

Keywords: paleotsunami, radiocarbon dating, tephra, diatoms, South Kuril Islands, Holocene

Для цитирования: Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А., Лоскутов А.В., Булгаков Р.Ф. Геологические свидетельства проявлений сильных цунами на побережье острова Итуруп (Курильские острова) за последние 3500 лет. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 4, с. 357–374. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.357-374>; <https://www.elibrary.ru/zbrvjc>

For citation: Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Kharlamov A.A., Loskutov A.V., Bulgakov R.F. Geological evidence of strong tsunami manifestations on the Iturup Island (Kuril Islands) at last 3500 years. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 4, pp. 357–374. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.357-374>; <https://www.elibrary.ru/zbrvjc>

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (<https://rscf.ru/project/21-17-00049/>), руководитель – академик Евгений Ильич Гордеев.

Funding

The work was carried out with financial support of Russian Science Foundation (<https://rscf.ru/project/21-17-00049/>), supervisor Academician Evgeny I. Gordeev.

Введение

Одним из направлений оценки цунамиопасности побережья является поиск отложенных палеоцунами для выявления сильных событий, произошедших до периода инструментальных наблюдений, с целью определения их параметров, повторяемости, пространственно-временного масштаба и возможных очагов [1–5]. На Курильских островах изучение отложений палеоцунами проводилось в центральной части дуги [6], на юге наиболее полная информация получена для Кунашира и Малых Курил, где работы проводились на островах Шикотан, Полонского, Зеленый, Юрий и Танфильева [7–9]. Острова Итуруп и Уруп мало изучены в этом отношении. Для о. Уруп получены данные для юга, в бухте Осьма, где найдены отложения наиболее сильных событий, произошедших за последние 3660 лет [10].

Для о. Итуруп выполнены пионерные работы по проявлению сильных палеоцунами на Курилах [11]. Остров самый крупный в гряде (3170 км²), поэтому реконструкции палеоцунами имеют большое значение для построения общей региональной схемы. Сложность изуче-

ния следов палеоцунами здесь связана с характером строения побережья – преобладанием абразионных и абразионно-денудационных берегов, где мало низких заболоченных участков, информативных для сохранности следов цунами. На тихоокеанском побережье острова береговые низменности развиты ограниченно, затрудняет реконструкции также и присутствие обширных дюнных полей. Большая часть таких берегов антропогенно нарушена. Лишь два участка могут быть использованы для целей исследования – побережье зал. Касатка и Ветровой перешеек, но последний перекрыт тефрой извержения влк. Ветровой, произошедшего ~2000 л.н. [12]. Здесь нет разрезов торфяников, и до 1945 г. был аэродром. Поэтому наш поиск был сосредоточен в северной части побережья зал. Касатка. Район работ находится на границе двух сегментов Курило-Камчатского желоба, генерирующих сильные цунамигенные землетрясения [3, 13].

Целью исследования является идентификация отложений цунами в разрезах верхнего-лоценовых озерно-болотных отложений, анализ их состава, восстановление параметров заплеска, определение возраста и повторяемости

крупных событий, а также корреляция с данными, полученными по сопредельным территориям. Для оценки повторяемости крупных цунами важно понять, в каком сегменте Курило-Камчатского желоба находился очаг цунамигенных землетрясений, проявившихся на о. Итуруп.

Материалы и методы

Поиск отложений палеоцунами проводился в болотном массиве, образованном на месте полностью заросшего берегового озера лагунного типа, расположенного к юго-востоку от оз. Касатка, и в разрезах торфяников между озерами Октябрьское и Среднее (рис. 1).

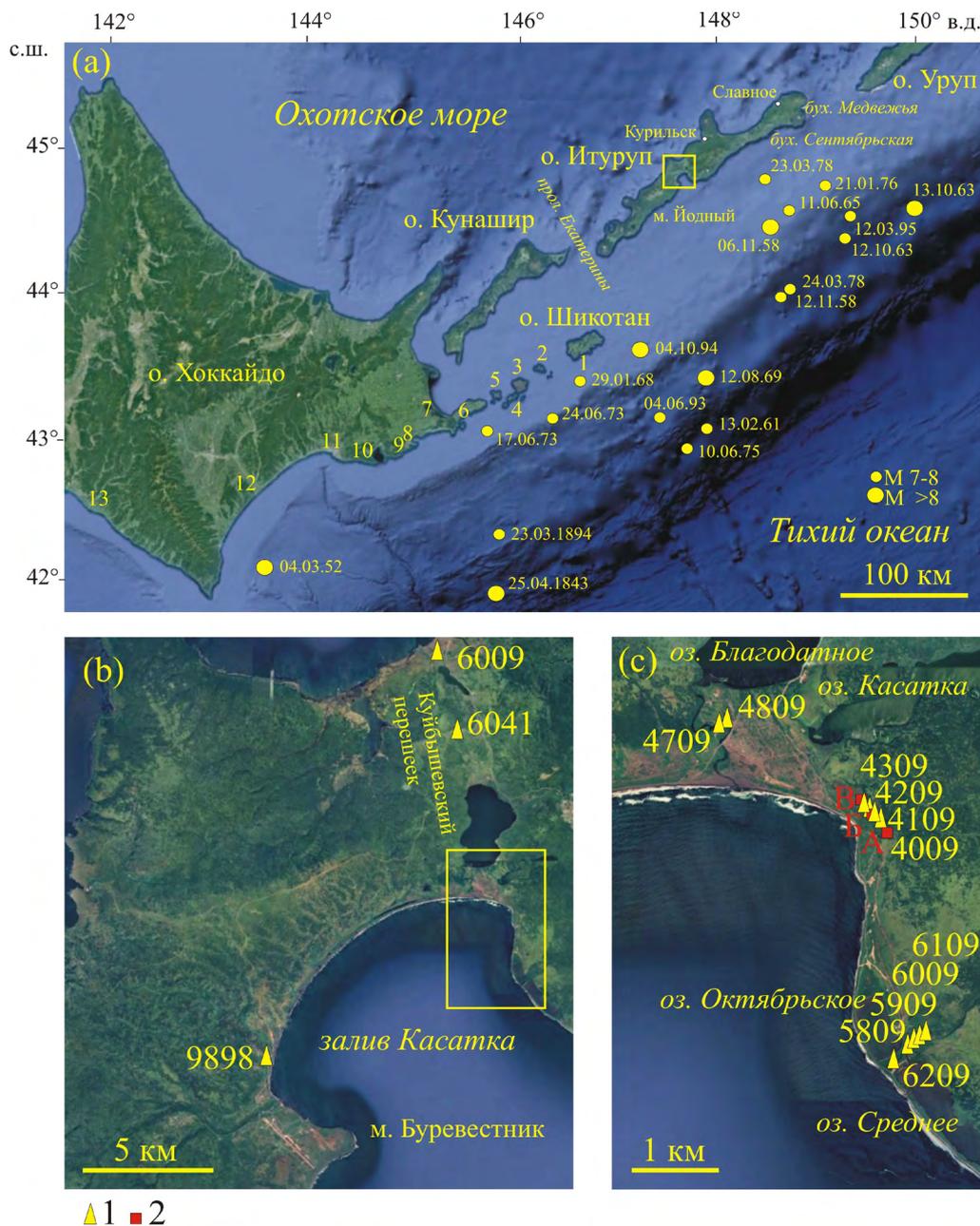


Рис. 1. Район исследований (а): о. Итуруп (зал. Касатка); острова Малой Курильской гряды: 1 – Айвазовского, 2 – Полонского, 3 – Зеленый, 4 – Юрий, 5 – Танфильева; восточное побережье Хоккайдо: 6 – п-ов Немуро, 7 – оз. Фурен, 8 – болото Киритаппу, 9 – болото Мотириппу, 10 – г. Аккеша, 11 – г. Кусиро и оз. Харутори, 12 – равнина Токачи, 13 – берег Хидака. Эпицентры цунамигенных землетрясений по [21]. (б, в) Залив Касатка и положение разрезов, изученных авторами (1) и Р.Ф. Булгаковым с соавторами [11] (2).

Fig. 1. Study area (a): Iturup Island (Kasatka Bay); islands of Lesser Kuril Ridge: 1 – Aivazovsky Island, 2 – Polonsky Island, 3 – Zeleny Island, 4 – Yuri Island, 5 – Tanfiliev Island; eastern coast of Hokkaido Island: 6 – Nemuro Peninsula, 7 – Furen Lake, 8 – Kiritappu marsh, 9 – Mochirippu marsh, 10 – Akkeshi City, 11 – Kushiro City and Harutori Lake, 12 – Tokachi Plain, 13 – Hidaka coast. Epicenters of tsunami earthquakes according to [21]. (b, c) Kasatka Bay and position of studied by authors (1) and by R.F. Bulgakov et al. (2) sections [11].

Обследован также небольшой заболоченный участок около протоки из оз. Благодатное и район бывшего поселка Буревестник. Для привязки возраста прослоев тефры привлекались данные по разрезам разнофациальных отложений на юге зал. Касатка и на Куйбышевском перешейке. Объектами для реконструкции палеоцунами являлись разрезы торфяников и озерных отложений, включающие прослойки морских песков, простирающихся за пределы зоны воздействия сильных штормов. Использовалась общепринятая методика, подробно описанная в ряде работ [1, 14–17 и др.]. Разрезы (шурфы и скважины ручного бурения) изучались по профилям с проведением нивелирования (рис. 1). Для подтверждения морского генезиса осадков использовался диатомовый анализ, широко используемый для идентификации отложений цунами [18]. Проведен подробный гранулометрический анализ песков на ситах с шагом γ . Возрастная привязка и корреляция событий основаны на данных тефростратиграфии и радиоуглеродного датирования органических отложений, вмещающих прослойки цунамигенных песков и тефру. Радиоуглеродное датирование выполнено в Институте наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета (лабораторный индекс ЛУ-). Использовались также данные, полученные Р.Ф. Булгаковым с соавторами [11] в Геологическом институте РАН (лабораторный индекс ГИН-). Радиоуглеродные даты переведены в календарные по программе OxCal 4.4 (<https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal.html>) с использованием калибровочной кривой «IntCal 20» [19].

Проявления исторических цунами на побережье о. Итуруп

Возникновение цунами в районе Южных Курил в основном связано с землетрясениями, эпицентры которых находятся в относительно узкой полосе на западном склоне Курило-Камчатского глубоководного желоба [20, 21]. Остров попадает в зону воздействия цунами, приходящих от близлежащих очагов, а также с севера и юга гряды, и трансокеанских цунами (см. таблицу). Большинство близлежащих очагов цунами расположено на континен-

тальном склоне, четыре цунами (06.11.1958, 11.06.1965, 21.01.1976, 23.03.1978) имели очаг на шельфе [21]. Летопись исторических цунами здесь не столь продолжительная (см. таблицу), сведения о сильных цунами в основном ограничены периодом инструментальных наблюдений [22, 23]. Для Южных Курил свидетельства о цунами XVIII в. есть только для о. Уруп, где действовала Российско-Американская компания, а с 1747 по 1777 г. были постоянные поселения [24]. Цунамигенное землетрясение здесь произошло 29.06.1780 [22]. На Восточном Хоккайдо самые ранние исторические записи о цунами есть в дневниках монахов храма Кокутайдзи в Аккеши, построенного в 1804 г. н.э. [25]. Из событий XIX в. на о. Итуруп известно цунами 04.06.1893 ($M = 7$), проявившееся и на охотоморской стороне острова (высота заплеска 1.5 м, пос. Славное) [22], очаг располагался около о. Шикотан [20]. Цунами 08.09.1918 имело заплеск до 6 м на севере острова с тихоокеанской (бухта Медвежья) и 1.5–2.5 м с охотоморской стороны (Славное, г. Курильск). С конца 1950-х до конца 1970-х годов в регионе прошла серия цунамигенных землетрясений. Крупным событием было цунами 07.11.1958 с очагом большой площади к востоку от острова. Оно проявилось на всем тихоокеанском побережье острова с максимальным заплеском (до 5 м) на участке открытого берега мыс Буревестник – мыс Йодный [21]; в зал. Касатка (пос. Буревестник) цунами имело заплеск 3–3.5 м [22, 26, 27]. Высокие заплески (до 2 м в Буревестнике, до 0.6–1 м в Курильске и других поселках на западном побережье) наблюдались во время цунами 12.08.1969, очаг располагался на континентальном склоне напротив прол. Екатерины. Сильным было цунами 20.09.1963, пришедшее со стороны Урупа, на севере острова (бухта Сентябрьская) заплеск достигал 8 м. Остальные события (09.04.1959, 12.05.1961, 12.10.1963, 27.03.1964, 11.06.1965, 29.01.1968, 17.06.1973, 10.06.1975, 22–24.03.1978, 24.03.1984, 09.10.1994, 03.02.1995) были незначительными, высота заплеска, как правило, была меньше 1 м, максимум 2 м [21, 22]. Детальные данные получены по проявлению Шикотанского цунами 04.10.1994 в зал. Касатка: на северном и южном бортах бухты заплеск был до 2.3 м,

Таблица. Высота заплесков цунами, проявившихся в районе о. Итуруп**Table.** Tsunami run-up on the Iturup Island

Дата	Магнитуда	Высота заплеска в зал. Касатка и на других участках, м	Источник
04.06.1893	6.6–7	1.6	[21, 22]
08.09.1918	8.25	6, бухта Медвежья	[22]
05.11.1952, Камчатское	8.25	2.5	[22]
06.11.1958	8.25–8.4	3–5	[21, 22, 26]
12.11.1958	7	1	[21]
11.05.1960, Чилийское	8.5	2.5	[22]
13.02.1961	7.25	1	[22]
12.10.1963	7.1	0.12	[21]
13.10.1963	8.25–8.5	1.5	[21, 22]
20.10.1963	7.25	0.5–1.5, пос. Буревестник, 7–8, бухта Сентябрьская	[22, 27]
27.03.1964, Аляскинское	8.4	0.7	[21, 22]
11.06.1965	7.25	0.05–0.09	[22]
29.01.1968	7–7.3	0.1	[21, 22]
16.05.1968	8.2	0.5	[22]
12.08.1969	8.2	1–2	[22]
17.06.1973	7.7–7.9	0.4	[21, 22]
24.06.1973	7.1–7.6	0.15	[21, 22]
10.06.1975	7	0.4	[22]
21.01.1976	7.3	0.13–0.30	[21, 22]
04.10.1994	8.3	2.3	[28]
12.03.1995	7.9	1.1	[21]
11.03.2011	9	2.1	[30]

в вершине – 0.9–1.9 м [28, 29]. Берегов острова достигали и крупные трансокеанские цунами. Высокие заплески с тихоокеанской стороны (2.5 м) отмечены во время прохождения Камчатского 05.11.1952 и Чилийского 22.05.1960 цунами [22]. Тохоку цунами 11.03.2011 проявилось на всей тихоокеанской стороне острова, заплеск был до 2.1 м [27, 30].

Отложения палеоцунами

Торфяник на месте заросшего озера на предмет отложений палеоцунами изучался ранее Р.Ф. Булгаковым с соавторами [11], разрезы приведены на рис. 2. Болото расположено за древним штормовым валом, перекрытым грядой эоловых дюн (высотой до 5–10 м). Высота поверхности болота 3–3.5 м над средним уровнем моря. Из основания торфа была получена ^{14}C дата 3300 ± 250 л.н., 3560 ± 320 кал. л.н.,

ГИН-6516 [31, 32]. Ниже торфа в наших разрезах лежит гиттия (рис. 2), накопление которой шло в озере лагунного типа. Об этом свидетельствует комплекс диатомей, включающий солоноватоводные и пресноводные виды. Доминируют обрастатели *Staurosira venter* (до 40 %), *Staurosirella pinnata* (до 15 %), *Pseudostaurosira brevistriata* (до 15 %) и временно планктонный *Staurosirella lapponica* (до 16 %). Характерны для комплекса бентосные *Epi-themia adnata*, *E. sorex*, *E. turgida*, *Navicula cryptocephala*, *Cavinula pseudoscutiformis* и обрастатели *Staurosirella martyi*, *Staurosira construens*, *Cocconeis placentula*, *C. placentula* var. *euglypta*, *C. placentula* var. *lineata* и др. Постоянно присутствуют сублиторальные морские и солоноватоводные диатомей, характерные для полузакрытых бухт и заливов: *Actinocyclus octonarius*, *Diploneis smithii*, *D. interrupta*, *Thalassiosira hyperborea* var. *septentrionalis*,

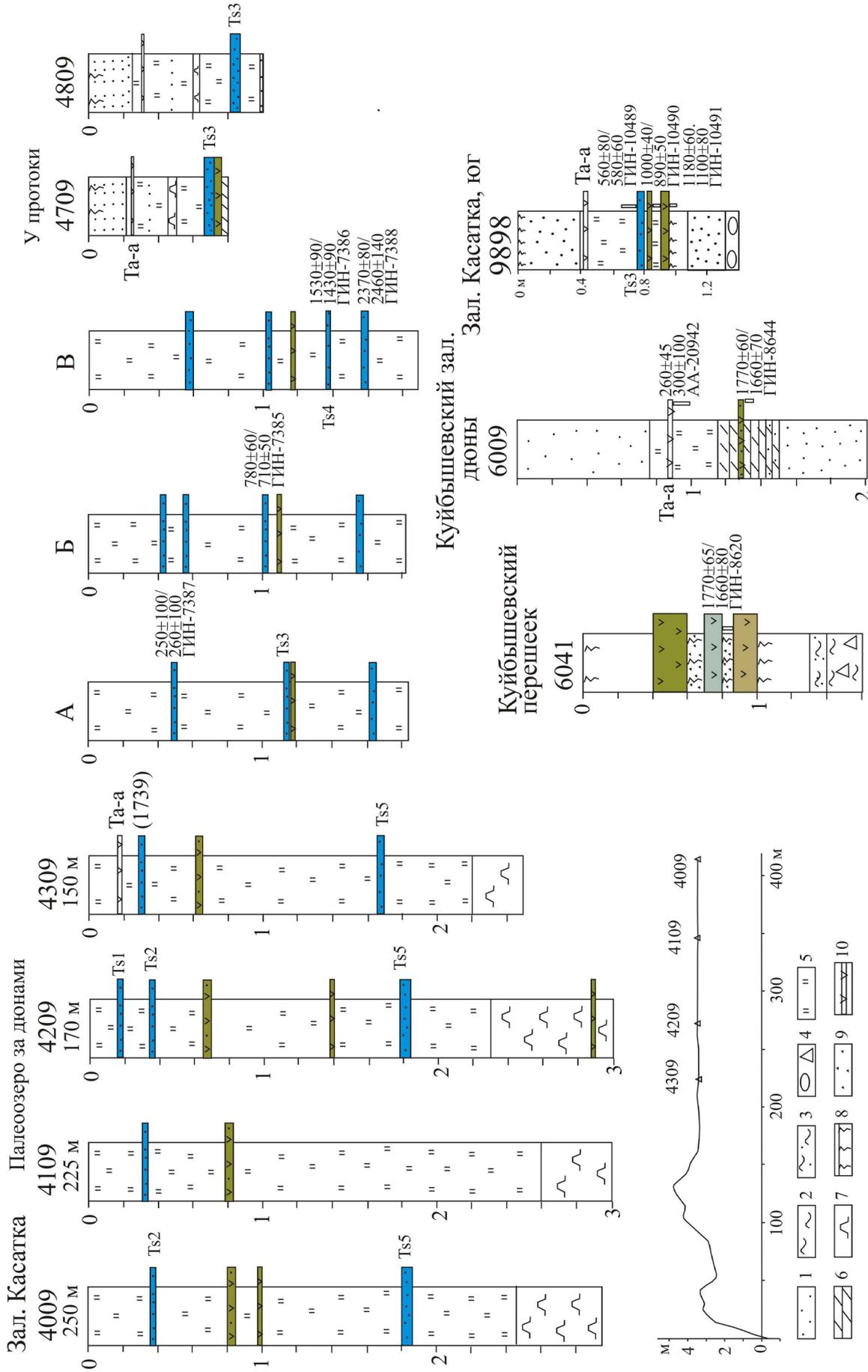


Рис. 2. Разрезы озерно-болотных отложений на побережье зал. Касатка со слоями пунамитенных песков. Разрезы А, Б, В по [11]. 1 – песок, 2 – суллинок, 3 – супесь, 4 – галька и щебень, 5 – торф, 6 – торфянистый алевроит, 7 – гиттия, 8 – почва, 9 – уголь, 10 – вулканический пепел. Приведен радиоуглеродный и календарный возраст: ^{14}C л.н./ ^{14}C кал. л.н.
Fig. 2. Lacustrine-swamp sections on the Kasaatka Bay coast with tsunami sand layers. Section A, B, V according to [11]. 1 – sand, 2 – loam, 3 – sandy loam, 4 – pebble and rubbles, 5 – peat, 6 – peaty silt, 7 – gittia, 8 – soil, 9 – charcoal, 10 – volcanic ash. Radiocarbon and calendar age: ^{14}C yr BP/ ^{14}C cal. yr BP is given.

Nitzschia sigma. Смена обстановок осадконакопления произошла в начале похолодания (~3500 кал. л.н.), ярко проявившегося на о. Итуруп [33, 34]. Уменьшение глубины и активное заболачивание на этом рубеже отмечено и в развитии других береговых озер Южных Курил [35–37]. В то же время следует отметить, что смена обстановок была очень резкой, что нетипично для эволюционного развития водоемов. В перекрывающем торфянике преобладают диатомеи из родов *Pinnularia* (30 видов) и *Eunotia* (22 вида). В нижней части в число доминирующих входят распространенные в северных водах *Pinnularia lata* (20–38 %) и *P. major* (до 8 %), космополиты *P. viridis* (8–16 %), *P. microstauron* (6 %). В верхней доминируют ацидофилы *Eunotia praerupta* (до 70 %), *E. glacialis* (до 19.5 %), *E. fallax* (до 9 %).

Озерно-болотные отложения включают до трех слоев тефры андезитового состава, представленных оливковыми алевритами. Наиболее древний, залегающий в гиттии, образовался в начале позднего голоцена. Нижний слой тефры в торфянике, предположительно, имеет возраст около 1770±60 л.н. (1660±70 кал. л.н.), ГИН-8644; 1770±65 л.н. (1660±80 кал. л.н.), ГИН-8620. Прослой андезитовой тефры такого возраста обнаружен в разрезах почвенно-пирокластического чехла Куйбышевского перешейка и в торфянике на дюнном поле Куйбышевского залива (рис. 2). Для этого же прослоя получена ¹⁴C-дата 1530±90 л.н. (1430±90 кал. л.н.), ГИН-7386 [11, 31]. Выше лежащий слой тефры, вероятно, имеет возраст около 1000 л.н. На юге зал. Касатка около устья р. Маловодная (разрез 9898) под прослоем андезитовой тефры из почвы получена ¹⁴C-дата 1180±60 л.н. (1100±80 кал. л.н.), ГИН-10491; из торфа над прослоем тефры – 1000±40 л.н. (890±50 кал. л.н.), ГИН-10490. В верхней части торфяника в северной части залива (разрез 4309) обнаружен вулканический пепел, представленный белым алевритом. Это маркирующая тефра Та-а (1739 г.) влк. Тарумаи (о. Хоккайдо), широко распространенная в голоценовых разрезах о. Итуруп [38, 39]. Вулканическое стекло имеет риолитовый состав и относится к среднекалийной группе.

В разрезах торфяника встречено до 3–4 прослоев мелкозернистых хорошо сортиро-

ванных песков (мощность 2–5 см) цунамигенного происхождения. Их возраст оценивается около 2360 л.н. (2430±180 кал. л.н.), 1530 (1430±90 кал. л.н.), 780 (710±50 кал. л.н.), 250 л.н. (260±100 кал. л.н.) [11, 31]. По имеющимся данным, с учетом результатов реконструкций Р.Ф. Булгакова с соавторами [11], выделены палеоцунами Ts2–Ts5; прослой в верхней части разреза 4209 был образован, вероятно, в одно из исторических цунами (Ts1). Наиболее хорошо выдержаны по простиранию прослой песка самого древнего события (Ts5) и одного из молодых (Ts2), залегающие ниже вулканического пепла Та-а, остальные лежат линзами и прослеживаются не во всех разрезах, что может свидетельствовать о большой скорости потока.

О затоплении болота морской водой свидетельствуют морские диатомеи. Так, в разрезе 4009 в инт. 0.95–1.00 м прослой песка (Ts3) отсутствует, но среди пресноводного комплекса найдены сублиторальный *Actinoptychus senarius*, океанические *Coscinodiscus marginatus*, *C. asteromphalus*, *Coscinodiscus* sp., неритические *Shionodiscus oestrupii*, *Thalassionema nitzschioides*, что может свидетельствовать о заплеске цунами за пределами зоны осадконакопления. В инт. 0.10–0.15 м обнаружено самое большое разнообразие морских видов. Присутствуют океанические *Coscinodiscus marginatus*, *C. asteromphalus*, *Thalassiosira eccentrica*, неритический *Shionodiscus oestrupii*, сублиторальный *Actinoptychus senarius*, а также вымершие виды, которые могли неоднократно переоткладываться из морских неогеновых отложений, широко распространенных в обрамлении залива. Эти находки также могут быть свидетельством затопления поверхности во время сильного исторического цунами.

Прослой морского песка был обнаружен в разрезах торфяника около протоки из оз. Благодатное (разрезы 4709, 4809) в 700 м от береговой линии (рис. 2). Этот прослой, судя по положению в разрезе и данным тефростратиграфии, образовался во время прохождения палеоцунами Ts3.

На заболоченном перешейке за штурмовым валом между озерами Октябрьское и Среднее (высота 1 м н.у.м.) прослой цунамигенных песков обнаружены в разрезах озер-

но-болотных отложений в 400–540 м от береговой линии (рис. 3). В основании разрезов выходят морские отложения, представленные среднезернистым песком; в верхней части залегает прослой вулканического пепла Та-а. Изучение диатомовых комплексов позволило доказать морское происхождение трех прослоев песков. Среди морских диатомей обнаружены сублиторальные виды, характерные для полузакрытых бухт и заливов, *Achnanthes brevipes*, *Actinocyclus octonarius*, *Thalassiosira hyperborea* var. *septentrionalis*, *Cocconeis californica*, *C. costata*, неритический *Stephanopyxis nipponica* и фрагменты пелагических видов *Coscinodiscus* sp., *Thalassiosira* sp.

Гранулометрический состав цунамигенных отложений характеризуется одномодальными (Ts1 0.2–0.25 мм, Ts5 0.315–0.4 мм), бимодальными (Ts2, Ts3 моды 0.315–0.4; 0.5–0.63 мм) и полимодальными (основная мода 0.08–0.1 мм) кривыми распределения (рис. 4). В отличие от пляжевых и дюнных песков, осадок включает примесь алеврита и менее сортирован. На перешейке по мере продвижения вглубь суши материал становится более тонким и сортированным, но положение модальных фракций сохраняется. Мелкозернистый песок Ts1 в отложениях торфяника близок по структуре с осадками осушки: материал поступал с верхней части берегового склона. На перешейке осадки исторического цунами, выходящие выше вулканического пепла Та-а, грубее, чем пляжевые пески, преобладал материал абразионного происхождения с бортов бухт. По структурным характеристикам цунамигенные пески Ts2 и Ts3 сходны с пляжевыми песками вершины залива с двумодальными кривыми распределения. По-видимому, основным источником материала был пляж. Отложения палеоцунами Ts4 включают большую долю

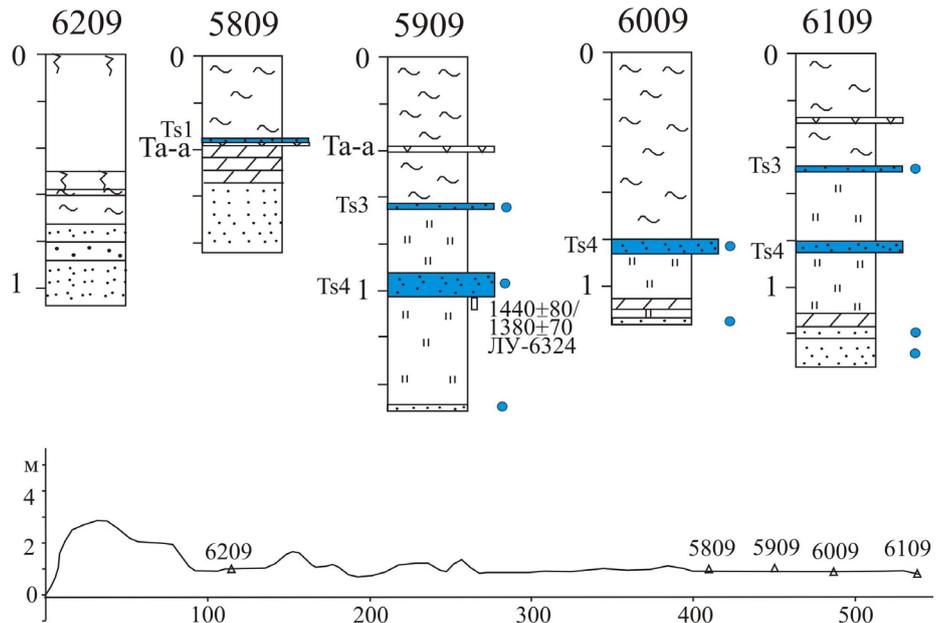


Рис. 3. Разрезы озерно-болотных отложений на перешейке между озерами Октябрьское и Среднее со слоями цунамигенных песков. Голубые кружки – находки морских диатомей.

Fig. 3. Lacustrine-swamp sections on isthmus between Oktyabrskoe and Srednee lakes with tsunami sands. Blue circles – presence of marine diatoms.

алевритовых фракций при наличии хорошо выраженной моды 0.315–0.4 мм. Материал поступал в основном с подводного берегового склона и частично с пляжа. Палеоцунами Ts5 вызвало активную эрозию дюн, которые были основным источником материала.

Наличие морских диатомей, хорошая выдержанность прослоев отложений по простиранию далеко за пределами зоны пляжа, сложенного на этом участке берега хорошо окатанными валунами, уменьшение мощности слоев и крупности материала вглубь суши позволяют предположить, что данные пески фиксируют прохождение в районе зал. Касатка двух крупных цунами позднего голоцена. Высота заплеска была более 3 м, ширина зоны затопления превышала 0.5 км. Возраст палеоцунами оценивается около 1.4–1.5 тыс. л.н. (^{14}C -дата из подстилающего торфа 1440 ± 70 л.н., 1350 ± 60 кал. л.н., ЛУ-6324) и ~ 750 л.н., что хорошо сопоставляется с событиями Ts3 и Ts4, отложения которых обнаружены в разрезах заросшего озера. Прослой песка выше тefры Та-а был образован во время исторического цунами Ts1.

В районе Буревестника прослоев морских песков за пределами зоны штормового воздействия не было обнаружено.

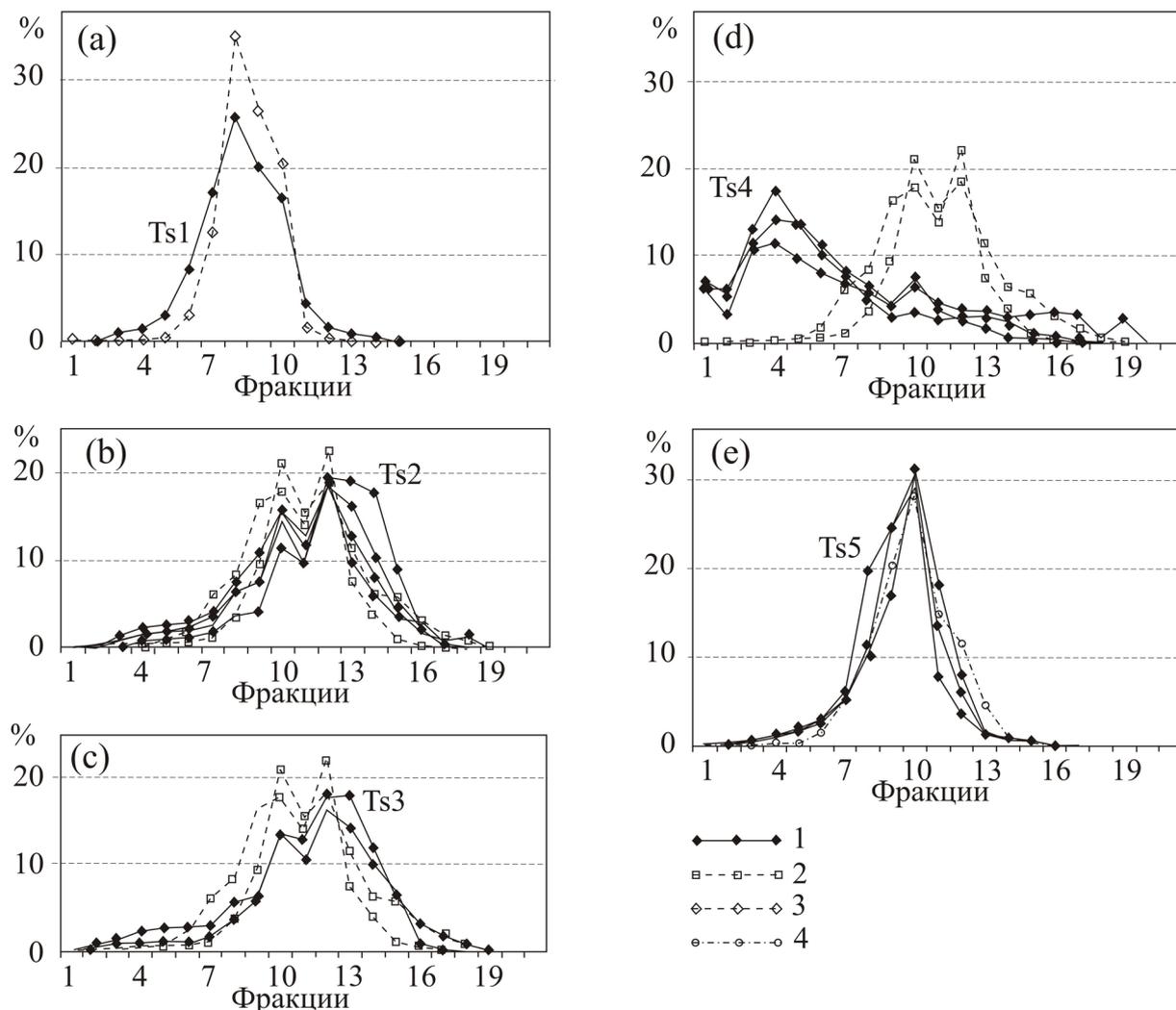


Рис. 4. Гранулометрический состав осадков палеоцунами, песков пляжа, осушки и дюн побережья зал Касатка, о. Итуруп. Фракции: (1) <0.05; (2) 0.05–0.063; (3) 0.063–0.08; (4) 0.08–0.1; (5) 0.1–0.125; (6) 0.125–0.16; (7) 0.16–0.2; (8) 0.2–0.25; (9) 0.25–0.315; (10) 0.315–0.4; (11) 0.4–0.5; (12) 0.5–0.63; (13) 0.63–0.8; (14) 0.8–1; (15) 1–1.25; (16) 1.25–1.6; (17) 1.6–2; (18) 2–2.5; (19) 2.5–3; (20) 3–4; (21) 4–5 мм. Отложения: 1 – цунами; 2 – пляжа; 3 – осушки; 4 – дюн.

Fig. 4. Grain size of paleotsunami deposits, beach sand, tidal flat and dunes of Kasatka Bay coast, Iturup Island. Fractions: (1) <0.05; (2) 0.05–0.063; (3) 0.063–0.08; (4) 0.08–0.1; (5) 0.1–0.125; (6) 0.125–0.16; (7) 0.16–0.2; (8) 0.2–0.25; (9) 0.25–0.315; (10) 0.315–0.4; (11) 0.4–0.5; (12) 0.5–0.63; (13) 0.63–0.8; (14) 0.8–1; (15) 1–1.25; (16) 1.25–1.6; (17) 1.6–2; (18) 2–2.5; (19) 2.5–3; (20) 3–4; (21) 4–5 mm. Deposits: 1 – tsunami; 2 – beach; 3 – tidal flat; 4 – dunes.

Корреляция событий

Наибольшая неопределенность существует в привязке исторического цунами, отложения которого залегают выше пеплового прослоя Та-а. Высота заплеска этого цунами на побережье зал. Касатка должна быть не менее 5 м. Крупное цунами в регионе, которое достигло о-ва Итуруп, наблюдалось 25.04.1843 ($M = 8.4$) [22, 26]. Очаг (землетрясение Tokachi-oki) находился к востоку от о. Хоккайдо напротив равнины Токачи [21]. Заплеск на берегах Хоккайдо был более 5 м

[3]. В проксимальной зоне на побережье Восточного Хоккайдо выше вулканического пепла Та-а встречено только два прослоя цунамигенных песков, покровы имеют незначительную протяженность вглубь суши, нижний прослой предположительно относят к цунами 1843 г., он встречен около г. Аккешы (Akkeshi) и на болотном массиве Киритаппу (Kiritappu marsh), севернее эти осадки не встречаются [2, 3, 25].

В разрезах на юге Малых Курил также были обнаружены цунамигенные пески выше вулканического пепла Та-а. На больших

высотах (9–10 м) найдено 1–2 прослоя цунамигенных песков (о. Зеленый). Нижний, предположительно, образовался при цунами 22.03.1894 (землетрясение Nemuro-oki, $M = 7.9–8.2$) с очагом к востоку от п-ова Немуро, верхний – след Шикотанского цунами 04.10.1994 ($M = 8.3$) [9, 40]. На Восточном Хоккайдо осадки цунами Nemuro-oki 1894 г. найдены локально на п-ове Немуро, на болоте Мотириппу (Mochirippu) и около г. Кусиру [41–43]. На о. Юрий отложения предположительно этого цунами найдены на высоте около 4 м. На островах Танфильева, Зеленый, Шикотан отложения исторических цунами обнаружены только на низких уровнях. Можно предположить, что в зал. Касатка проявилось сильное региональное цунами XVIII в. с очагом, расположенным около островов Уруп или Итуруп. В инструментальный период на о. Итуруп из региональных событий высокие заплески отмечены для цунами с очагами к востоку от о. Уруп [22]. В XVIII в. известно сильное цунами 29.06.1780 ($M = 7.5$) с очагом около о. Уруп, где заплеск достигал 12 м [22]. Возможно, высокие заплески были и на о. Итуруп.

Палеоцунами, следы которых обнаружены в озерно-болотных отложениях на побережье зал. Касатка (рис. 5), хорошо коррелируют с наиболее сильными событиями, проявившимися на юге Курил и о. Хоккайдо.

Цунами, датированное на о. Итуруп ~260 кал. л.н., ГИН-7387 [11, 31], попадает в диапазон 1670 ± 140 г. и отвечает прохождению мегацунами XVII в. Отложения этого цунами (мощность до 5 см) широко распространены на Малой Курильской гряде и о. Кунашир. На юге Малой Гряды заплески превышали 9–10 м, в закрытых бухтах о. Шикотан волна распространилась до 470 м вглубь суши; зона затопления на низменных

участках о. Кунашир превышала 1 км [7, 8]. На Восточном Хоккайдо цунами, произошедшее в XVII в., было самым значительным из последних событий [2, 3, 41, 44–48]. Мощности отложений в отдельных разрезах превышает 30 см. Вертикальный заплеск был до 18 м на равнине Токачи и до 10 м на п-ове Немуро [42]; зона затопления в районе Киритаппу достигала 3 км [3, 46]. Отложения цунами XVII в. найдены на юге Хоккайдо, берег округа Хидака (Hidaka), покров песка здесь прослежен до 150 м вглубь суши, вертикальный заплеск составил 3.86 м [49].

Исторических документов о проявлении этого цунами нет. Предполагается, что оно произошло в начале XVII в., поскольку отложения перекрываются маркирующими пеплами Us-b (1663) влк. Усу, Та-b (1667) влк. Тарумаи и Ко-с2 (1694) влк. Комагатаке. Согласно варвостратиграфии оз. Харутори (Harutori Lake),

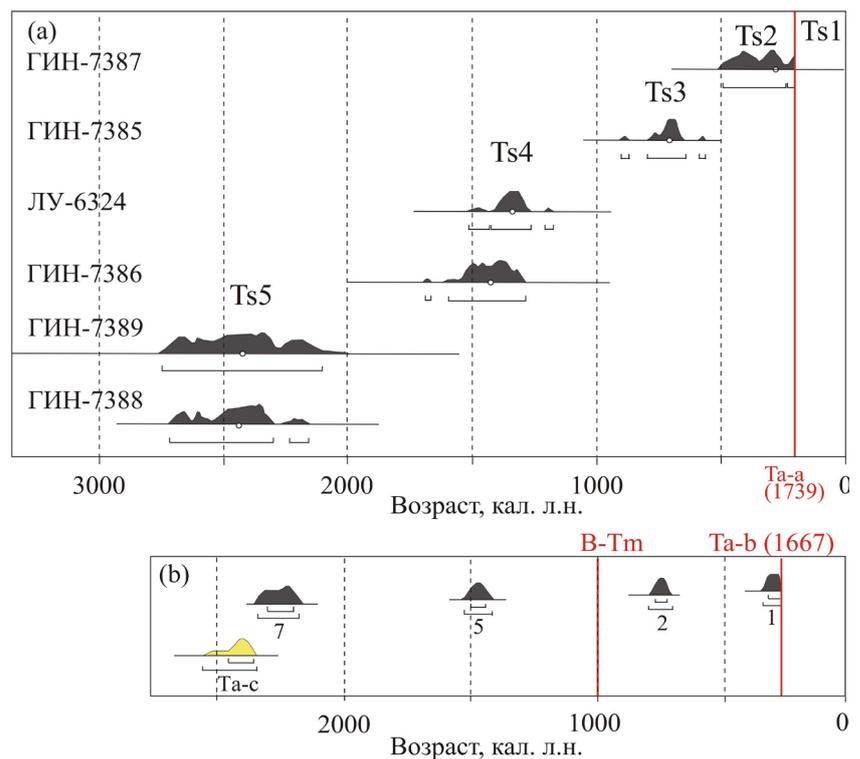


Рис. 5. Сравнение результатов радиоуглеродного датирования отложений палеоцунами. (а) Возрастной диапазон (2σ) отложений палеоцунами на побережье зал. Касатка, о. Итуруп. (б) Возрастной диапазон моделированных значений отложений палеоцунами на побережье равнины Токачи, Восточный Хоккайдо. 1–7 номера палеоцунами (по: [48]). Красным выделены индекс и возраст вулканических пеплов.

Fig. 5. Comparison of the radiocarbon dating results of paleotsunami deposits. (a) Age range (2σ) of paleotsunami deposits on the Kasatka Bay coast, Iturup Island. (b) Model age range of paleotsunami deposits on the Tokachi Plain coast, East Hokkaido. 1–7 paleotsunami numbers (according to [48]). Index and age of volcanic ashes are highlighted in red.

время прохождения цунами определяется около 1637 г. [3]. Предполагается, что цунами было вызвано гигантским землетрясением ($M = 8.8$). Численное моделирование и сравнение смоделированных зон затопления и распределения отложений цунами показало, что наиболее вероятной причиной мегацунами было мультисегментное субдукционное землетрясение с большой подвижкой вблизи оси желоба к востоку от Хоккайдо [3, 50]. Землетрясение вызвало косейсмический подъем берега на 1–1.5 м на протяжении ~100 км – от п-ова Немуро до г. Кусиро [16, 25, 51]. Остров Итуруп находился около северной границы распространения волн этого гигантского цунами.

Палеоцунами (Ts_3) с высотой заплеска >5 м на о. Итуруп и возрастом около 710 кал. л.н. отвечает мегацунами, проявившемуся на юге Курил и побережье Восточного Хоккайдо в XIII в. На о. Шикотан высота заплеска была ≥ 7.5 м, зона затопления – до 600 м, на о. Полонского – до 10 м и >700 м; на о. Зеленый – до 8.5 м и 200 м; на о. Юрий – до 7.5 м и 500 м; на о. Танфильева >9 м и 600 м соответственно. На низменном Серноводском перешейке о. Кунашир зона затопления была не менее 1170 м [8]. На Восточном Хоккайдо цунамигенный песок этого возраста обнаружен на побережье равнины Токачи, около г. Кусиро, в зал. Аккеши, низменности Киритаппу, эстуарии Оннето и на побережье п-ова Немуро. Мощность песчаных покровов больше, а простираение вглубь суши шире на п-ове Немуро, чем на побережье равнины Токачи [3, 42, 48, 52]. На болоте Киритаппу покров песка цунами XIII в. простирается дальше вглубь суши (>3 км) по сравнению с цунами XVII в. [45, 46]. Землетрясение вызвало подъем п-ова Немуро, что зафиксировано в строении барьерной формы оз. Фурен (коса Hashirikotan) [53, 54] и других участков берега [55]. Предполагается, что цунами было вызвано мультисегментным землетрясением ($M = 8.6$) с очагом в южной части Курило-Камчатского желоба, охватывающим сегменты Немуро и Токачи, эпицентр располагался восточнее по сравнению с землетрясением XVII в. [25, 46]. Поскольку очаг был приближен к крайнему югу Курил, на о. Итуруп палеоцунами XIII в. было более выражено, чем цунами XVII в.

Палеоцунами Ts_4 , произошедшее около 1430 кал. л.н. и зафиксированное в разрезах торфяников на побережье зал. Касатка, коррелирует с мегацунами, отложения которого найдены на юге Курил и Восточном Хоккайдо. На о. Шикотан зона затопления с тихоокеанской стороны была более 600 м, высота заплеска – 5 м, со стороны Южно-Курильского пролива высота заплеска была >3 м, в вершинах закрытых бухт цунами проникало на расстояние >400 м. На о. Полонского заплеск оценивается >6.5 м, зона затопления >750 м, близкие оценки сделаны для о. Зеленый; на о. Юрий высота заплеска составляла >7.3 м, цунами полностью перехлестнуло низменные перешейки; на о. Танфильева прослой песка этого цунами найден на высоте около 6 м н.у.м. в 400 м от берега. На побережье Восточного Хоккайдо отложения этого цунами найдены на п-ове Немуро (высота заплесков >10 м, зона затопления 400 м [42, 52, 56]), на болоте Киритаппу (зона затопления >2.6 км [46]), болоте Мотириппу [25, 43], около г. Аккеши [57], г. Кусиро [45]; на берегах равнины Токачи [42, 48].

Палеоцунами, запечатленное в отложениях заросшего озера на о. Итуруп около 2.3–2.4 тыс. кал. л.н., можно соотносить с палеоцунами, произошедшим около 2.3 тыс. кал. л.н. на о. Уруп. Следует отметить, что датирование событий в этом возрастном диапазоне не может достичь высокой точности, поскольку на калибровочной кривой хорошо выражено протяженное плато [19] и при переводе радиоуглеродного возраста в календарный получается довольно широкий возрастной диапазон. Отложения (мощность 2 см) найдены в разрезе торфяника на побережье бухты Осьма. Зона затопления составила 400–500 м, высота заплеска – не менее 5 м [10]. Здесь отложения цунами перекрыты тефрой С-Кг, источником которой был вулкан Ветрового перешейка, его извержение произошло около 2000 л.н. [12]. Цунами близкого возраста ярко проявилось на Малых Курилах. Здесь отложения палеоцунами залегают в разрезах торфяников чуть выше вулканического пепла Та-с (2.4–2.5 тыс. л.н.) влк. Тарумаи. В закрытых бухтах о. Шикотан горизонтальный заплеск был более 200–500 м [58], с тихоокеанской стороны – 500–800 м,

высота заплеска была 3–5 м [59]. На о. Полонского высота заплеска превышала 5–6 м, дальность затопления – 800 м, на о. Зеленый – 7 и 700 м, о. Юрий – >7 и 500 м, о. Танфильева – 8 м и >500 м соответственно. На Восточном Хоккайдо в это время также выделяется одно из мегацунами, связанное с крупным землетрясением ($M = 8.6$) [42, 46]. Цунамигенный песок найден на болотах п-ова Немуро [53, 56], Киритаппу, где заплеск был более 2 км [46]; около Аккеша, оз. Харутори (Harutori-ko) в г. Кусиро, где среди тонкослоистых илов обнаружен слой цунамигенного песка (мощностью до 50 см), горизонтальный заплеск был более 400 м [52]. Цунами проявилось и на равнине Токачи, мощность отложений тут значительно меньше [42, 48, 57]. Увеличение вертикального и горизонтального заплесков, а также мощности слоя осадков является свидетельством, что очаг цунамигенного землетрясения располагался в южной части желоба в секторах напротив Немуро–Кусиро. Землетрясение вызвало подъем берега на участке от Кусиро до Немуро [55]. Для двух палеоцунами, произошедших около 1.5 и 2.3–2.4 тыс. л.н., не было построено сейсмологических моделей, но предполагается, что причиной были мультисегментные землетрясения с большими подвижками [3, 25]. В периферийную зону распространения цунами, вероятно, попадали острова Итуруп и Уруп.

Заключение

На побережье зал. Касатка о. Итуруп идентифицированы отложения от наиболее сильных цунами, проявившихся здесь за последние 3500 лет. Выделены следы одного исторического цунами, имевшего региональный масштаб, и 4 палеоцунами (XVII, XIII вв., 1.5, 2.3–2.4 тыс. кал. л.н.). Высота заплесков выявленных событий составляла более 5 м, дальность затопления превышала 250–500 м. Средняя повторяемость таких цунами составляет 500–700 лет. События хорошо сопоставляются с мегацунами, восстановленными для юга Курильской гряды и наиболее ярко проявившимися на побережье Восточного Хоккайдо. Остров Итуруп попадал в северную краевую зону распространения волн цунами, а палеоцунами 2.3–2.4 тыс. кал. л.н., вероятно, достигло юга о. Уруп. Цунами были вызваны

гигантскими мультисегментными землетрясениями с очагами в южной части Курило-Камчатского желоба в районе о. Хоккайдо. Как показало Тохоку цунами 2011 г., заплески цунами трансокеанского масштаба, имевшие очаги в Японском желобе, не имели катастрофических последствий на Южных Курилах, попадавших в периферийную зону распространения волны. Региональные цунами в инструментальный период наблюдения имели меньший пространственный масштаб и, несмотря на высокие заплески на отдельных участках берега, практически не оставили следов в геологической летописи в районе исследования. При региональных цунами к наиболее цунамиопасным участкам относится берег в вершине зал. Касатка, где по пляжу следует транспорт по маршруту Курильск–Буревестник–Горный, а также находится причал в пос. Буревестник.

Список литературы

1. Minoura K., Nakaya S. 1991. Traces of tsunamis preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits: some examples from Northeast Japan. *Journal of Geology*, 99(2): 265–287. <https://doi.org/10.1086/629488>
2. Nanayama F., Satake K., Furukawa R., Shimokawa K., Atwater B.F., Shigeno K., Yamaki S. 2003. Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kurile trench. *Nature*, 424(6949): 660–663. <https://doi.org/10.1038/nature01864>
3. Nanayama F. 2021. Evidence of giant earthquakes and tsunamis of the seventeenth-century type along the southern Kuril subduction zone, eastern Hokkaido, northern Japan: a review. In: *Characterization of modern and historical seismic-tsunami events, and their global-societal impacts*. London: Geological Society, Special Publ., 501: 131–157. <https://doi.org/10.1144/sp501-2019-99>
4. Pinegina T.K., Bazanova L.I., Zelenin E.A., Bourgeois J., Kozhurin A.I., Medvedev I.P., Vydrin D.S. 2018. Holocene tsunamis in Avachinsky Bay, Kamchatka, Russia. *Pure and Applied Geophysics*, 175(4): 1485–1506. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1830-0>
5. Кайстренко В.М. 2019. Особенности использования данных о палеоцунами для оценок цунамиопасности. *Геосистемы переходных зон*, 3(4): 403–416. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.403-416>
6. MacInnes B., Kravchunovskaya E., Pinegina T., Bourgeois J. 2016. Paleotsunamis from the central Kuril Islands segment of the Japan-Kuril-Kamchatka subduction zone. *Quaternary Research*, 86(1): 54–66. <https://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2016.03.005>
7. Iliiev A.Ya., Kaistrenko V.M., Gretskaya E.V., Tikhonchuk E.A., Razjigaeva N.G., Grebennikova T.A., Ganzey L.A., Kharlamov A.A. 2005. Holocene tsunami traces on Kunashir Island, Kurile subduction

- zone. In: *Tsunamis: Sources, Monitoring and Coastal Hazards*. Kluwer Publ., p. 171–192. https://doi.org/10.1007/1-4020-3331-1_10
8. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А., Арсланов Х.А., Кайстренко В.М., Горбунов А.О., Петров А.Ю. **2017**. Проблема палеореконокструкций мегацунами на Южных Курилах. *Тихоокеанская геология*, 36(1): 37–49.
 9. Разжигаева Н.Г., Гребенникова Т.А., Ганзей Л.А., Пономарев В.И., Харламов А.А. **2022**. Отклик озерной экосистемы Малой Курильской гряды на палеоклиматические и сейсмические события. *Геофизические процессы и биосфера*, 21(4): 53–73. <https://doi.org/10.21455/GPB2022.4-4>
 10. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Belyanina N.I., Ganzei K.S., Kaistrenko V.M., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Rybin A.V. **2019**. Multiproxy record of late Holocene climatic changes and natural hazards from paleolake deposits of Urup Island (Kuril Islands, North-Western Pacific). *Journal of Asian Earth Sciences*, 181: 103916. <https://doi.org/10.1016/J.JSEAES.2019.103916>
 11. Булгаков Р.Ф., Иванов В.Н., Храмушин В.Н., Певзнер М.М., Сулержицкий Л.Д. **1995**. Исследование следов палеоцунами для цунамирайонирования. *Физика Земли*, 2: 18–27.
 12. Бергаль-Кувикас О.В., Смирнов С.З., Агатова А.Р., Дегтерев А.В., Разжигаева Н.Г., Пинегина Т.К., Портнягин М.В., Карманов Н.С., Тимина Т.Ю. **2023**. Голоценовое эксплозивное извержение на перешейке Ветровой (о. Итуруп) как источник маркирующего горизонта тефры (~2000 лет назад) в центральной части Курильской островной дуги. *Доклады РАН*, 511(1): 46–54. <https://doi.org/10.31857/S2686739723600601>
 13. Ishibashi K., Satake K. **1998**. Problems on forecasting great earthquakes in the subduction zones around Japan by means of paleoseismology. *Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan. 2nd ser.)*, 50(appendix): 1–21. https://doi.org/10.4294/zisin1948.50.appendix_1
 14. Dawson A.G., Shi S. **2000**. Tsunami deposits. *Pure and Applied Geophysics*, 157: 875–897. <https://doi.org/10.1007/s000240050010>
 15. Pinegina T.K., Bourgeois J. **2001**. Historical and paleotsunami deposits on Kamchatka, Russia: long-term chronologies and long-distance correlations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1(4): 177–185. <https://doi.org/10.5194/nhess-1-177-2001>
 16. Atwater B.F., Furukawa R., Hemphill-Haley E., Ikeda Y., Kashima K., Kawase K., Kesley H.M., Moore A.L., Nanayama F., Nishimura Y., Odagiri S., Ota Y., Park S.-Ch., Satake K., Sawai Y., Shimokawa K. **2004**. Seventeenth-century uplift in eastern Hokkaido, Japan. *The Holocene*, 14(4): 487–501. <https://doi.org/10.1191/0959683604hl726rp>
 17. *Tsunamiites. Features and implications*. **2008**. Amsterdam: Elsevier Science, 411 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51552-0.X0001-X>
 18. Dura T., Hemphill-Haley E. **2020**. Diatoms in tsunami deposits. In: Engel. M., Pilarczyk J., May S.M. et al. (eds.) *Geological records of tsunamis and other extreme waves*. Amsterdam: Elsevier, p. 291–319. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815686-5.00014-6>
 19. Reimer P., Austin W.E.N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Ramsey B.C., Butzin M., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T., Hogg A.G. **2020**. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 kcal BP). *Radiocarbon*, 62(4): 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
 20. *Атлас Курильских островов*. **2009**. Москва; Владивосток: ДИК, 2009. 516 с.
 21. *NCEI/WDS Global historical tsunami database*. National Geographical data center. URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml> (accessed 15 August 2023); <https://doi.org/10.7289/V5PN93H7>
 22. Соловьев С.Л. **1978**. Основные данные о цунами на Тихоокеанском побережье СССР, 1737–1976 гг. В кн.: Саваренский У.Ф., Соловьев С.Л. (ред.). *Изучение цунами в открытом океане*. М.: Наука, с. 61–128. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-izuchenie-cunamiv-otkrytom-okeane.pdf>
 23. Соловьева О.Н. **2000**. Проявление катастрофических цунами у берегов России. В кн.: Соболев Г.А. (ред.) *Природные опасности России. Т. 2. Сейсмические опасности*. М.: КРУК, с. 231–234.
 24. Шубин В.О. **1999**. Поселения Российско-американской компании на Курильских островах. В кн.: Болховитинов Н.Н. (ред.) *Русская Америка, 1799–1999: материалы междунар. конф. «К 200-летию образования Российско-американской компании. 1799–1999»*, Москва, 6–10 сент. 1999 г. М.: ИВИ РАН, с. 220–239. URL: https://www.booksite.ru/fulltext/russ_america/05_14.html
 25. Sawai Y. **2020**. Subduction zone paleoseismology along the Pacific coast of northeast Japan – progress and remaining problems. *Earth-Science Reviews*, 208: 103261. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2020.103261>
 26. Гусьяков В.К. **2016**. Цунами на дальневосточном побережье России: историческая перспектива и современная проблематика. *Геология и геофизика*, 57(9): 1601–1615. <https://doi.org/10.15372/GiG20160901>
 27. Шевченко Г.В., Лоскутов А.В., Кайстренко В.М. **2018**. Новая карта цунамирайонирования Южных Курильских островов. *Геосистемы переходных зон*, 2(3): 225–238. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.225-238>
 28. Королев Ю.П., Жукова Л.Д., Золотухина Н.Д., Клочков А.А., Куликов Е.А., Куркин В.Н., Кругликов А.А., Левин Б.В., Поплавский А.А., Терентьев Н.С. **1997**. Проявление цунами 4 октября 1994 года на побережье Курильских островов. В кн.: Сергеев К.Ф. (ред.) *Проявления конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 годов на побережье России*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, с. 74–92. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией, т. 8).
 29. *Шикотанское землетрясение и цунами 4(5) октября 1994 года*. **2015**. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 128 с.

30. Кайстренко В.М., Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н. **2011**. Проявление Тохoku цунами 11 марта 2011 года на Российском тихоокеанском побережье. *Вопросы инженерной сейсмологии*, 38(1): 41–64.
31. Булгаков Р.Ф. **1994**. *История развития южных островов Большой Курильской гряды в плейстоцене*: дис. ... канд. геогр. наук. Московский гос. ун-т, Москва. 193 с.
32. Bulgakov R. **1996**. Reconstruction of Quaternary history of southern Kuril Islands. *Journal of Coastal Research*, 12(4): 930–939. URL: <https://www.jstor.org/stable/4298543>
33. Lozhkin A., Minyuk P., Cherepanova M., Anderson P., Finney B. **2017**. Holocene environments of central Iturup Island, southern Kuril archipelago, Russian Far East. *Quaternary Research*, 88: 23–38. <https://doi.org/10.1017/qua.2017.21>
34. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Мохова Л.М., Дегтерев А.В., Ежкин А.К., Рыбин А.В., Арсланов Х.А., Максимов Ф.Е., Петров А.Ю. **2022**. Запись изменений природной среды в озерно-болотных отложениях горной части острова Итуруп с позднеледниковья. *Тихоокеанская геология*, 41(2): 59–74. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2022-41-2-59-74>
35. Lozhkin A.V., Cherepanova M.V., Anderson P.M., Minyuk P.S., Finney B.P. **2022**. Glukhoye Lake: Middle to Late Holocene environments of Kunashir Island (Kuril Archipelago, Russian Far East). *Boreas*, 51(2): 364–384. <https://doi.org/10.1111/bor.12565>
36. Nazarova L., Grebennikova T.A., Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Belyanina N.I., Arslanov Kh.A., Kaistrenko V.M., Gorbunov A.O., Kharlamov A.A., Rudaya N., Palagushkina O., Biskaborn B.K., Diekmann B. **2017**. Reconstruction of Holocene environmental changes in Southern Kurils (North-Western Pacific) based on palaeolake sediment proxies from Shikotan Island. *Global and Planetary Change*, 159: 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.10.005>
37. Nazarova L., Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Makarova T.R., Lyashevskaya M.S., Biskaborn B.K., Hozelmann P., Golovatyuk L.V., Diekmann B. **2023**. The middle to Late Holocene environments on the Iturup Island (Kurils, North Western Pacific). *Quaternary International*, 644–645: 5–20. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.05.003>
38. Дегтерев А.В., Пинегина Т.К., Разжигаева Н.Г., Кожурин А.И. **2021**. Голоценовая летопись вулканических извержений о. Итуруп. *Природа*, 12: 17–22.
39. 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. <http://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.070>
40. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А. **2006**. Проявление палеоцунами на о. Зеленый (Малая Курильская дуга) в голоцене. *Вулканология и сейсмология*, 4: 57–73.
41. Sawai Yu. **2002**. Evidence for 17th-century tsunamis generated on the Kuril-Kamchatka subduction zone, Lake Tokotan, Hokkaido, Japan. *J. of Asian Earth Sciences*, 20(8): 903–911. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(01\)00077-3](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(01)00077-3)
42. Hirakawa K., Nakamura Y., Nishimura Y. **2005**. Holocene huge tsunami along the Pacific Coast of: including the tsunami of the 2003 Tokachi-oki earthquake. *Chikyu Monthly (Extra Edition)*, 49: 173–180. (Digital Archive).
43. Sawai Yu., Kamataki T., Shishikura M., Nasu H., Okamura Y., Satake K., Thomson K.H., Matsumoto D., Fujii Y., Komatsubara J., Aung T.T. **2009**. Aperiodic recurrence of geologically recorded tsunamis during the past 5500 years in eastern Hokkaido, Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B1): B01319. <https://doi.org/10.1029/2007JB005503>
44. Nanayama F., Satake K., Shimokawa K., Furukawa R., Shigeno K. **2000**. Evaluation of frequency and invasion area of large earthquake tsunamis along the Kurile subduction zone by postulated tsunami deposits. In: Sugiyama Y. (ed.) *Interim Report on Active Fault and Paleoeearthquake Research in the 1999 Fiscal Year. Geological Survey of Japan Interim Report # EQ/00/2*. (Annual Meeting of the Geological Society of Japan). Tsukuba, p. 1–17. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/geosocabst/2000/0/2000_97_2/_article/-char/en
45. Nanayama F., Shigeno K., Soeda Y., Furukawa R., Okahashi H., Saito K., Yokoyama Y., Satake K., Nakagawa M. **2003**. Tsunami traces in the 17th century and evaluations of their inundation limits from distribution of event deposits along the southern Tokachi coasts, eastern Hokkaido, northern Japan. *Annual Report on Active Fault Paleoeearthquake Researches*, 3: 297–314. URL: <https://www.gsj.jp/data/actfault-eq/h14seika/pdf/tokachi.pdf>
46. Nanayama F., Furukawa R., Shigeno K., Makino A., Soeda Y., Igarashi Y. **2007**. Nine unusually large tsunami deposits from the past 4000 years at Kiritappu marsh along the southern Kuril Trench. *Sedimentary Geology*, 200(3–4): 275–294. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.01.008>
47. Satake K. **2017**. Great earthquakes in the 17th century along the Kuril and Japan Trenches. *Bull. of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 92: 31–47. URL: <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/BERI/pdf/IHO922401.pdf>
48. Ishizawa T., Goto K., Yokoyama Y., Miyairi Y., Sawada C., Nishimura Y., Sugawara D. **2017**. Sequential radiocarbon measurement of bulk peat for high-precision dating of tsunami deposits. *Quaternary Geochronology*, 41: 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2017.05.003>
49. Takashimizu Y., Nishina K., Kakami G., Sato Y., Okamura S., Nakanishi R., Tamura M., Hirose W., Takahashi R., Ishimaru S. **2017**. Identification of 17th-century tsunami deposits on the northern Hidaka coast, Hokkaido, northern Japan. *The Quaternary Research (Daiyonki-Kenkyu)*, 56(1): 1–9. <https://doi.org/10.4116/jaqua.56.1>
50. Ioki K., Tanioka Y. **2016**. Re-estimated fault model of the 17th century great earthquake off Hokkaido

- using tsunami deposit data. *Earth and Planetary Science Letters*, 433: 133–138. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.10.009>
51. Sawai Y., Satake K., Kamataki T., Nasu H., Shishikura M., Atwater B.F., Horton B.P., Kelsey H.M., Nagumo T., Yamaguchi M. **2004**. Transient uplift after a 17th-century earthquake along the Kuril subduction zone. *Science*, 306(5703): 1918–1920. <https://doi.org/10.1126/science.1104895>
 52. Nanayama F., Shigeno K., Miura K., Makino A., Furukawa R., Satake K., Saito K., Sagayama T., Nakagawa M. **2002**. Evaluation of tsunami inundation limits from distribution of event deposits along the Kuril subduction zone, eastern Hokkaido: comparison of the Tokachi and Nemuro-Kushiro coasts. *Annual Report on Active Fault Paleoseismic Researches*, 2: 209–222.
 53. Nanayama F. **2018**. The geomorphological evolution of Hashirikotan barrier spit system controlled by regional seismotronics, southern Kuril subduction zone. In: *Proceedings of the International Meeting on Eruptive History and Informatics*. Kumamoto: Kumamoto University, 2: 4–26. URL: https://www.researchgate.net/publication/322818218_The_geomorphological_evolution_of_Hashirikotan_barrier_spit_system_controlled_by_regional_seismotronics_southern_Kuril_subduction_zone
 54. Nanayama F., Watanabe K., Shigeno K., Ishii M., Ishiwata K., Inokuma S. **2018**. Giant earthquake tsunami traces and related regional crustal movements recognized around the Kuril subduction zone, eastern Hokkaido, northern Japan. *The Journal of the Geological Society of Japan*, 124(6): 413–433. <https://doi.org/10.5575/geosoc.2018.0013>
 55. Kelsey H., Satake K., Sawai Y., Sherrod B., Shimokawa K., Shishikura M. **2006**. Recurrence of postseismic coastal uplift, Kuril subduction zone, Japan. *Geophysical Research Letters*, 33: L13315. <https://doi.org/10.1029/2006GL026052>
 56. Nanayama F., Shigeno K., Shitaoka Y., Furukawa R. **2011**. Geological study of unusual tsunami deposits in the Kuril subduction zone for mitigation of tsunami disasters. In: *The tsunami treat – Research and Technology*. Publisher InTech, 283–298. <https://doi.org/10.5772/14249>
 57. Soeda Y., Nanayama F., Shigeno K., Furukawa R., Kumasaki N., Tsutsumi Y., Kurumazuka H., Sawai Y., Satake K., Nakagawa M., Yamada G., Katsuragawa M., Akamatsu M., Ishii M. **2003**. Nine tsunami sand deposits in peat layers at the historic site of Kokutaija Temple in Akkeshi Town, Eastern Hokkaido, and their correlation with regional tsunami events. *Report on Active Faults and Paleoseismicity*, 3: 285–296. URL: <https://www.gsj.jp/data/actfault-eq/h14seika/pdf/akkeshi.pdf>
 58. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Ivanova E.D., Kharlamov A.A., Kaistrenko V.M., Arslanov Kh.A., Chernov S.B. **2014**. The Tohoku Tsunami of 11 March 2011: The key event to understanding tsunami sedimentation on the coasts of closed bays of the Lesser Kuril Islands. *Pure Applied Geophysics*, 171(12): 3307–3328. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0794-y>
 59. Разжигаяева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А., Ильев А.Я., Кайстренко В.М. **2008**. Геологическая летопись палеоцунами на о. Шикотан (Малая Курильская гряда) в голоцене. *Вулканология и сейсмология*, 4: 50–66. EDN: JHMZVF

References

1. Minoura K., Nakaya S. **1991**. Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits: some examples from Northeast Japan. *Journal of Geology*, 99(2): 265–287. <https://doi.org/10.1086/629488>
2. Nanayama F., Satake K., Furukawa R., Shimokawa K., Atwater B.F., Shigeno K., Yamaki S. **2003**. Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kurile trench. *Nature*, 424(6949): 660–663. <https://doi.org/10.1038/nature01864>
3. Nanayama F. **2021**. Evidence of giant earthquakes and tsunamis of the seventeenth-century type along the southern Kuril subduction zone, eastern Hokkaido, northern Japan: a review. In: *Characterization of modern and historical seismic-tsunami events, and their global-societal impacts*. London: Geological Society, Special Publ., 501: 131–157. <https://doi.org/10.1144/sp501-2019-99>
4. Pinegina T.K., Bazanova L.I., Zelenin E.A., Bourgeois J., Kozhurin A.I., Medvedev I.P., Vydrin D.S. **2018**. Holocene tsunamis in Avachinsky Bay, Kamchatka, Russia. *Pure and Applied Geophysics*, 175(4): 1485–1506. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1830-0>
5. Kaistrenko V.M. **2019**. Peculiarity of using the paleotsunami data for the tsunami hazard estimation. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(4): 403–416. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.403-416>
6. MacInnes B., Kravchunovskaya E., Pinegina T., Bourgeois J. **2016**. Paleotsunamis from the central Kuril Islands segment of the Japan-Kuril-Kamchatka subduction zone. *Quaternary Research*, 86(1): 54–66. <https://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2016.03.005>
7. Iliev A.Ya., Kaistrenko V.M., Gretskeya E.V., Tikhonchuk E.A., Razjigaeva N.G., Grebennikova T.A., Ganzey L.A., Kharlamov A.A. **2005**. Holocene tsunami traces on Kunashir Island, Kurile subduction zone. In: *Tsunamis: Sources, Monitoring and Coastal Hazards*. Kluwer Publ., p. 171–192. https://doi.org/10.1007/1-4020-3331-1_10
8. Razzhigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Kharlamov A.A., Arslanov Kh.A., Kaistrenko V.M., Gorbunov A.O., Petrov A.Yu. **2017**. The problem of past megatsunami reconstructions on the southern Kurils. *Russian Journal of Pacific Geology*, 11(1): 34–45. <https://dx.doi.org/10.1134/S1819714017010079>
9. Razzhigaeva N.G., Grebennikova T.A., Ganzey L.A., Ponomarev V.I., Kharlamov A.A. **2022**. Response of the lake ecosystem of the Lesser Kuril Ridge to paleoclimatic and seismic events. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 58(11): 1377–1397. <https://doi.org/10.1134/S0001433822110068>
10. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Belyanina N.I., Ganzey K.S., Kaistrenko V.M., Ar-

- slanov Kh.A., Maksimov F.E., Rybin A.V. **2019**. Multiproxy record of late Holocene climatic changes and natural hazards from paleolake deposits of Urup Island (Kuril Islands, North-Western Pacific). *Journal of Asian Earth Sciences*, 181: 103916. <https://doi.org/10.1016/J.JSEAES.2019.103916>
11. Bulgakov R.F., Ivanov V.V., Khrumushin V.N., Pevzner M.M., Sulerzhitsky L.D. **1995**. [Study of paleotsunami traces for the tsunami zoning]. *Physics of the Earth*, 2: 18–27. (In Russ.).
 12. Bergal-Kuvikas O.V., Smirnov S.Z., Agatova A.R., Degterev A.V., Razjigaeva N.G., Pinegina T.K., Portnyagin M.V., Karmanov N.S., Timina T.Yu. **2023**. The Holocene explosive eruption on Vetrovoi Isthmus (Iturup Island) as a source of the marker tephra layer of 2000 cal. yr BP in the Central Kuril island arc. *Doklady Earth Sciences*, 511(1): 550–557. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23600597>
 13. Ishibashi K., Satake K. **1998**. Problems on forecasting great earthquakes in the subduction zones around Japan by means of paleoseismology. *Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan. 2nd ser.)*, 50(appendix): 1–21. https://doi.org/10.4294/zisin1948.50.appendix_1
 14. Dawson A.G., Shi S. **2000**. Tsunami deposits. *Pure and Applied Geophysics*, 157: 875–897. <https://doi.org/10.1007/s000240050010>
 15. Pinegina T.K., Bourgeois J. **2001**. Historical and paleotsunami deposits on Kamchatka, Russia: long-term chronologies and long-distance correlations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1(4): 177–185. <https://doi.org/10.5194/nhess-1-177-2001>
 16. Atwater B.F., Furukawa R., Hemphill-Haley E., Ikeda Y., Kashima K., Kawase K., Kesley H.M., Moore A.L., Nanayama F., Nishimura Y., Odagiri S., Ota Y., Park S.-Ch., Satake K., Sawai Y., Shimokawa K. **2004**. Seventeenth-century uplift in eastern Hokkaido, Japan. *The Holocene*, 14(4): 487–501. <https://doi.org/10.1191/0959683604hl726rp>
 17. *Tsunamiites. Features and implications*. **2008**. Amsterdam: Elsevier Science, 411 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51552-0.X0001-X>
 18. Dura T., Hemphill-Haley E. **2020**. Diatoms in tsunami deposits. In: Engel M., Pilarczyk J., May S.M. et al. (eds.) *Geological records of tsunamis and other extreme waves*. Amsterdam: Elsevier, p. 291–319. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815686-5.00014-6>
 19. Reimer P., Austin W.E.N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Ramsey B.C., Butzin M., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T., Hogg A.G. **2020**. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 kcal BP). *Radiocarbon*, 62(4): 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
 20. *Atlas of the Kuril Islands*. **2009**. Moscow; Vladivostok: DIK, 516 p. (In Russ.).
 21. *NCEI/WDS Global historical tsunami database*. National Geographical data center. URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml> (accessed 15 August 2023); <https://doi.org/10.7289/V5PN93H7>
 22. Soloviev S.L. **1978**. [Main data on tsunamis on the Pacific coast of the USSR, 1737–1976]. In: Savarensky U.F., Soloviev S.L. (eds.) [*Study of tsunami in the open ocean*]. Moscow: Nauka, p. 61–128. (In Russ.). URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geoknigazuchenie-cunamiv-otkrytom-okeane.pdf>
 23. Solovieva O.N. **2000**. [Manifestation of catastrophic tsunami near Russian coasts]. In: Sobolev G.A. (ed.) [*Natural Hazards of Russia. Vol. 2. Seismic Hazards*]. Moscow: KRUK, p. 231–234. (In Russ.).
 24. Shubin V.O. **1999**. [Settlements of the Russian-American Company on Kuril Islands]. In: Bolkhovitinov N.N. (ed.) [*Russian America 1799–1999: Proceeding of Intern. Conf. «To 200-year of foundation of the Russian-American Company. 1799–1999»*], Moscow, 6–10 Sept. 1999. Moscow: IGH RAS, 220–239. (In Russ.). URL: https://www.booksite.ru/fulltext/russ_america/05_14.html
 25. Sawai Y. **2020**. Subduction zone paleoseismology along the Pacific coast of northeast Japan – progress and remaining problems. *Earth-Science Reviews*, 208: 103261. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2020.103261>
 26. Gusiakov V.K. **2016**. Tsunamis on the Russian Pacific coast: history and current situation. *Russian Geology and Geophysics*, 57(9): 1259–1268. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.08.011>
 27. Shevchenko G.V., Loskutov A.V., Kaystrenko V.M. **2018**. A new map of tsunami hazard for the South Kuril Islands. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(3): 225–238. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.225-238>
 28. Korolev Yu.P., Zhukova L.D., Zolotukhina N.D., Klochkov A.A., Kulikov E.A., Kurkin E.A., Kruglikov A.A., Levin B.V., Poplavsky A.A., Terentiev N.S. **1997**. Manifestation of the 4 October 1994 tsunami on the coast of Kuril Islands. In: Sergeev K.F. (ed.) *Manifestations of certain tsunami. 1993 and 1994 Tsunami on the Russian coast*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, p. 74–92. (In Russ.).
 29. [*The 4(5) October 1994 Shikotan earthquake and tsunami*]. **2015**. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, 128 p. (In Russ.).
 30. Kaistrenko V.M., Shevchenko G.V., Ivelskaya T.N. **2012**. Effects of the Tohoku tsunami of March 11, 2011 on the Pacific coast of Russia. *Seismic Instruments*, 48(2): 124–143. <https://doi.org/10.3103/S0747923912020041>
 31. Bulgakov R.F. **1994**. [*History of development of southern islands of the Great Kuril Ridge in the Pleistocene*]. Thesis ... Cand. of Sci. (Geography). Moscow State University, Moscow. (Manuscript). (In Russ.).
 32. Bulgakov R. **1996**. Reconstruction of Quaternary history of southern Kuril Islands. *Journal of Coastal Research*, 12(4): 930–939. URL: <https://www.jstor.org/stable/4298543>
 33. Lozhkin A., Minyuk P., Cherepanova M., Anderson P., Finney B. **2017**. Holocene environments of central Iturup Island, southern Kuril archipelago, Russian Far

- East. *Quaternary Research*, 88: 23–38. <https://doi.org/10.1017/qua.2017.21>
34. 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>
 35. Lozhkin A.V., Cherepanova M.V., Anderson P.M., Minyuk P.S., Finney B.P. **2022**. Glukhoye Lake: Middle to Late Holocene environments of Kunashir Island (Kuril Archipelago, Russian Far East). *Boreas*, 51(2): 364–384. <https://doi.org/10.1111/bor.12565>
 36. Nazarova L., Grebennikova T.A., Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Belyanina N.I., Arslanov Kh.A., Kaistrenko V.M., Gorbunov A.O., Kharlamov A.A., Rudaya N., Palagushkina O., Biskaborn B.K., Diekmann B. **2017**. Reconstruction of Holocene environmental changes in Southern Kurils (North-Western Pacific) based on palaeolake sediment proxies from Shikotan Island. *Global and Planetary Change*, 159: 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.10.005>
 37. Nazarova L., Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Makarova T.R., Lyashevskaya M.S., Biskaborn B.K., Holzmann P., Golovatyuk L.V., Diekmann B. **2023**. The middle to Late Holocene environments on the Iturup Island (Kurils, North Western Pacific). *Quaternary International*, 644–645: 5–20. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.05.003>
 38. Degterev A.V., Pinegina T.K., Razjigaeva N.G., Kozhurin A.I. **2021**. Holocene records of volcanic eruptions on Iturup Island. *Priroda = Nature*, 12: 17–22. (In Russ.)
 39. 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. <http://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.070>
 40. Razzhigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Kharlamov A.A. **2006**. Holocene manifestations of paleotsunamis at the Lesser Kuril arc (Zelenyi I.). *Volcanology and Seismology*, 4: 57–73. (In Russ.)
 41. Sawai Yu. **2002**. Evidence for 17th-century tsunamis generated on the Kuril-Kamchatka subduction zone, Lake Tokotan, Hokkaido, Japan. *J. of Asian Earth Sciences*, 20(8): 903–911. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(01\)00077-3](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(01)00077-3)
 42. Hirakawa K., Nakamura Y., Nishimura Y. **2005**. Holocene large-sized tsunamis: including the tsunami of the 2003 Tokachi-oki earthquake. *Chikyū Monthly (Extra Edition)*, 49: 173–180. (Digital Archive).
 43. Sawai Yu., Kamataki T., Shishikura M., Nasu H., Okamura Y., Satake K., Thomson K.H., Matsumoto D., Fujii Y., Komatsubara J., Aung T.T. **2009**. Aperiodic recurrence of geologically recorded tsunamis during the past 5500 years in eastern Hokkaido, Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B1): B01319. <https://doi.org/10.1029/2007JB005503>
 44. Nanayama F., Satake K., Shimokawa K., Furukawa R., Shigeno K. **2000**. Evaluation of frequency and invasion area of large earthquake tsunamis along the Kurile subduction zone by postulated tsunami deposits. In: *Interim Report on Active Fault and Paleoeearthquake Research in the 1999 Fiscal Year. Geological Survey of Japan Interim Report # EQ/00/2* (Annual Meeting of the Geological Society of Japan). Tsukuba, p. 1–17. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/geosocabst/2000/0/2000_97_2/_article/-char/en
 45. Nanayama F., Shigeno K., Soeda Y., Furukawa R., Okahashi H., Saito K., Yokoyama Y., Satake K., Nakagawa M. **2003**. Tsunami traces in the 17th century and evaluations of their inundation limits from distribution of event deposits along the southern Tokachi coasts, eastern Hokkaido, northern Japan. *Annual Report on Active Fault Paleoeearthquake Researches*, 3: 297–314. URL: <https://www.gsj.jp/data/actfault-eq/h14seika/pdf/tokachi.pdf>
 46. Nanayama F., Furukawa R., Shigeno K., Makino A., Soeda Y., Igarashi Y. **2007**. Nine unusually large tsunami deposits from the past 4000 years at Kiritappu marsh along the southern Kuril Trench. *Sedimentary Geology*, 200(3–4): 275–294. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.01.008>
 47. Satake K. **2017**. Great earthquakes in the 17th century along the Kuril and Japan Trenches. *Bull. of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 92: 31–47. URL: <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/BERI/pdf/IHO922401.pdf>
 48. Ishizawa T., Goto K., Yokoyama Y., Miyairi Y., Sawada C., Nishimura Y., Sugawara D. **2017**. Sequential radiocarbon measurement of bulk peat for high-precision dating of tsunami deposits. *Quaternary Geochronology*, 41: 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2017.05.003>
 49. Takashimizu Y., Nishina K., Kakami G., Sato Y., Okamura S., Nakanishi R., Tamura M., Hirose W., Takahashi R., Ishimaru S. **2017**. Identification of 17th-century tsunami deposits on the northern Hidaka coast, Hokkaido, northern Japan. *The Quaternary Research (Daiyonki-Kenkyū)*, 56(1): 1–9. <https://doi.org/10.4116/jaqua.56.1>
 50. Ioki K., Tanioka Y. **2016**. Re-estimated fault model of the 17th century great earthquake off Hokkaido using tsunami deposit data. *Earth and Planetary Science Letters*, 433: 133–138. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.10.009>
 51. Sawai Y., Satake K., Kamataki T., Nasu H., Shishikura M., Atwater B.F., Horton B.P., Kelsey H.M., Nagumo T., Yamaguchi M. **2004**. Transient uplift after a 17th-century earthquake along the Kuril subduction zone. *Science*, 306(5703): 1918–1920. <https://doi.org/10.1126/science.1104895>
 52. Nanayama F., Shigeno K., Miura K., Makino A., Furukawa R., Satake K., Saito K., Sagayama T., Nakagawa M. **2002**. Evaluation of tsunami inundation limits from distribution of event deposits along the Kuril subduction zone, eastern Hokkaido: comparison of the Tokachi and Nemuro-Kushiro coasts. *Annual Report on Active Fault Paleoeearthquake Researches*, 2: 209–222.

53. Nanayama F. **2018**. The geomorphological evolution of Hashirikotan barrier spit system controlled by regional seismotectonics, southern Kuril subduction zone. In: *Proceedings of the International Meeting on Eruptive History and Informatics*. Kumamoto: Kumamoto University, 2: 4–26. URL: https://www.researchgate.net/publication/322818218_The_geomorphological_evolution_of_Hashirikotan_barrier_spit_system_controlled_by_regional_seismotectonics_southern_Kuril_subduction_zone
54. Nanayama F., Watanabe K., Shigeno K., Ishii M., Ishiwata K., Inokuma S. **2018**. Giant earthquake tsunami traces and related regional crustal movements recognized around the Kuril subduction zone, eastern Hokkaido, northern Japan. *The Journal of the Geological Society of Japan*, 124(6): 413–433. <https://doi.org/10.5575/geosoc.2018.0013>
55. Kelsey H., Satake K., Sawai Y., Sherrod B., Shimokawa K., Shishikura M. **2006**. Recurrence of postseismic coastal uplift, Kuril subduction zone, Japan. *Geophysical Research Letters*, 33: L13315. <https://doi.org/10.1029/2006GL026052>
56. Nanayama F., Shigeno K., Shitaoka Y., Furukawa R. **2011**. Geological study of unusual tsunami deposits in the Kuril subduction zone for mitigation of tsunami disasters. In: *The tsunami treat – Research and Technology*. Publisher InTech, 283–298. <https://doi.org/10.5772/14249>
57. Soeda Y., Nanayama F., Shigeno K., Furukawa R., Kumasaki N., Tsutsumi Y., Kurumazuka H., Sawai Y., Satake K., Nakagawa M., Yamada G., Katsuragawa M., Akamatsu M., Ishii M. **2003**. Nine tsunami sand deposits in peat layers at the historic site of Kokutaija Temple in Akkeshi Town, Eastern Hokkaido, and their correlation with regional tsunami events. *Report on Active Faults and Paleoeearthquakes*, 3: 285–296. URL: <https://www.gsj.jp/data/actfault-eq/h14seika/pdf/akkeshi.pdf>
58. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Ivanova E.D., Kharlamov A.A., Kaistrenko V.M., Arslanov Kh.A., Chernov S.B. **2014**. The Tohoku Tsunami of 11 March 2011: The key event to understanding tsunami sedimentation on the coasts of closed bays of the Lesser Kuril Islands. *Pure Applied Geophysics*, 171(12): 3307–3328. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0794-y>
59. Razzhigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennokova T.A., Kharlamov A.A., Iliev A.Ya., Kaistrenko V.M. **2008**. The geological record of paleotsunamis striking Shikotan Island, in the Lesser Kurils, during Holocene Time. *Journal of Volcanology and Seismology*, 2(4): 262–277.

Об авторах

Разжигаяева Надежда Глебовна (<https://orcid.org/0000-0001-7936-1797>), доктор географических наук, главный научный сотрудник лаборатории палеогеографии и геоморфологии, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток; на время выполнения гранта РФФ 21-17-00049 сотрудник Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, nadyar@tigdvo.ru

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

Гребенникова Татьяна Афанасьевна (<https://orcid.org/0000-0002-5805-391X>), кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории палеогеографии и геоморфологии, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, nadyar@tigdvo.ru

Харламов Андрей Александрович (<https://orcid.org/0000-0003-2623-5388>), ведущий инженер лаборатории цунами, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Лоскутов Артем Владимирович (<https://orcid.org/0000-0003-1619-3671>), кандидат физико-математических наук, руководитель лаборатории, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, a.loscutov@imgg.ru

Булгаков Рустям Фаридович (<https://orcid.org/0000-0001-9095-3785>), кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории береговых геосистем, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, r.bulgakov@imgg.ru

About the Authors

Razjigaeva, Nadezhda G. (<https://orcid.org/0000-0001-7936-1797>), Doctor of Geography, Principal Researcher, Laboratory of paleogeography and geomorphology, Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok; Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, nadyar@tigdvo.ru

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

Grebennikova, Tatiana A. (<https://orcid.org/0000-0002-5805-391X>), Cand. Sci. (Geography), Leading Researcher, Laboratory of paleogeography and geomorphology, Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, nadyar@tigdvo.ru

Kharlamov, Andrey A. (<https://orcid.org/0000-0003-2623-5388>), Leading Engineer, Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow

Loskutov, Artem V. (<https://orcid.org/0000-0003-1619-3671>), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leader of the laboratory, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, a.loscutov@imgg.ru

Bulgakov, Rustam F. (<https://orcid.org/0000-0001-9095-3785>), Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher of Laboratory of coastal geosystems, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, r.bulgakov@imgg.ru

Поступила 24.08.2023

Принята к публикации 02.10.2023

Received 24 August 2023

Accepted 2 October 2023

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



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

УДК 582.89.(571.63)

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.375-404>
<https://www.elibrary.ru/vszyzq>

Озерные палеоархивы изменений природной среды полуострова Песчаный, Японское море (южное Приморье)

Н. Г. Разжигаева¹, Л. А. Ганзей¹, Т. А. Гребенникова¹, Л. М. Мохова¹, Х. А. Арсланов²

@E-mail: nadyar@tigdvo.ru

¹ Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Резюме. На основе комплексного изучения разрезов отложений двух барьерных озер восстановлены этапы их эволюции и развития растительности на п-ове Песчаный (южное Приморье), тесно связанного с гидроклиматическими изменениями за последние 6300 кал. лет. Одним из хронологических маркеров палеогеографической летописи является тефра кальдерообразующего извержения влк. Байтоушань (946/947 гг. н.э.). Среднеголоценовое палеозеро существовало на аккумулятивном выступе, а в начале позднего голоцена образовалось озеро на перешейке, соединяющем палеоостров с материком. В развитии озер выделяется несколько периодов обводнения, обусловленных увеличением количества атмосферных осадков. Биоиндикаторами активизации плоскостного смыва во время сильных ливней, связанных с тайфунами, являются перетолженные пресноводные диатомеи из подбазальтовых отложений. Находки створок морских и солоноватоводных диатомей свидетельствуют о прохождении экстремальных штормов. Заращение палеозера началось в конце оптимума голоцена (~5410 кал. л.н.). Периоды иссушения, как правило, связаны с похолоданиями и снижением интенсивности летнего муссона. Исключением является малый ледниковый период, когда обводнение болотного массива с реликтовым озером на перешейке резко возросло. Установлена смена кедрово-широколиственных с участием пихты цельнолиственной, берез полидоминантными широколиственными лесами. Показано, что с оптимума голоцена существовали контрастные по тепло- и влагообеспеченности экотопы. Обнаружены признаки антропогенного воздействия на геосистемы. Палеолимнологические исследования позволили выделить сложную короткопериодную климатическую ритмику среднего–позднего голоцена на побережье Амурского залива. Установлено проявление ряда холодных и теплых событий, проведена их корреляция с данными по региону и глобальными событиями, показана связь с аномалиями в океане и интенсивностью летнего муссона.

Ключевые слова: береговые озера, растительность, климатические изменения, летний муссон, циклогенез, экстремальные шторма, радиоуглеродное датирование, тефра вулкана Байтоушань, юг Дальнего Востока

Lacustrine paleoarchives of environmental changes of Peschany Peninsula, Sea of Japan (South Primorye)

Nadezhda G. Razjigaeva¹, Larisa A. Ganzey¹, Tatiana A. Grebennikova¹,
Ludmila M. Mokhova¹, Khikmatulla A. Arslanov²

@E-mail: nadyar@tigdvo.ru

¹ Pacific Geographical Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

² St. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The stages of evolution of two barrier lakes and vegetation development of the Peschany Peninsula (South Primorye) have been reconstructed on the base of multi-proxy study of the sediment sequences, connected with hydroclimatic changes over the past 6300 years. Tephra of the caldera-forming eruption of Baitoushan volcano (946/947 AD) is one of the chronological markers. The Middle Holocene paleolake existed on the accumulative landform, and the lake on the isthmus connecting the paleoisland with the mainland, was formed at the beginning of the Late Holocene. Several periods of watering due to precipitation increase are distinguished in its development. Redeposited freshwater diatoms

from subbasalt deposits are bioindicators of sheet wash activation during heavy rains associated with typhoons. Findings of valves of marine and brackish diatoms indicate the passage of extreme storms. Overgrowing of the paleolake began at the end of the Holocene thermal optimum (~5410 years ago). The periods of dryness are usually associated with cooling and a decrease in the intensity of the summer monsoon. The Little Ice Age is the exception: the flooding of the swamp with a relict lake on the isthmus increased sharply. A change of Korean pine/broad-leaved forests with the participation of fir, birches and polydominant broad-leaved forests was established. It is shown that since the Holocene Optimum there have been ecotopes with contrasting heat and moisture supply. Human impact to geosystems was recorded. Paleolimnological studies made possible to identify the Middle-Late Holocene short-period climatic rhythm on the coast of the Amur Bay. The manifestation of cold and warm events has been established, their correlation with regional data and global events has been carried out, and the connection with ocean anomalies and the intensity of the summer monsoon has been shown.

Keywords: coastal lakes, vegetation, climatic changes, summer monsoon, cyclogenesis, extremal storms, radiocarbon dating, Baitoushan volcano tephra, South Far East

Для цитирования: Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Мохова Л.М., Арсланов Х.А. Озерные палеоархивы изменений природной среды полуострова Песчаный, Японское море (южное Приморье). *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 4, с. 375–404. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.375-404>; <https://www.elibrary.ru/vszyzq>

For citation: Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Arslanov Kh.A. Lacustrine paleoarchives of environmental changes of Peschany Peninsula, Sea of Japan (South Primorye). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 4, pp. 375–404. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.375-404>; <https://www.elibrary.ru/vszyzq>

Финансирование и благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (<https://rscf.ru/project/22-27-00222>). При подготовке и анализе проб использовалась инфраструктура Тихоокеанского института географии ДВО РАН в рамках темы государственного задания № 122020900184-5.

Авторы благодарны Т.В. Корнюшенко за подготовку проб для спорово-пыльцевого анализа.

Выражаем благодарность рецензентам за внимательное прочтение рукописи и конструктивные замечания.

Funding and Acknowledgements

The work was carried out with financial support of Russian Science Foundation (<https://rscf.ru/project/22-27-00222>). At preparing and analyzing of the samples the infrastructures of the Pacific Geographical Institute of the FEB RAS was used within the framework of the theme of state assignment 122020900184-5.

The Authors are grateful to Tatiana V. Korniyushenko for preparing of samples for pollen analysis.

We are grateful to the Reviewers for careful reading of the manuscript and constructive comments.

Введение

Развитие в голоцене на крайнем юге Дальнего Востока ландшафтов, отличавшихся большим разнообразием и сложностью биотических компонентов, изучено недостаточно, несмотря на то что изучению разнофациальных разрезов на побережье Приморья с целью получения палеоклиматических и палеоландшафтных летописей уделялось большое внимание [1–8]. Одними из наиболее информативных объектов для реконструкций развития природной среды в среднем–позднем голоцене являются береговые озера [9–12]. Комплексное изучение осадков современных и палеозер проводится и на побережье южного Приморья [13–18]. Развитие таких озер тесно связано с колебаниями уровня моря и литодинамическими процессами в береговой зоне. В горной части на юге Приморья был из-

учен только один разрез отложений палеозера, позволивший получить данные о развитии низкоргорных ландшафтов Шуфанского плато на протяжении всего голоцена [19]. Анализ эволюции этого озера показал, что одним из основных факторов, определяющих развитие биотических компонентов ландшафтов, являлось изменение увлажнения, связанное с интенсивностью летнего муссона и активностью циклогенеза. Вопросы, касающиеся аномалий атмосферной циркуляции в голоцене у северной границы распространения восточноазиатского муссона, слабо разработаны. Связь гидроклиматических изменений с муссонной циркуляцией на юге российского Дальнего Востока обсуждается в работах [20–22], многочисленные исследования проведены в соседних районах Восточной Азии [23–29]. Вместе с тем для понимания сложного взаимодействия воздушных масс в переходной зоне

«континент–океан» и анализа влияния океана на региональный климат важно иметь детальные палеоклиматические данные для разных ландшафтных зон и поясов.

Цель настоящей статьи – представить новую информацию о развитии растительности побережья юга Приморья и прилегающего низкогорья, выявить связь с гидроклиматическими изменениями и оценить состояние биотических компонентов ландшафтов до их коренной трансформации при заселении края начиная с XIX в.

Материалы и методы

На п-ове Песчаный (Амурский залив) изучено два разреза озерных отложений: уступ размыта террасы (разрез 1320, 43°10.660' с.ш., 131°46.274' в.д.) в восточной части в пределах аккумулятивного выступа, и скважина (разрез 820, 43°11.078' с.ш., 131°43.053' в.д.), пробуренная в западной части полуострова в краевой части болота (в 420 м от берега моря и в 640 м от безымянного озера) на низком аккумулятивном перешейке, соединяющем палеоостров с материком (рис. 1). Максимальная

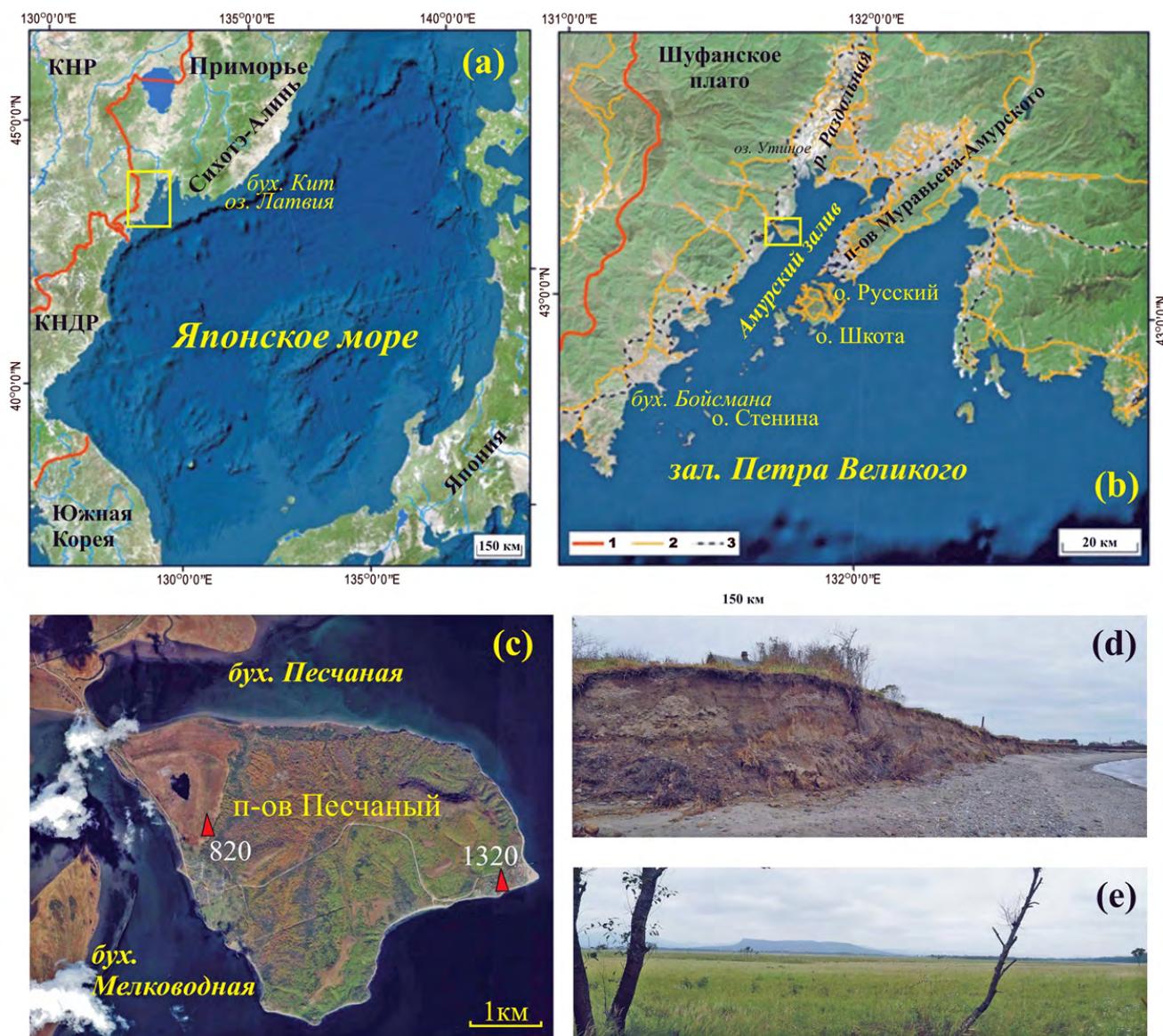


Рис. 1. Схема района работ. (а) Япономорский бассейн; (б) залив Петра Великого, показано положение района работ. 1 – государственные границы, 2 – дороги, 3 – железные дороги; (с) п-ов Песчаный с изученными разрезами озерных отложений; (d) озерная терраса (разрез 1320); (е) перешеек с безымянным озером (разрез 820).

Fig. 1. Study area. (a) Japan sea region; (b) Peter the Great Bay and position of study area. 1 – State boundary, 2 – roads, 3 – railway roads; (c) the Peschany Peninsula with studied sections of lacustrine deposits; (d) lake terrace (section 1320); (e) isthmus with unnamed lake (section 820).

высота гористой части полуострова 177 м. Рельеф устроен довольно сложно: выделяют платообразные участки на местах выходов базальтов. Возможно, это был отдельный вулканический центр. Возраст базальтов близлежащего Шуфанского вулканического поля 13.3 млн лет [30]. Уплощенный водораздел окружен крутыми обрывистыми склонами; широко распространены оползни крупных блоков; поверхность прорезана долинами низкопорядковых и многочисленных временных водотоков, густая сеть которых сформирована за счет размыва мощных рыхлых подбазальтовых отложений. В восточной части к крутому склону прислонен аккумулятивный выступ (высотой до 2–3 м), сформированный за счет поступления обломочного материала с разнонаправленными потоками наносов. В среднем голоцене аккумулятивный берег имел большую площадь, штормовые валы отгораживали озеро, на месте которого в южной части сохранился низменный заболоченный участок. В позднем голоцене остров соединился с материком за счет активной аккумуляции материала в ветровой тени, образовалось двойное томболо (высота до 1.5–2 м), в центральной части которого возник водоем. В настоящее время сохранился его реликт с сильно заболоченными берегами.

Опробование проведено с шагом 2–5 см в зависимости от литологического состава отложений. Проведен литолого-фациальный анализ и биостратиграфическое изучение, включавшее диатомовый и спорово-пыльцевой анализы, выполненные по стандартным методикам. Подсчитано количество створок диатомей в 1 г воздушно-сухого осадка. Створки диатомей, переотложенные из подбазальтовых отложений, хорошо диагностируются и исключены из подсчетов при характеристике диатомовых комплексов; их процентное содержание определено от общего количества створок диатомей [31]. При просмотре диатомовых препаратов отмечалось присутствие микрочастиц угля и обугленных клеток растений. Подготовка проб для спорово-пыльцевого анализа проводилась с использованием тяжелой жидкости с удельным весом 2.2 г/см³ [32]. Определялось соотношение трех групп: пыльцы древесных пород

и кустарников, пыльцы трав и кустарничков, спор. Подсчет процентного содержания таксонов проводился для каждой группы. В насыщенных пылью и спорами препаратах определено от 318 до 2057 таксонов; в пробах, где встречено меньше 100 пыльцевых зерен и спор, на диаграмме указано только их присутствие. Источники отдельных таксонов определены на основе распространения лесообразующих пород на близлежащей территории. Источником пыльцы *Pinus s/g Haploxyylon* в Приморье являются кедр корейский, распространенный в составе кедрово-широколиственных лесов низкогорья, и кедровый стланик, который растет только в верхнем поясе гор и отсутствует на п-ове Песчаный и в ближайшем горном обрамлении. Поэтому мы считаем, что здесь источником этой пыльцы служит кедр корейский, источником *Pinus s/g Diploxyylon* – сосна густоцветковая, *Phellodendron* – бархат амурский. Из кустарниковых берез на побережье южного Приморья встречается только береза овалнолистная, поэтому данный вид считаем источником пыльцы *Betula sect. Fruticosae*.

Хронология основана на данных радиоуглеродного датирования, выполненного в Институте наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета (г. Санкт-Петербург), и тефростратиграфии. Радиоуглеродные даты переведены в календарные (табл. 1) по программе OxCal 4.4.1 с использованием калибровочной кривой «IntCal 20» [33]. Возрастные модели построены по программе Bacon 4.2.2 [34]. Для разреза 1320 модель «возраст–глубина» выполнена только для пачки алевропелитов, функция «slump» применялась для исключения прослоев песка, образованных во время краткосрочных событий. Возраст приведен в календарных значениях. В разрезе 820 обнаружен прослой тефры влк. Байтоушань. Привязка источника сделана по химическому составу вулканического стекла, изученного с помощью рентгеноспектрального микроанализа (EPMA) с применением сканирующего электронного микроскопа MIRA3 FE фирмы TESCAN и системы микроанализа Aztec компании Oxford Instruments в Радиовом институте им. В.Г. Хлопина (г. Санкт-Петербург).

Таблица 1. Результаты радиоуглеродного датирования озерно-болотных отложений п-ова Песчаный
Table 1. The results of radiocarbon dating of lake-swamp sediments of the Peschany Peninsula

Номер пробы	Глубина, м	Материал	Радиоуглеродный возраст, лет	Калиброванный возраст (календарный), кал. лет	Лабораторный номер
43/1320	0.65–0.70	Оторфованная глина	3950±110	4400±170	ЛУ-9992
40/1320	0.80–0.85	То же	3800±70	4190±110	ЛУ-9991
33/1320	1.23–1.25	–«–	3710±150	4080±210	ЛУ-10188
30/1320	1.35–1.40	–«–	3510±40	3780±60	ЛУ-10189
26-27/1320	1.53–1.58	–«–	3600±110	3910±160	ЛУ-10190
14/1320	2.05–2.10	–«–	4960±200	5710±240	ЛУ-10191
1/820	0.20–0.25	Торф	360±90	360±90	ЛУ-9987
2/820	0.35–0.40	–«–	1350±130	1240±130	ЛУ-9988
3/820	0.45–0.50	–«–	2260±80	2250±110	ЛУ-9989

Результаты и обсуждение

Эволюция обстановок осадконакопления и палеоландшафтная запись в разрезе среднеголоценового палеозера

Строение разреза и хронология. Отложения палеозера, вскрытые в уступе размыва в южной части аккумулятивного выступа, представлены в основании голубыми, а выше – светло-серыми алевропелитами, переходящими в оливково-серые и коричневые оторфованные глины, перекрытые разнотернистыми заиленными песками (рис. 2). По простиранию в восточном направлении по мере удаления от склона и долины водотока, служивших источником обломочного материала, терригенные отложения фациально замещаются оторфованными глинами. В изученном разрезе (1320) выделяются три прослоя преимущественно мелкой и средней хорошо окатанной гальки: прослой в основании террасы, отвечающий начальной фазе образования пересыпи; линза в средней части и мощный слой с фестончатым залеганием в верхней части обнажения, образовавшиеся в экстремальные шторма в фазы малоамплитудных трансгрессий. Выше лежит оторфованная глина, мелкозернистый хорошо сортированный песок с примесью алеврита и погребенная почва. Слой грубого валунно-галечного материала разной степени окатанности в кровле разреза, возможно, имеет антропогенное происхождение.

Из разреза получено шесть ^{14}C датировок (табл. 1). Достоверными принимаются три последовательные даты из оторфованных прослоев в нижней половине разреза. Эти даты были использованы для построения возрастной модели, показавшей, что накопление озерных отложений началось около 6320 л.н. (рис. 2).

Первая фаза заболачивания палеозера п-ова Песчаный была 5410–5290 л.н. В разрезе хорошо выражены вертикальные следы корней растений, которые из оторфованного слоя проникают в нижележащие озерные отложения. Более заболоченным водоем становится в начале позднего голоцена, когда, согласно возрастной модели, сформировались оторфованные слои, – 4130–4020 л.н. и 3800–3750 л.н. Доля минеральных примесей повышается в слое светло-серых алевритов, сформированном около 4020–3800 л.н., что показывает увеличение сноса терригенного материала в условиях более интенсивного плоскостного смыва – проходили сильные дожди и тайфуны. Верхняя часть алевропелитов имеет возраст около 3750 лет. Выше залегают заиленные пески, образованные в условиях резкого увеличения сноса обломочного материала со склонов из подбазальтовых отложений, что, как будет показано ниже, подтверждается биостратиграфическими данными. Возможно, резко увеличился плоскостной смыв в условиях сильных ливней. Активный смыв песчано-глинистого материала во время тайфунов характерен для этой территории [35].

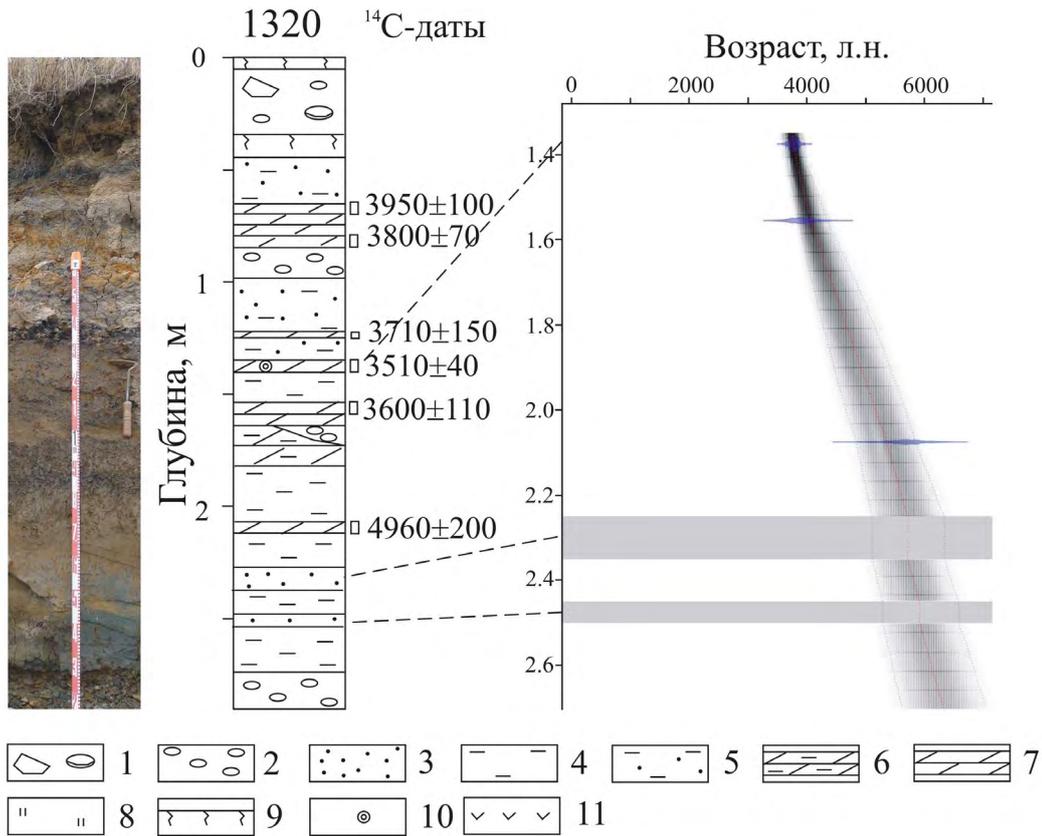


Рис. 2. Возрастная модель накопления озерных отложений: разрез 1320, п-ов Песчаный, южное Приморье. 1 – глыбы и валуны, 2 – галька, 3 – песок, 4 – алевропелит, 5 – песок с примесью алеврита, 6 – слабоотторфованная глина, 7 – отторфованная глина, 8 – торф, 9 – почва, 10 – древесина, 11 – вулканический пепел. Серым показаны отложения, образованные в результате кратковременных событий (экстремальные шторма).

Fig. 2. Age-depth model for lacustrine sediments: section 1320, the Peschany Peninsula, South Primorye. 1 – blocks and boulders, 2 – pebbles, 3 – sand, 4 – silty pelite, 5 – silty sand, 6 – peaty clay, 7 – peaty clay, 8 – peat, 9 – soil, 10 – wood, 11 – volcanic ash. Gray bars show deposits formed as a result of short-term events (extreme storms).

Тонкий прослой отторфованной глины из пачки заиленных песков, из которого получен ^{14}C -дата ЛУ-10189, по-видимому, включает более древний переотложенный органогенный материал. Инверсию ^{14}C -дат в верхней части разреза трудно объяснить, не исключена антропогенная природа такой последовательности. На полуострове широко распространены памятники янковской культуры (IX–V в. до н.э.), которые изучались со времен В.К. Арсеньева: в 1921 г. он вел раскопки памятника Песчаный 1 [35, 36]. В непосредственной близости от палеозера на более высокой террасовидной поверхности по левому берегу долины ручья на месте современного поселка Песчаный располагается археологический памятник Песчаный 2 [37]. Нельзя исключать, что рядом с разрезом палеозера находились остатки жизнедеятельности (морские

раковины, кости рыб, чешуя и т.п.), которые представляли локальный резервуар древнего углерода, и грунтовые воды, проникающие по прослоям песков, могли быть им обогащены. Обогащение древним углеродом морских организмов – широко известный факт, резервуар-эффект в зал. Петра Великого составляет 370 ± 26 лет [38].

Этапы развития палеозера. Озеро образовалось около 6320 л.н. при небольшом снижении уровня моря, совпавшем с незначительным похолоданием [1, 4]. Поступление большого количества обломочного материала в береговую зону на пике трансгрессии и активизация аккумулятивных процессов при стабилизации и снижении уровня моря при высокой штормовой активности [39] привели к формированию, по классификации В.П. Зенковича [40], симметричной двойной окаймля-

ющей косы с двусторонним питанием. Образование таких озер лагунного происхождения довольно типичная картина для островов зал. Петра Великого: озерные отложения изучены на островах Русский, Шкота, Стенина [13, 15, 17]. На п-ове Песчаный замыкание кос и образование озера произошло в малоамплитудную регрессию, которая повлияла и на развитие других барьерных водоемов в береговой зоне Приморья. Так, на о. Русский на открытом побережье бухты Красная лагуна стала более закрытой и распресненной [18, 39]. В распресненной лагуне, образованной в теневой зоне (разрез «Поспелово»), органогенное осадконакопление началось около 6100 л.н. [13]. В восточном Приморье закрытие лагуны наблюдалось на побережье бухты Кит [41]. Увеличение роли пресноводных диатомовых водорослей зафиксировано и в отложениях оз. Латвия [12].

В отложениях изученного разреза определено 154 пресноводных, 14 морских и солоноватоводных видов диатомей. Среди пресноводных диатомей на фоне преобладания космополитов встречено 4 бореальных и 3 арктобореальных таксона. По отношению к солености доминируют индифференты (106 видов), галофобов обнаружено 36 и галофилов – 3. По отношению к pH среды преобладают циркумнейтральные виды (64), ацидофилов и ацидобионтов – 39 таксонов, алкалифилов и алкалибионтов – 41. Встречены пресноводные виды, характерные для неогеновых озерных отложений юга Приморья [42, 43]: вымершие бентосные *Tetracyclus lacustris* var. *lacustris*, *T. ellipticus* var. *lancea*, *T. ellipticus* var. *ellipticus* и планктонные *Aulacoseira praegr anulata* var. *praeislandica* f. *praeislandica*, *A. praegr anulata* var. *praegr anulata* f. *praegr anulata*, *Melosira praedistans* f. *seriata*, *Miosira ereolata*. По морфологическим признакам к переотложенным формам отнесен и имеющий широкий возрастной диапазон *Aulacoseira italica*. Древние диатомеи поступали в водоем во время сильных ливней в результате размыва подбазальтовых отложений с плоскостным смывом и выносились низкопорядковым водотоком.

По соотношению видов выделено 9 комплексов диатомей, отвечающих этапам эволюции водоема (рис. 3).

В основании разреза (комплекс 1, инт. 2.55–2.85 м, 6320–6020 л.н.) преобладают виды обрастаний (до 72.5 %). В числе доминирующих отмечен *Eunotia praerupta*, населяющий олиготрофно-дистрофные водоемы и способный обитать на мхах в условиях осушения [44, 45], и *E. bidens*, также обитающий в олиготрофно-дистрофных водоемах, иногда характеризующийся как североальпийский вид [46]. В Китае этот вид был найден в холодных источниках в горах Чанбайшань [47]. В заполнителе галечника наблюдается высокое содержание обитателей мелководных олиготрофно-дистрофных водоемов: видов рода *Pinnularia* и арктобореального обрастателя *Fragilariforma nitzschoides* [46]. Выше в алевропелитах заметно повышается участие вида, характерного для холодных олиготрофно-мезотрофных водоемов, – *Eunotia glacialis* [46]. Присутствие планктонных *Aulacoseira alpigena*, *A. granulata*, обрастателей *Odontidium anceps*, *Ulnaria ulna*, *Gomphonema grunowii* указывает на влияние водотока, а наличие вымерших видов (до 8.8 %) – о размыве неогеновых отложений. Содержание почвенных диатомей (*Luticola mutica*, *Hantzschia amphioxys*, *Pinnularia borealis*) в подошве слоя достигает 13.9 % и снижается к кровле до 4.1 %, что отражает прогрессирующее увеличение увлажнения. Доминируют галофобы (до 66.3 %) и ацидофилы (до 54.3 %). Концентрация створок ≤ 32 тыс./г сухого осадка.

Состав диатомей указывает на развитие мелководного относительно прохладного олиготрофно-дистрофного водоема с возможными осушками. Найдены единичные створки морских видов *Paralia sulcata*, *Neodenticula seminae*, *Actinocyclus octonarius*, *Rhabdonema arcuatum*, фрагменты *Coscinodiscus oculus-iridis* и солоноватоводных *Cosmioneis pusilla*, *Cocconeis scutellum*, *Achnanthes brevipes* var. *intermedia*, *Melosira moniliformis*. Максимальное их количество обнаружено на контакте с галечниками. Свидетельства о прохождении сильных штормов 6250–6080 л.н. получены для открытого побережья о. Русский [39].

Комплекс 2 (инт. 2.25–2.55 м, 6020–5710 л.н.) выделен из алевропелитов с прослоями песков. В равных долях представлены донные формы (до 59.8 %) и виды обрастаний

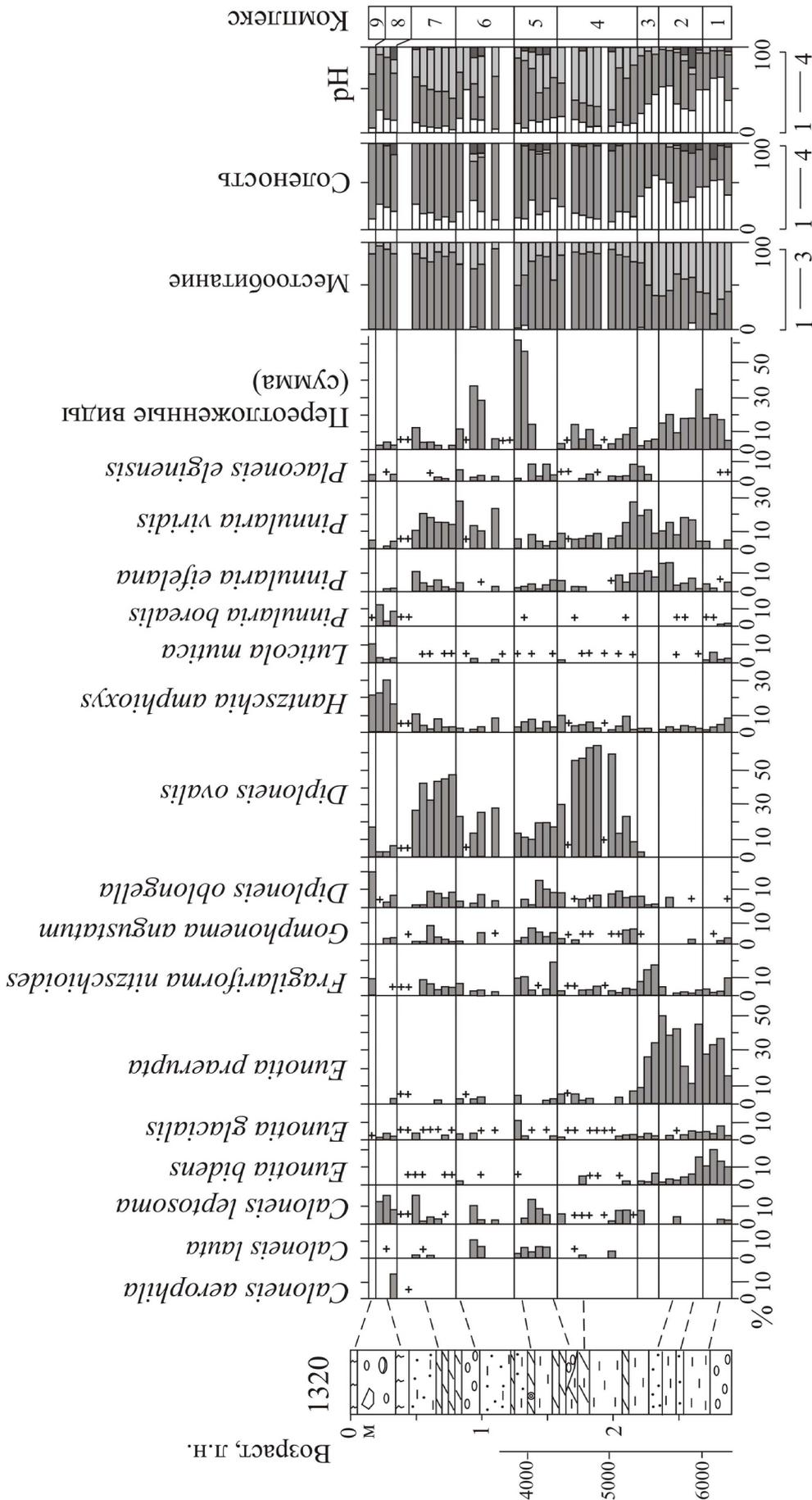


Рис. 3. Распределение диатомей в разрезе (1320) отложений палеозера, п-ов Песчаный, южное Приморье. Местобитание: 1 – планктон, 2 – донные, 3 – обрастания. Соленость: 1 – галофобы, 2 – индифференты, 3 – галофилы, 4 – нет данных. pH: 1 – ацидофилы, 2 – циркумнейтральные, 3 – алкалофилы, 4 – нет данных.

Fig. 3. Distribution of diatoms in paleolake sediments section (1320), the Peschanу Peninsula, South Primorye. Habitat: 1 – planktonic, 2 – benthic, 3 – epiphytes. Salinity: 1 – halophobes, 2 – indifferent, 3 – halophiles, 4 – no data. pH: 1 – acidophiles, 2 – circumneutral, 3 – alkaliphiles, 4 – no data.

(до 53.5 %). Доминируют *Eunotia praerupta* и донные циркумнейтральные *Pinnularia viridis*, *P. subbrucestris*, *P. eifelana*, предпочитающие мелководные олиготрофные водоемы. Содержание почвенных видов снижается до 3.1 %. Влияние водотоков фиксируется по присутствию обрастателей *Odontidium anceps*, *Rhopalodia gibberula*, *Meridion constrictum*, *Staurosira venter*. Наибольшее число переотложенных видов (34 %) встречено под слоем песка в алевропелитах, образованных 6020–5920 л.н. Выше (инт. 2.35–2.45 м, 5920–5710 л.н.) появляется *Epithemia operculata* (до 6 %), обычный для проточных вод с повышенным содержанием электролитов. Этот экологически пластичный вид найден в числе доминирующих в горячих источниках Камчатки [49] и встречен в обилии на северных склонах Тяньшаньского и Алтайского горных районов Китая на высоте 900–1540 м [50]. В изученном разрезе, скорее всего, фиксируется кратковременное похолодание 5920–5820 л.н. На побережье бухты Бойсмана небольшое похолодание имеет близкие возрастные рамки – 6050–5800 л.н. [4]. Значительные колебания в содержании галофобов (28.4–51.5 %) и ацидофилов (23.9–45.5 %) свидетельствуют о неустойчивом геохимическом режиме. Концентрация диатомей несколько снизилась (≤ 23 тыс./г).

В целом, состав диатомей комплекса 2 указывает на повышение водности умеренно заболоченного водоема, которое было вызвано подъемом уровня грунтовых вод в условиях малоамплитудной трансгрессии [1, 18]. Находки морских диатомей (*Cosmioneis pusilla*, *Achnanthes brevipes* var. *intermedia* и фрагмент океанического *Coscinodiscus* sp.) свидетельствуют, что прослой песков были образованы во время экстремальных штормов около 5920 и 5710 л.н.

В перекрывающих алевропелитах (комплекс 3, инт. 2.10–2.25 м, 5710–5410 л.н.) участие арктобореальных диатомей достигает 17.6 %, в состав доминирующих входит в том числе *Fragilariforma nitzschoides*. Содержание переотложенных диатомей снижается до 2.2 %, а концентрация диатомей повышается до 54 тыс./г. Доля галофобов и ацидофилов постепенно уменьшается (до 39.8 и 22.6 % соответственно). Комплекс указывает на су-

ществование мелководного олиготрофно-дистрофного водоема, климатические условия стали более прохладными. Створки *Cosmioneis pusilla* занесены в озеро во время сильных штормов 5610–5410 л.н.

В оторфованной глине с оливковым оттенком (комплекс 4, инт. 2.1–1.63 м, 5410–4250 л.н.) преобладают донные виды диатомей (до 90.1 %). Доминирует алкаифил индифферент *Diploneis ovalis*, населяющий олиготрофно-мезотрофные водоемы разного типа (озера, реки, эстуарии) [44], а также обычный для влажных субаэральных мест [44]. В заметном количестве присутствуют *Placoneis elginensis*, предпочитающий мезотрофно-эвтрофные воды, и аэрофильный *Caloneis leptosoma*, распространенный в умеренных и теплых областях в родниках, в моховых подушках и на мокрых скалах [51]. Доля ацидофилов снижается до 6.3 %, а галофобов до 13 %. Содержание арктобореальных видов не превышает 7 %. Концентрация диатомей составляет 45–75 тыс./г, максимальное число створок (126 тыс./г) зафиксировано в инт. 1.93–1.97 м (5100–5000 л.н.). Содержание переотложенных диатомей меняется от 2 до 14.4 %, что говорит о пульсирующем поступлении обломочного материала. Прослой алевролита с волнистым залеганием (инт. 1.90–1.93 м) с минимальной концентрацией створок (9 тыс./г) включает всего 8 видов. По-видимому, этот прослой образован за счет поступления в озеро обломочного материала во время сильного тайфуна ~5000–4920 л.н.

В целом, комплекс указывает на уменьшение глубины олиготрофно-мезотрофного озера, начавшееся в условиях регрессии и снижения годового количества атмосферных осадков [1]. Обмеление и закрытие лагуны на о. Русский произошло 5090–4840 л.н. [18, 39]. Это не исключает прохождение отдельных сильных тайфунов и штормов, о чем свидетельствует находка морского бентосного *Tryblionella plana* (4920–4800 л.н.). Признаки экстремальных штормов или цунами найдены на о. Русский 5000–4920 л.н. [18, 39].

Выше линзы гальки в оторфованной глине и алевролитах (комплекс 5, инт. 1.35–1.63 м, 4250–3750 л.н.) концентрация диатомей возрастает до 2172 тыс./г. Наблюдается увеличение

богатства и содержания видов родов *Pinnularia* и *Eunotia*, характерных для болот, включая арктобореальные *E. parallela* var. *angusta*, *E. groenlandica*. Содержание арктобореальных, в том числе *Fragilariforma nitzschoides* и *Caloneis lauta*, особенно высоко в нижней части (до 19.4 %), что фиксирует кратковременное похолодание ~4250–4130 л.н. Содержание ацидофилов повышается до 18.3 %. Доля переотложенных створок здесь снижается до 0.2 %. Выше по разрезу (инт. 1.35–1.53 м) в заметном количестве найдены створки *Caloneis leptosoma* и *Hantzschia amphioxys*. Содержание переотложенных видов диатомей сильно возрастает (более 60 %) и концентрация их снижается (139–283 тыс./г) за счет терригенного разбавления при активном плоскостном смыве 4020–3750 л.н.

В целом, комплекс указывает на развитие болотных процессов по периметру озера и появление осушек. Почти в каждой пробе встречены солоноватоводные *Cosmioneis pusilla*, *Stenophora pulchella*, *Bacillaria paxillifera* и морской *Tryblionella plana*, что указывает на активные шторма в условиях подъема уровня моря [1].

Из слоя песков (инт. 0.98–1.35 м) выделен комплекс 6. Отложения характеризуются сильной изменчивостью по содержанию диатомей. В малонасыщенных пробах (0.2–7.0 тыс./г) многие экземпляры принадлежат вымершим видам. В остальной части концентрация створок меняется от 22 до 167 тыс./г, преобладают донные виды (до 87.9 %). Доля арктобореальных видов менее 8 %. Содержание переотложенных видов достигает 36 %. Отложения формировались в условиях активного плоскостного смыва при прохождении частых ливней в первой половине позднего голоцена. Встречены солоноватоводные бентосные, перенесенные во время сильных штормов: в линзе оторфованного песка – *Diploneis pseudovalis*, в верхней части под галечником – *Cosmioneis pusilla*, *Rhopalodia musculus*.

Из заполнителя галечников и перекрывающей оторфованной глины (комплекс 7, инт. 0.50–0.98 м) на фоне доминирования *Diploneis ovalis* и *Pinnularia viridis* более широко представлены виды рода *Pinnularia*, ха-

рактерные для олиготрофно-дистрофных вод (*Pinnularia subgibba*, *P. episcopalis*, *P. rupestris* и др., появляются *P. microstauron*, *P. nodosa*). Содержание арктобореальных видов (*Fragilariforma nitzschoides*, *Caloneis lauta*) варьирует от 3.6 до 9.8 %. Доля переотложенных видов не превышает 4 %. В верхней части возрастает участие аэрофильного *Caloneis leptosoma*. Более широко представлены виды рода *Eunotia*, доля ацидофилов повышается до 11.7 %, а переотложенных видов – до 11.9 %. Найден солоноватоводный *Achnanthes brevipes* var. *intermedia*. Изменения в составе диатомовой флоры указывают на постепенное сокращение площади водоема, развитие болотных процессов по периметру.

Для погребенной почвы (инт. 0.35–0.50 м), перекрывающей озерные отложения, выделен комплекс 8 с высоким содержанием почвенных видов диатомей (38–51.1 %). Доминируют *Hantzschia amphioxys*, *Pinnularia borealis* и *Caloneis leptosoma*. Существенно возрастает содержание космополита *Caloneis tenuis* (до 8.1 %), широко распространенного в стоячих и проточных водах в скандинавско-альпийском регионе [51]. В кровле появляется *Pinnularia rabenhorstii*, который рассматривается как североальпийский вид [46]. Доля ацидофилов достигает 26.5 %. Переотложенных диатомей менее 4 %. Предполагается, что заключительная стадия развития озера и образование почвы проходили в период похолодания 2800–2600 л.н., сопровождавшегося снижением увлажнения [22].

В поверхностной почве в состав доминирующих видов диатомей (комплекс 9) стал входить *Luticola mutica*, предпочитающий мезотрофно-эвтрофные условия. Увеличение содержания *Diploneis ovalis*, *D. oblongella* и арктобореального *Fragilariforma nitzschoides* указывает на обводнение и холодные условия. Доля ацидофилов снижается до 5.1 %. Концентрация диатомей увеличивается до 261 тыс./г. Скорее всего, почва образовалась в малый ледниковый период. В почвах встречены морские диатомей: бентосный *Rhabdonema arcuatum* и планктонный *Paralia sulcata*, а также *Cosmioneis pusilla*, фиксирующие прохождение сильных штормов.

Развитие растительности. Палиноспектры из разреза озерных отложений содержат большое количество спор в основном папоротников (рис. 4), преобладавших в лесном покрове. Это характерно для некоторых мелководных озер независимо от доминирующих растительных ассоциаций и объясняется избирательным водным переносом спор *Polypodiaceae* и накоплением их в небольших понижениях [52]. Участие хвойных в растительности палеоострова и прилегающей материковой суши в среднем–позднем голоцене было намного больше, чем на других островах зал. Петра Великого [6, 13, 15, 18] и в горном обрамлении бухты Бойсмана в среднем голоцене [3, 4]. Соотношение пыльцы древесных растений и трав (табл. 2) позволяет выделить 10 этапов развития растительности.

Около 6320–6020 л.н. (*палинозона 1*, инт. 2.55–2.85 м) в низкогорье были развиты кедрово-широколиственные леса богатого видового состава с участием дуба, липы, граба, ореха, ильма, берез, в подлеске – лещины. Доля пыльцы кедра корейского (*Pinus s/g Haploxylon*) резко увеличивается в конце этого периода, по-видимому в более влажных условиях. С 6100 л.н. возросло участие кедра корейского и в сопредельных районах Китая (оз. Цинбоху, Lake Jingbo) [23]. Высокое содержание пыльцы *Abies* (до 24.9 %) свидетельствует об участии пихты цельнолистной в растительности палеоострова на склонах, открытых летним ветрам с акватории. Пыльца ели, скорее всего, заносилась с верхнего пояса Восточно-Маньчжурских гор. Вокруг озера были небольшие заросли ольхи, на переувлажненных участках – осоковые, лютиковые, сфагновые мхи, на барьерной форме – разнотравные группировки с участием полыни и других сложноцветных, зонтичных, гвоздичных, гречиховых растений. Пыльца *Ephedra* занесена со скал, где росла и сосна густоцветковая (*Pinus s/g Diploxylon*), ультранеморальный ценоэлемент флоры юга Приморья.

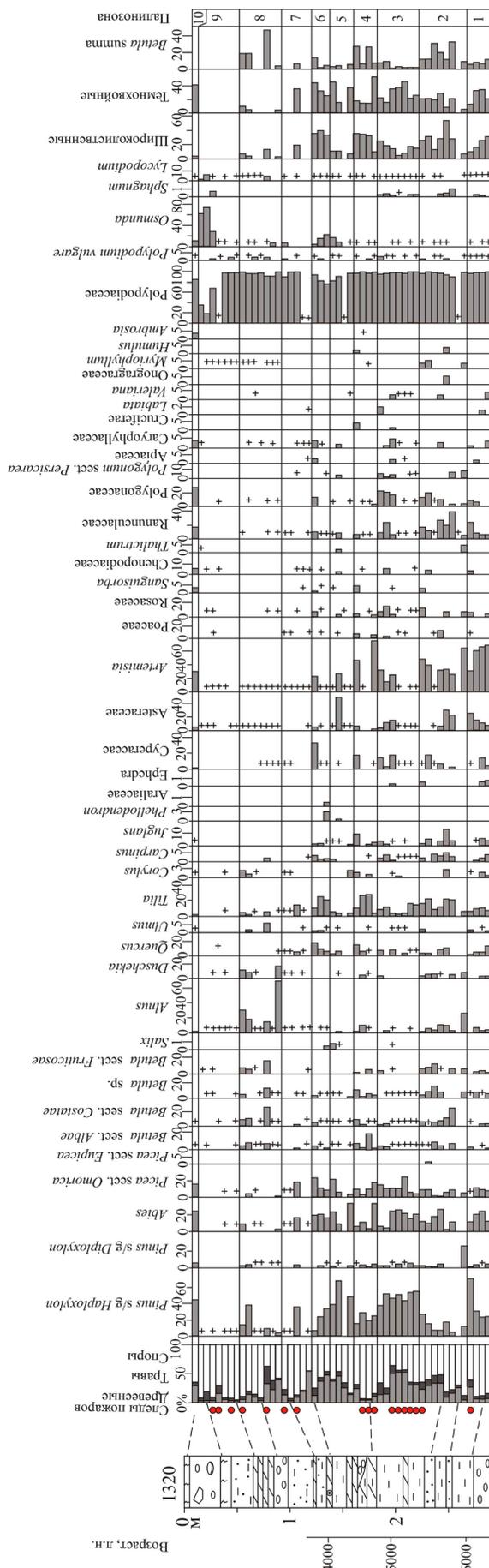


Рис. 4. Спорово-пыльцевая диаграмма (для разреза 1320) отложений палеозера, п-ов Песчаный, южное Приморье. + – единичные зерна. Красными кружками показано присутствие микроуглей и обгоревших клеток растений.
 Fig. 4. Pollen diagram for paleolake sediments (section 1320), the Peshchany Peninsula, South Primorye. + – single grains. Red dots show microcoals and buried plant cells.

Таблица 2. Описание палинозон из отложений палеоозера (разрез 1320), п-ов Песчаный
Table 2. Description of pollen zones from paleolake deposits (section 1320), Peschany Peninsula

Палинозона (интервал, м)	Описание
10 (0–0.05)	Среди древесных пород встречено много пыльцы хвойных (<i>Pinus s/g Haploxyton, Abies, Picea</i>). В группе трав высоко содержание пыльцы растений влажных местообитаний (<i>Ranunculaceae, Polygonaceae, Sanguisorba</i>), резко увеличилась доля пыльцы <i>Ambrosia</i> .
9 (0.35–0.70)	Пыльцы древесных и трав мало. В верхней части резко увеличивается доля спор <i>Osmunda</i> .
8 (0.70–1.10)	В группе древесных возросла доля пыльцы <i>Alnus</i> и берез, в том числе <i>Betula sect. Fruticosae</i> , в верхней части – пыльцы <i>Pinus s/g Haploxyton</i> .
7 (1.10–1.35)	Очень мало пыльцы, насыщенный спектр получен из одной пробы. Здесь снижается доля широколиственных.
6 (1.35–1.53)	Повысилась доля пыльцы широколиственных, в том числе <i>Tilia, Carpinus, Juglans, Phellodendron</i> , появилась <i>Araliaceae</i> . Вверх по разрезу снижается содержание пыльцы <i>Pinus s/g Haploxyton</i> и растет количество пыльцы берез. В верхней части много пыльцы <i>Cyperaceae</i> . Отмечено большое количество спор <i>Osmunda</i> (до 22.6 %).
5 (1.53–1.67)	Увеличилось содержание пыльцы древесных, среди которых стало больше <i>Pinus s/g Haploxyton</i> и темнохвойных (до 45 %): в нижней части отмечен пик пыльцы <i>Abies</i> , в верхней – увеличивается доля пыльцы <i>Picea</i> . Пыльцы трав мало, преобладает <i>Asteraceae</i> , в том числе <i>Artemisia</i> . В верхней части стало больше спор <i>Osmunda</i> .
4 (1.67–1.85)	Стало меньше пыльцы древесных пород и трав, резко возросло количество спор. В группе древесных увеличилось содержание пыльцы широколиственных, особенно <i>Tilia</i> , и древесных берез (<i>Betula sect. Albae, B. sect. Costatae, Betula sp.</i> – до 27 %), снизилась доля <i>Pinus s/g Haploxyton</i> , в нижней части встречено много пыльцы темнохвойных. В группе трав доминирует пыльца <i>Artemisia</i> . Появилась пыльца <i>Ambrosia</i> . Исчезли споры <i>Sphagnum</i> .
3 (1.85–2.15)	Увеличилось содержание пыльцы темнохвойных пород (до 46 %) и <i>Pinus s/g Haploxyton</i> , резко снизилось количество пыльцы <i>Tilia</i> и других широколиственных. В нижней части стало меньше пыльцы трав и спор, в верхней среди пыльцы трав преобладают <i>Artemisia, Ranunculaceae, Polygonaceae</i> .
2 (2.15–2.55)	Резко снижается доля пыльцы <i>Pinus s/g Haploxyton</i> , увеличивается содержание пыльцы широколиственных (до 53.4 %), особенно <i>Tilia, Carpinus, Juglans</i> , и берез, в том числе кустарниковой <i>Betula sect. Fruticosae</i> . В нижней части наблюдается пик содержания пыльцы <i>Pinus s/g Diploxyton</i> . В верхней найдена пыльца <i>Ephedra</i> . В группе трав увеличилось количество пыльцы <i>Ranunculaceae, Polygonaceae</i> , появилась пыльца <i>Onagraceae, Humulus</i> . Возросло содержание спор <i>Sphagnum</i> .
1 (2.55–2.85)	В группе древесных встречено много пыльцы широколиственных (<i>Quercus, Tilia, Carpinus, Juglans, Ulmus</i> – в сумме до 31 %), количество которой сокращается в верхней части, где резко возрастает доля пыльцы кедра корейского (<i>Pinus s/g Haploxyton</i> – до 70.8 %). Из темнохвойных пород преобладает пыльца <i>Abies</i> . Мелколиственные представлены небольшим количеством пыльцы <i>Betula, Alnus, Duschekia</i> . В нижней части встречена пыльца <i>Ephedra</i> . Среди травянистых преобладает пыльца <i>Artemisia</i> и разнотравья. В обилии представлены споры <i>Polypodiaceae</i> , отмечены споры сфагновых мхов и плаунов.

Около 6020–5510 л.н. (палинозона 2, инт. 2.15–2.55 м) в лесной растительности на палеоострове произошли существенные изменения – стало меньше кедра корейского, больше берез, широколиственных (до 53.4 %), особенно с 5820 л.н., было много липы, увеличилось участие граба, ореха. Такие изменения связаны с повышением среднегодовой температуры и увеличением эффективного испарения, особенно на склонах. На скалах получила большее распространение сосна густоцветковая. На сухих местообитаниях рос хвойник

(*Ephedra*). Палеоландшафтные изменения на Шуфанском плато указывают, что в это время (6010–5540 л.н.) начались длительные сухие сезоны [19]. На побережье бухты Бойсмана теплая фаза выделяется 5800–5500 л.н. [4]. Палеоозеро на п-ове Песчаный в условиях трансгрессии было обводнено – в составе травянистых группировок стало больше растений, предпочитающих влажные местообитания, – лютиковых, гречиховых, во влажных лесах по берегам было много хмеля. Снизилось содержание пыльцы полыни. Из водных расте-

ний в озере появилась уруть. На палеоострове проходили пожары, на что указывают находки микроуглей, обугленных растений и появление пыльцы кипрея. Существовали контрастные по тепло- и влагообеспеченности экотопы. На осушенных заболоченных участках около озера в конце периода (5710–5510 л.н.) обильно стала расти береза овальнолистная (*Betula sect. Fruticosae*), ее развитию способствовали и частые пожары [53].

Роль кедра в кедрово-широколиственных лесах увеличилась 5510–4800 л.н. (*палинозона 3*, инт. 1.85–2.15 м). В палиноспектрах возросло содержание пыльцы темнохвойных пород, что наряду с сокращением доли широколиственных (до 4.1 %) свидетельствует о более прохладных условиях 5190–5100 л.н. На юге Приморья похолодание не так ярко проявлялось, как в других прибрежных районах и на Сихотэ-Алине [1]. Увлажненность в начале выделенного периода (5500–5300 л.н.) была высокая [4]. На пике похолодания стало существенно суше [1], что не исключало отдельных экстремальных событий. В прошлое алеврита, образованного во время сильного тайфуна, резко повышается доля спор (до 76 %), смытых со склонов. Находки обугленных растений говорят о прохождении пожаров на близлежащей территории ~5410–5000 л.н. Частые пожары 5500–4920 л.н. зафиксированы и на о. Русский [18].

Увеличение доли пыльцы широколиственных (до 35.4 %) и снижение доли пыльцы кедра корейского (*палинозона 4*, инт. 1.67–1.85 м) отвечает переходу (4800–4700 л.н.) от относительно прохладных условий с развитием чернопихтарно-широколиственных лесов к оптимуму позднего голоцена (4700–4350 л.н.), когда на палеоострове стали преобладать полидоминантные леса с участием кедра корейского и пихты, где одной из главных древесных пород была липа. Из болотной растительности по обрамлению озера исчезли сфагновые мхи. На менее влажные условия указывает рост содержания пыльцы полыни, произрастающей, скорее всего, на аккумулятивной форме. Единично найдена пыльца амброзии, признак нарушенных местообитаний [54]. Увеличение пыльцы берез, в том числе *Betula sect. Albae* (до 19 %), возможно, свидетельствует о нача-

ле трансформации островной геосистемы и развитии вторичных березовых лесов. В это время (4700–4500 л.н.) из крупных речных долин к побережью зал. Петра Великого начали расселяться первые земледельцы Приморья – представители зайсановской археологической культуры [55, 56].

Роль хвойных в составе кедрово-широколиственных лесов палеоострова увеличивалась 4350–4020 л.н. (*палинозона 5*, инт. 1.53–1.67 м), в том числе резко возросло участие пихты (4350–4250 л.н.). В конце периода расширились площади ельников в горах (4130–4020 л.н.). Скорее всего, стало прохладнее. Появилась пыльца бархата амурского. Среди луговой растительности стало много сложноцветных. В лесном покрове и на заболоченных участках стал распространяться чистоустник (*Osmunda*).

В кровле озерных глин выросла (до 39.6 %) доля пыльцы широколиственных и уменьшилось содержание пыльцы кедра корейского. В более теплых условиях 4020–3720 л.н. (*палинозона 6*, инт. 1.35–1.53 м) повышалась роль липы, граба, ореха и бархата. В конце периода стал больше распространен дуб, а среди трав – растения влажных местообитаний. Появление пыльцы аралии говорит о наличии осветленных участков.

В слое песков (*палинозона 7*, инт. 1.10–1.35 м) пыльцы мало, преобладают споры, что отвечает активному плоскостному смыву. Единственный полный спектр, полученный из линзы оторфованной глины с переотложенной органикой, не может корректно характеризовать ландшафтные условия. Роль широколиственных пород снижается.

В палиноспектрах из кровли песков и оторфованной глины (*палинозона 8*, инт. 0.70–1.10 м) резко возрастает содержание пыльцы ольхи, которая росла по берегам заболоченного озера. Возможно, здесь росла и береза овальнолистная. В кедрово-широколиственных лесах увеличивалось участие берез (в сумме до 47 %). Доля пыльцы широколиственных деревьев стала существенно ниже (<13 %), что отвечает похолоданию [1]. В препаратах часто встречаются обугленные остатки растений. Возможно, пожары были антропогенные и происходили на террасе, не затрагивая залесенных

склонов. В это время на полуострове жили представители янковской культуры [35].

В кровле оторфованной глины, перекрывающем песке и погребенной почве (*палинозона 9*, инт. 0.35–0.70 м) преобладают споры папоротников, среди которых много *Osmunda*. Вероятно, чистоустник рос на сырых местах и в зарослях ольхи на перешейке. В группе древесных много пыльцы ольхи, среди трав – полыни. Наличие пыльцы урути говорит о том, что небольшой водоем еще существовал.

Палиноспектры из поверхностной почвы отражают ландшафты малого ледникового периода (*палинозона 10*). В лесной растительности были в обилии представлены хвойные с незначительным участием берез и широколиственных. В.К. Арсеньев отмечал, что в 1921 г. на полуострове с северной стороны росло несколько елей и пихт [36], но по опросу корейцев, живших здесь более 50 лет к этому моменту, все западное обрамление Амурского залива было покрыто лесом с кедром и, вероятно, другими хвойными. Существенное увеличение участия хвойных пород в малый ледниковый период было отмечено для Шуфанского плато [19] и на п-ове Муравьева-Амурского [8]. Причиной исчезновения коренной растительности были частые пожары. Обращает внимание высокое содержание пыльцы амброзии (3.8 %), что отражает ее распространение в последние десятилетия [54].

Эволюция обстановок осадконакопления и палеоландшафтная запись в разрезе позднеголоценового озера

Строение разреза и хронология. Разрез 820, отобранный в краевой части болота на перешейке, вскрыл в основании зеленовато-серые алевропелитовые илы, выше выходит оторфованная глина и торф, хорошо разложившийся, плотный в основании, переходящий в умеренно разложившийся, сильно обводненный в верхней части, и очес. Согласно возрастной модели, запись развития растительности из этого разреза дополняет данные, полученные на основе изучения отложений палеоозера на аккумулятивном выступе. Возраст оторфованной глины оценивается около 3610 л.н. Торфонакопление по обрамлению озера началось около 2350 л.н. На границе плотного и обводненного торфа найдена линза тефры, представленной светло-серым алевритом с высококалийным (K_2O 5.6–6.06 %) вулканическим стеклом, состав которого (рис. 5) идентичен маркирующему пеплу В-Тм кальдерообразующего извержения влк. Байтоушань (946/947 гг. н.э.) [57]. Этот вулканический пепел широко распространен на юге Приморья и маркирует средневековый климатический оптимум [58, 59]. Рассеянное вулканическое стекло в небольшом количестве встречается и в верхней части разреза. По-видимому, оно было образовано в исторические извержения влк. Байтоушань (1668, 1702, 1903 гг.) [57, 60].

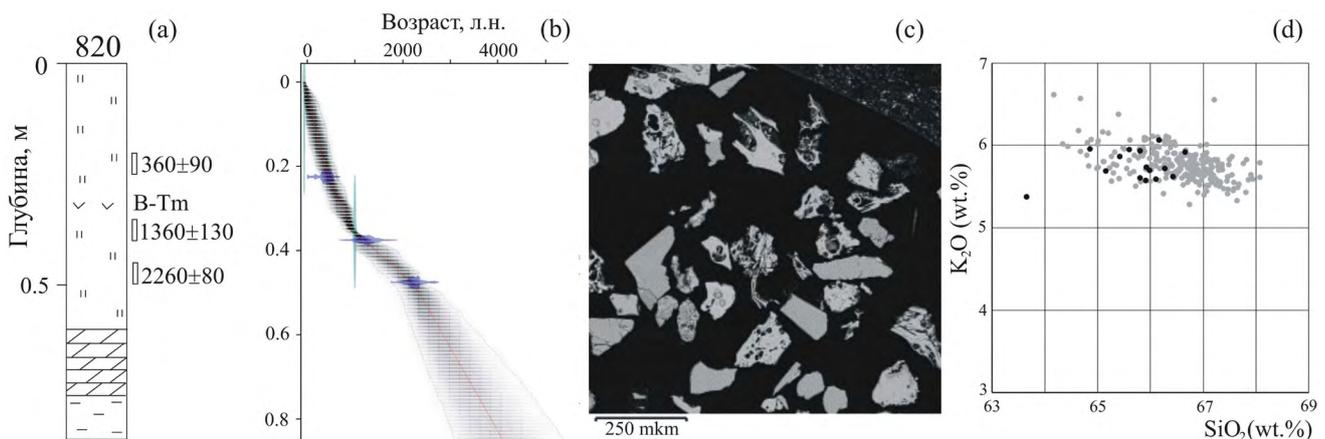


Рис. 5. (а) Разрез (820) озерно-болотных отложений на перешейке, п-ов Песчаный, южное Приморье. (б) Возрастная модель. Вулканическое стекло тефры В-Тм: (с) морфология; (д) соотношение SiO_2 и K_2O в вулканическом стекле, найденном на п-ове Песчаный (черные кружки) и разрезах голоценовых отложений из других районов Приморья (серые кружки) [59].

Fig. 5. (a) Section (820) of lake-bog sediments, the Peschany Peninsula, South Primorye. (b) Age-depth model. Volcanic glass of B-Tm tephra: (c) morphology; (d) SiO_2 versus K_2O plot for volcanic glass, found on the Peschany Peninsula (black circles) and from other areas of Primorye area (grey circles) [59].

Этапы развития озера. Озеро-лагуна образовалось на перешейке в трансгрессивную фазу в начале позднего голоцена, подъем уровня моря был близок к максимальным отметкам среднего голоцена [1]. Интенсивные аккумулятивные процессы, вероятно, начались при стабилизации уровня моря и его снижении. Более активная аккумуляция шла в северной части перешейка со стороны бухты Песчаная, в которую впадает р. Амба и где происходит переработка материала, поставляемого с участка крупных оползней (рис. 1). Здесь хорошо выражен наиболее высокий штормовой вал, окаймляющий акваторию палеоозера, большая часть которого в настоящее время заросла и превратилась в сильно обводненное болото. Первоначальный размер озера достигал 1.580×1.170 км. К этому валу примыкает серия штормовых валов (ширина полосы 0.5 км). В северо-восточной части перешейка, вероятно, был еще один небольшой водоем.

Этапы развития озера установлены на основании изучения диатомовых водорослей. В отложениях разреза определено 138 таксонов пресноводных и 22 морских и солоноватоводных диатомей. Среди пресноводных диатомей по местообитанию преобладают донные виды (88), обрастателей – 41, а планктонных и временно планктонных 6 видов. Отношение к солености известно для 110 видов, все они олигогалобы, доминируют виды-индифференты (75), галофобов – 33, галофилов – 2. По отношению к рН среды преобладают циркумнейтральные виды (58), ацидофилов – 40 и алкалифилов – 21. По географическому распространению доминируют космополиты, встречено 3 вида арктобореальных. Среди морских и солоноватоводных диатомей преобладают бентосные виды (20), планктонных – 2. Изменение в составе диатомей позволило выделить в разрезе 5 комплексов, отражающих эволюцию водоема (рис. 6).

В подошве алевропелитов диатомей мало, концентрация створок составляет 0.07 млн/г, наиболее часто встречается морской планктонный *Paralia sulcata*, а из пресноводных – виды рода *Eunotia*, характерные для заболоченных территорий. Выше в алевропелитовых илах и оторфованной глине (комплекс 1, инт. 0.60–0.80 м, ~3860–2860 л.н.) концентрация

диатомей повышается до 2 млн/г. В инт. 0.75–0.80 м и 0.65–0.70 м преобладают морские и солоноватоводные диатомей (94.1 и 63.7 % соответственно). Доминируют морской планктонный *Paralia sulcata*, солоноватоводные бентосные *Cocconeis scutellum*, *Rhopalodia acuminata*. Ближе к кровле слоя существенно возрастает роль обитателя сильно распресненных вод *Cosmioneis pusilla* [51, 61], а из пресноводных – *Diploneis oblongella*, населяющего аэробные места или хорошо аэрированные воды со средним уровнем электролитов [50]. В инт. 0.70–0.75 м (3610–3360 л.н.) и 0.60–0.65 м (3100–2860 л.н.) преобладают пресноводные виды (68.9 и 79.5 % соответственно). Возрастает численность видов, предпочитающих мелководные олиготрофные и олиготрофно-дистрофные водоемы: донные *Pinnularia viridis*, *P. subrupestris*, встречен аэрофил *P. lagerstedtii*, часто населяющий влажные мхи. Здесь же найдены почвенные виды (11–22 %): *Hantzschia amphioxys*, *Luticola mutica*, *Humidophila contenta*, *Pinnularia borealis*. Состав диатомей свидетельствует о существовании распресненной мелководной лагуны, связь которой с морем периодически прерывалась. В сухие сезоны по обрамлению водоема были осушки и развивались почвенные процессы. Обилие и состав морских и солоноватоводных видов и резкие смены в их содержании определялись активностью и силой штормовых нагонов. Берег моря был близко.

В хорошо разложившемся торфе (комплекс 2, инт. 0.40–0.60 м, 2860–1430 л.н.) доля морских и солоноватоводных диатомей, заносимых в шторма, не превышает 4 %. Среди пресноводных ведущими являются донные виды (до 83.7 %). Доминируют *Pinnularia subrupestris* и почвенные виды (до 56.4 %), причем в подошве слоя выделяется характерный для эвтрофных условий *Luticola mutica*, а ближе к кровле (инт. 0.40–0.50 м, 2350–1430 л.н.) – имеющий широкий трофический статус *Hantzschia amphioxys* [44]. Заметно увеличивается доля гидрофильных диатомей (до 56.2 %), среди которых выделяются *Pinnularia viridis*, холодноводные *Fragilariforma nitzschoides* и *Eunotia glacialis*, присутствуют озерно-реофильные *Meridion circulare* и планктонные *Aulacoseira granulata*, *A. subarctica*. Наряду с сухими

сезонами в отдельные годы были сильные дожди и на близлежащих склонах образовывались временные водотоки. По отношению к солености преобладают индифференты (71.3 %), доля ацидофилов составляет 23.4–25.3 %. Концентрация диатомей не превышает 0.9 млн/г. Состав комплекса свидетельствует о существовании мелководного умеренно заболоченного водоема, часто пересыхающего в краевых частях. Начало этапа совпало с холодным событием позднего голоцена (2800–2600 л.н.) [62]. Снижение увлажнения хорошо выражено в развитии озерно-болотных обстановок горных районов Приморья [22]. В конце данного этапа развития озера отмечено прогрессирующее увеличение обводнения озерной чаши.

В обводненном торфе (комплекс 3, инт. 0.20–0.40 м, 1430–380 л.н.) в составе пресноводных диатомей заметно повышается доля обрастаний (до 34 %). Доля гидрофильных диатомей достигает 74.5 %. Появляются часто населяющие мелководные водоемы и влажные почвы *Navigeia ignota* и *N. paludosa* [51]. Участие *Eunotia glacialis* и *Fragilariforma nitzschioides* увеличивается в начале малого ледникового периода 730 л.н. В это время появляется и арктобореальный *Navicula pseudosilicula* (до 2.6 %). В верхней части разреза обнаружены планктонный *Aulacoseira*

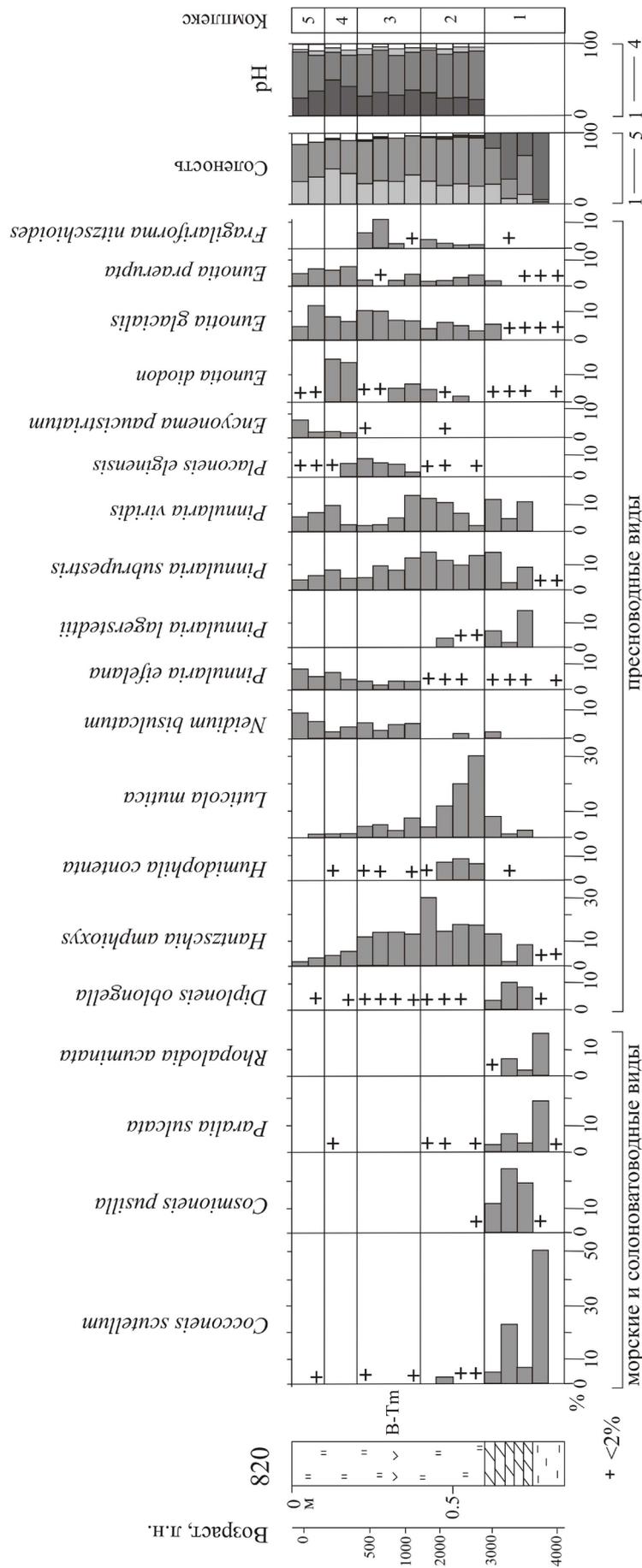


Рис. 6. Распределение диатомей в разрезе (820) отложений озера на перешейке, п-ов Песчаный, южное Приморье. Солености: 1 – галофобы, 2 – индифференты, 3 – галофилы, 4 – мезогалофа, 5 – нет данных. pH: 1 – ацидофилы и ацидобионты, 2 – циркумнейтральные, 3 – алкалофилы, 4 – нет данных.
 Fig. 6. Distribution of diatoms in paleolake sediments (section 820) on the isthmus, the Peschany Peninsula, South Primorye. Salinity: 1 – halophobes, 2 – indifferents, 3 – halophiles, 4 – mesohalobes, 5 – no data. pH: 1 – acidophiles and acidobiontes, 2 – circumneutral, 3 – alkaliphiles, 4 – no data.

subarctica, обрастатели *Achnanthydium minutissimum*, *Staurosirella pinnata*, *Cymbopleura naviculiformis* и др., свидетельствующие о значительном обводнении 530–380 л.н. Содержание почвенных видов снижается до 18 %. Незначительно повышается участие галофобов (до 41.4 %) и ацидофилов (до 35.9 %). Увеличивается и концентрация диатомей – от 1.2 млн/г в подошве до 3.6 млн/г в верхней части. В прошлое тэфры содержание створок снижается до 0.2 млн/г, доля гидрофильных диатомей здесь возрастает до 80.6 % – значит, пепел падал в воду. Обводнение олиготрофно-мезотрофного водоема с заболоченными берегами увеличилось, особенно в малый ледниковый период, что прослеживается и в развитии озерно-болотных обстановок в разных ландшафтных поясах Приморья [19, 22].

В верхней части торфяника (комплекс 4, инт. 0.10–0.20 м, 380 л.н. – до XIX в.) отмечен еще больший рост доли обрастаний (до 44.2 %), содержание гидрофильных диатомей составляет 70.9–72.3 %. Доминирует *Eunotia diodon*, толерантный к низкой степени увлажнения и развивающийся в олиготрофно-дистрофных низинных болотах на моховых подушках в диапазоне pH 4.3–7.8 [44, 47]. Субдоминантами являются гидрофильные *Eunotia glacialis*, *Eunotia praeurupta*, *Pinnularia viridis* и *P. subrupestris*; в подошве слоя найден *Navicula pseudosilicula* (1.6 %) и отмечается увеличение содержания *Sellaphora laevissima* (3.2 %), предпочитающего олиготрофные условия [49]. Участие почвенных видов не превышает 8 %. Стало больше галофобов (до 49.3 %) и ацидофилов (до 49.5 %), что свидетельствует о развитии олиготрофного умеренно обводненного заболоченного водоема. Концентрация диатомей достигает 3.4 млн/г. Климатические условия были холодными, увлажненность несколько снизилась, возросла роль атмосферного питания.

В очесе (комплекс 5, инт. 0–0.10 м, последние 220 лет) доминируют в основном гидрофильные виды диатомей (80–85.6 %). Содержание обрастаний снижается до 22.7 %, а доля почвенных – до 3 %. В подошве преобладает *Eunotia glacialis*. Субдоминантами являются виды рода *Pinnularia* (*P. divergentissima*, *P. eifelana*, *P. microstauron*, *P. subrupestris*, *P. viridis*),

предпочитающие мелководные олиготрофные водоемы с пониженными значениями солености и pH воды. Их содержание возрастает в кровле (до 51.4 %). Снижается содержание галофобов (до 31.3 %) и ацидофилов (до 24 %). Концентрация диатомей увеличивается от 4.6 до 7.5 млн/г. Водоем становится более обводненным, по-видимому за счет прокладки вдоль берега бухты Мелководная дороги с дренажной канавой, заполненной водой. Единичные створки морских и солоноватоводных видов в торфянике переносились сильными ветрами в экстремальные шторма.

Развитие растительности. Палиноспектры из алевропелитов и оторфованной глины (палинозона 1, инт. 0.65–0.85 м, 4110–3100 л.н.) отвечают развитию лесной растительности в гористой части полуострова – кедрово-широколиственных лесов с участием пихты, ели и берез (рис. 7, табл. 3). В основании разреза обнаружено максимальное содержание пыльцы граба (до 3.9 %). Участие хвойных увеличилось ~3860 л.н. Ольха росла по обрамлению лагуны, количество пыльцы сильно меняется, максимальное ее развитие отвечает фазе закрытия лагуны 3610–3350 л.н. Из трав встречается в основном пыльца растений, характерных для влажных местообитаний. Палиноспектры из средней части разреза во многом отражают развитие локальной растительности перешейка (палинозона 2, инт. 0.30–0.65 м, 3100–735 л.н.). Здесь были распространены заросли ольхи, которая стала в обилии расти по заболоченным берегам озера. Резкое снижение доли пыльцы широколиственных свидетельствует о более холодных условиях 3100–1950 л.н. При переходе к малому ледниковому периоду на болоте распространилась береза овальнолиственная, а на ветробойных участках – ольховник. В группе трав повышается роль пыльцы представителей луговых сообществ, развитых на аккумулятивных формах. В начале малого ледникового периода (палинозона 3, инт. 0.20–0.30 м, 735–380 л.н.) в условиях обводнения по обрамлению озера сократилась площадь зарослей ольхи, были развиты травянистые группировки (палинозона 4, инт. 0.10–0.20 м, 380–150 л.н.). Древесная растительность на склонах в условиях частых туманов и сильных

ветров стала разреженной. Распространяется ольховник. Со времени 380 л.н. развиваются дубняки, а при освоении побережья в XIX в. на лесную растительность увеличился антропогенный пресс – в верхней части разреза сокращается содержание пыльцы древесных (*палинозона 5*, 0–0.10 м, последние 150 лет). В начале XX в. на полуострове рос дровяной лес, состоящий главным образом из дуба монгольского, липы и даурской березы [36]. Лес был практически изведен в районе корейского поселка (сейчас на его месте пос. Береговое), расположенного около перешейка. Одной из причин исчезновения хвойных из состава растительности были частые пожары.

Палеоклиматические события

Изучение отложений палеоозер п-ова Песчаный позволило выделить ряд короткопериодных палеоклиматических событий (рис. 8), которые проявлялись в сопредельных регионах. Эти события представляют не только региональный интерес, но значимы и для понимания сложного взаимодействия факторов, определяющих климат в переходной зоне.

Основание разреза озерных отложений на перешейке фиксирует довольно сухие условия 6320–6020 л.н. Начало этого этапа совпало с похолоданием (6400–6300 л.н.), вызвавшим на побережье бухты Бойсмана обеднение лесов грабом, ильмом, орехом [4]. В это время произошло небольшое снижение уровня моря [1]. Похолодание на Корейском п-ове было выражено около 6400 л.н. [63]. 6400–6000 л.н. здесь были длительные засухи, связанные с ослаблением восточноазиатского летнего муссона [28], что отмечено и в других районах Восточной Азии [64].

В региональном масштабе в Восточной Азии это «сухое» событие еще не имеет четкого объяснения, его сигнал не всегда ясен в записях разных районов, что во многом определяется разным временным разрешением реконструкций [28]. Похолодание сопоставляется с глобальным холодным событием 6400–6200 л.н., сопровождавшимся в Азии аридизацией, летний муссон был экстремально слабым [60]. Следует отметить, что именно в это время снижались поток солнечной радиации [65] и температура поверхности океана (ТПО) в западной части Тихого океана. Эта тенденция была хорошо выражена в районе трога Окинава [66, 67] и проявилась в тропической зоне [68].

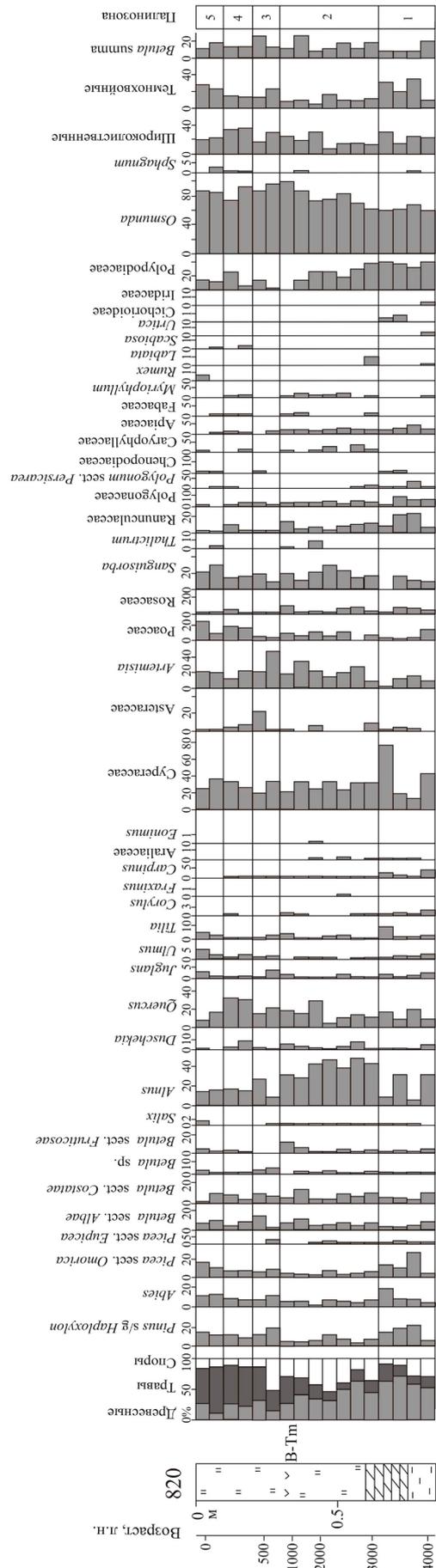


Рис. 7. Спорно-пыльцевая диаграмма для разреза (820) отложений палеоозера на перешейке, п-ов Песчаный, южное Приморье.
 Fig. 7. Pollen diagram for paleolake sediments (section 820) on the isthmus, the Peschany Peninsula, South Primorye.

Таблица 3. Описание палинозон из отложений озера на перешейке (разрез 820), п-ов Песчаный
Table 3. Description of pollen zones from paleolake sediments on the isthmus (section 820), the Peschany Peninsula

Палинозона (интервал, м)	Описание
5 (0–0.10)	Стало больше пыльцы темнохвойных пород (<i>Abies</i> , <i>Picea</i>), среди широколиственных сократилось количество пыльцы <i>Quercus</i> , в кровле возросла доля пыльцы <i>Tilia</i> , <i>Ulmus</i> . Увеличилось содержание пыльцы трав, характерных для влажных местообитаний.
4 (0.10–0.20)	Резко увеличилось содержание пыльцы трав (до 53 %). Стало больше пыльцы широколиственных (<i>Quercus</i> – до 31 %), в группе трав – <i>Poaceae</i> . Регулярно стали встречаться споры <i>Sphagnum</i> .
3 (0.20–0.30)	Увеличилась доля пыльцы трав. В основании снизилось содержание пыльцы древесных, в их составе сократилось участие пыльцы <i>Alnus</i> , стало больше пыльцы хвойных. Среди трав стало больше пыльцы <i>Artemisia</i> .
2 (0.30–0.65)	Снижается доля пыльцы древесных, доминирует пыльца <i>Alnus</i> . В нижней части снижается участие пыльцы широколиственных. В верхней части стало больше пыльцы кустарников (<i>Betula sect. Fruticosae</i> , <i>Duschekia</i>).
1 (0.65–0.85)	Преобладает пыльца древесных с доминированием хвойных (<i>Pinus</i> s/g <i>Haploxyton</i> , <i>Abies</i> , <i>Picea</i>), пыльца широколиственных представлена <i>Quercus</i> , <i>Ulmus</i> , <i>Tilia</i> , <i>Corylus</i> , <i>Carpinus</i> . Пыльцы берез больше в основании разреза. Доля пыльцы <i>Alnus</i> сильно варьирует (от 6 до 32 %). В группе трав преобладает пыльца растений влажных местообитаний (<i>Cyperaceae</i> , <i>Ranunculaceae</i> , <i>Sanguisorba</i> , <i>Polygonaceae</i>) и разнотравья. Встречены в обилии споры папоротников (<i>Polylodiaceae</i> , <i>Osmunda</i>), единично <i>Sphagnum</i> .

Снижение ТПО вело к ослаблению интенсивности тропического циклогенеза и повторяемости крупных тайфунов, обычно приносящих залповые осадки на юг Дальнего Востока. Ослабевала подача тепла и водяного пара вдоль течения Куроисио и, следовательно, перенос теплого влажного воздуха в умеренные широты. В этот период интенсивность явлений Эль-Ниньо была слабой, небольшая кратковременная активизация отмечена ~6300 л.н. [69, 70]. В конце периода ~6000 л.н. на юге Корейского п-ова отмечены экстремальные наводнения [29]. Этот сигнал увеличения влажности ловится в изученном разрезе палеоозера по пику содержания пыльцы кедра корейского.

Кратковременное похолодание 5920–5820 л.н. имело такую же природу – вызвано снижением солнечной активности, но меньшей амплитуды [65]. В палиноспектрах уменьшилось количество пыльцы широколиственных пород. На берегу бухты Бойсмана 6050–5800 л.н. в составе широколиственных лесов существенно сократилось участие граба [4].

Следующее похолодание 5710–5410 л.н., хорошо выраженное на п-ове Песчаный, дало вспышку развития арктобореальных диатомей, а на заболоченных участках способствовало появлению зарослей березы овалнолистной. В это время также наблюдалось снижение

солнечной активности, причем выделяется несколько минимумов, сопоставимых по масштабу с глобальным холодным событием 6400–6200 л.н. [62, 65]. На палеотемпературной кривой для тропической зоны Западной Пацифики отмечен тренд на сильное снижение [68]. Ослабление летнего муссона зафиксировано и на северо-востоке Китая, где в районе оз. Цинбоху становилось холоднее и суше [23]. Такие же результаты получены по Нижнему Приамурью [20]. На берегах юга Приморья и на крайнем юге Японии [71] усилилась штормовая активность.

Начало этапа зарастания палеоозера (5410–4250 л.н.) совпало с концом термического оптимума голоцена в изученном регионе. Минимумы содержания пыльцы широколиственных пород зафиксированы около 5145 и 4720 л.н. С 5300 л.н. увлажненность снижалась, что не исключало прохождение редких сильных тайфунов. Запись одного такого события (5000–4920 л.н.) хорошо согласуется с данными по Корейскому п-ову, где около 5000 л.н. фиксируются следы экстремальных наводнений [70]. Похолодание сопровождалось регрессией, наиболее значительной в среднем-позднем голоцене [1]. Нижняя временная граница выделенного периода хорошо сопоставляется с данными по о. Ребун (Северная

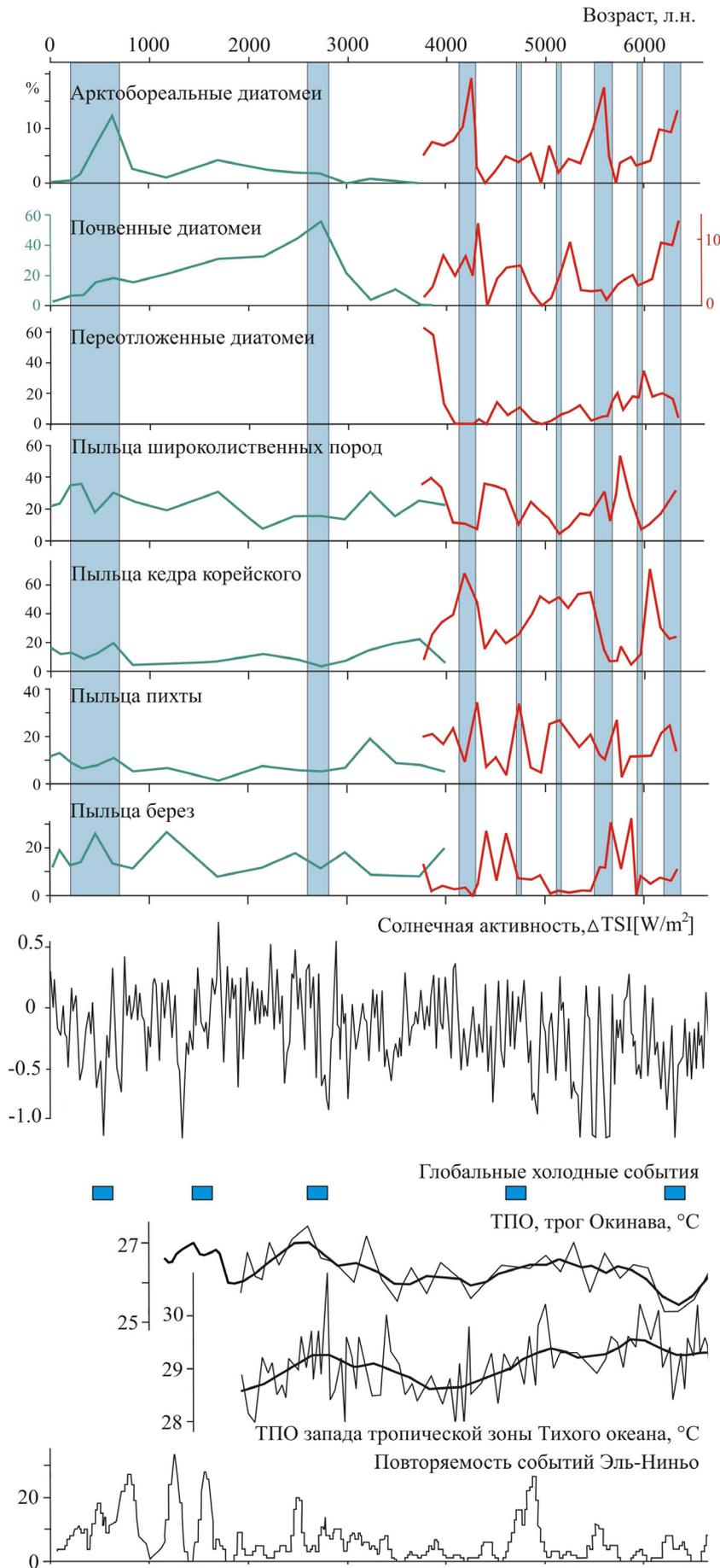


Рис. 8. Сравнение изменений в составе биотических компонентов на побережье п-ова Песчаный с палеоклиматическими данными по другим регионам. Зеленая линия – данные по разрезу 820, красная – по разрезу 1320; голубые поля – холодные события, зафиксированные в изученных разрезах. Изменение солнечной активности по [65]; глобальные холодные события по [62]; температура поверхности океана: трог Окинава по [67], тропическая зона, западная часть Тихого океана по [68]; повторяемость событий Эль-Ниньо по [69].

Fig. 8. Comparison of biotic components changes on the Peschany Peninsula coast with paleoclimatic data for other regions. Green line – data for section 820, red line – for section 1320; blue fields – cold events recorded in the studied sections. Solar activity variation, according to [65]; global cold events, according to [62]; ocean surface temperature: Okinawa Trough according to [67], western tropical Pacific Ocean according to [68]; frequency (per 100 years) of El Niño events according to [69].

Япония) – 5540–5300 л.н. [26, 72]. Этот климатический переход зафиксирован по росту ледников в северном полушарии 5400 л.н. [73]. Снижалась инсоляция [27]. Данные по развитию растительности около оз. Цинбоху показывают, что с 5600 л.н. уменьшалась интенсивность летнего муссона [23]. Пик похолодания – глобальное холодное событие – выделяется 4800–4600 л.н., отрицательные температурные аномалии наблюдались по всему миру [62]. В этот период более интенсивным было Эль-Ниньо [69]. С 4800 л.н. на Корейском п-ове климат стал более прохладным и более сухим [28]. Начался отчетливый тренд на похолодание поверхностных вод в тропической зоне Тихого океана [68]. Уменьшилась интенсивность течения Куроисио [74].

Палеоландшафтные изменения на п-ове Песчаный 4350–4020 л.н. (усиление роли темнохвойных) совпадают с границей среднего–позднего голоцена новой международной стратиграфической шкалы [75], что далеко не всегда прослеживается в региональных шкалах умеренной зоны [76]. На юге Дальнего Востока, в сопредельных районах, короткий сдвиг в сторону более прохладных условий отмечен ~4120 л.н. в палинологических записях из озерных отложений в северо-восточном Китае (оз. Сихайлонгван) [77] и 4130 л.н. на о. Ребун (оз. Кусю) [26]. Ухудшение климата наблюдалось 4200 и 4000 л.н. (юг Корейского п-ова) [27]. Сухие условия связывают не со снижением солнечной активности, а с изменчивостью ТПО в тропиках, где отмечены минимумы в это время [68]. Эль-Ниньо было ослаблено [69]. Расширение ледников в глобальном масштабе 4400–4200 л.н. [73] рассматривается как переход к неогляциалу [62].

В позднем голоцене на побережье юго-западного Приморья похолодание началось ~3390–3190 л.н. [3]. Увлажненность существенно сократилась 3300–3100 л.н., что совпало со снижением интенсивности восточноазиатского муссона [7, 18, 19, 22, 23, 24]. Резкое похолодание и аридизацию в регионе связывают и с усилением активности Эль-Ниньо [28]. 3300 л.н. снизилась интенсивность течения Куроисио [74]. Похолодание было длительным и имело сложную структуру, его пик коррелирует с глобальным холодным событи-

ем 2800–2600 л.н. [62], хорошо проявленным на юге Дальнего Востока [1, 22]. Резко снижалось количество и разнообразие пыльцы широколиственных пород, почти исчезла пыльца граба. На п-ове Песчаный в лесах увеличилось участие берез, а вокруг озер на осушенных участках в обилии стала расти ольха, распространялся ольховник. По близлежащему разрезу озерно-болотных отложений около оз. Утинное выделены два «сухих» эпизода: 2780–2700 и 2610–2510 л.н. [7].

Временное разрешение реконструкций развития озера на перешейке не позволяет детально охарактеризовать короткопериодную ритмику второй половины позднего голоцена. Начало малого ледникового периода хорошо совпадает с данными по палеоозеру Шуфанского плато – 720 л.н. [19]. Как и в других районах Приморья, условия были очень влажными [22], особенно значительное обводнение было 530–380 л.н. Снижение обводнения озера отмечено с ~380 л.н. до XIX в. Подобная картина наблюдалась и в развитии палеоозера на Борисовском плато ~360 л.н. В целом, этот временной интервал близок по возрасту к периодам уменьшения частоты наводнений, вызванных палеотайфунами, на восточном побережье юга Корейского п-ова [78]. Возможно, более сухой эпизод связан с усилением интенсивности событий Эль-Ниньо [69], во время которых на материковой части юга Дальнего Востока наблюдаются засушливые условия [79].

Изучение озерных отложений позволило отметить и ряд короткопериодных потеплений. В конце термического оптимума выделяются теплые фазы: 6020–5920 л.н. – по снижению содержания арктобореальных диатомей, и 5820–5510 л.н., более выраженная и более длительная, на которую отреагировала и лесная растительность. Повышение солнечной радиации [65] и пик ТПО в тропической зоне Тихого океана [68] дают основание предположить значительное меридиональное перемещение теплых влажных воздушных масс и усиление повторяемости тропических циклонов. Поступление обломочного материала в озеро с плоскостным смывом увеличивалось, индикатором чего являются пики содержания переотложенных створок диатомей из подбазальных отложений.

Потепление ~4610–4310 л.н., выделенное по увеличению содержания термофилов и снижению доли арктобореальных диатомей, сопоставляется с положительными пиками солнечной активности [65]. Изменения в ландшафтах соответствуют первому полуритму оптимума – более теплому и менее влажному [1], возможно, за счет увеличения эффективного испарения. Иссущение 4800–3600 л.н., выраженное на Корейском п-ове, связывают с ослаблением летнего муссона и снижением ТПО в районе трога Окинава, особенно 4400–3500 л.н. [28]. В то же время ~3800 л.н. были экстремальные наводнения [29].

Потепление с высоким увлажнением 4020–3750 л.н. отвечает общей тенденции на юге Дальнего Востока, связанной с усилением циклонической активности [80]. Фаза развития палеоозера, когда в водоем поставлялся материал в результате наиболее активного плоскостного смыва, не датирована. Можно предположить, что активизация циклогенеза в этот период была обусловлена активным меридиональным переносом воздушных масс из тропической зоны Тихого океана, где повышалась ТПО. Пик температур фиксируется ~3600–3400 л.н. [68]. Именно с 3600 л.н. более сильное влияние летнего муссона зафиксировано на Корейском п-ове [28]. Увеличивалась повторяемость и интенсивность тайфунов на юге Японии [71] и с 3700 л.н. на юге Корейского п-ова [29]. Для этого возраста установлено увеличение поступления пресноводных диатомей в осадки Амурского залива, что свидетельствует об обильных дождях и увеличении повторяемости сильных тайфунов [81].

Выводы

1. В результате изучения отложений береговых озер п-ова Песчаный установлена сложная короткопериодная климатическая ритмика среднего–позднего голоцена. Озера и окружающая растительность чутко реагировали на гидроклиматические изменения, выделены палеогеографические события вплоть до 100-летнего масштаба, проявившиеся в регионе. Среднеголоценовое палеоозеро образовалось на аккумулятивном выступе с двусторонним питанием при снижении уровня моря,

совпавшем с незначительным похолоданием около 6320 л.н. Озеро существовало до середины позднего голоцена и прошло 8 этапов развития.

2. Активное зарастание водоема совпало с концом оптимума голоцена (~5410 л.н.). В его развитии выделяется несколько периодов обводнения, обусловленных как увеличением количества атмосферных осадков, так и колебаниями уровня моря. Наличие переотложенных створок диатомей из подбазальтовых отложений является индикатором плоскостного смыва, активизировавшегося при прохождении частых сильных тайфунов. Наиболее активным плоскостной смыв был в теплые фазы начала позднего голоцена. Лагунное озеро на перешейке образовалось в начале позднего голоцена, когда палеоостров соединился с материком.

3. Выделено 5 фаз развития водоема на перешейке. Озеро стало пресноводным во время похолодания 2800–2600 л.н. В относительно сухих условиях его размер сильно сокращался; обводнение произошло в малый ледниковый период, а последний подъем уровня имеет антропогенную природу. Присутствие морских диатомей фиксирует прохождение экстремальных штормов, створки поступали как с заплесками, так и с аэрозолями.

4. На территории палеоострова, в позднем голоцене полуострова, происходило развитие кедрово-широколиственных лесов с участием пихты цельнолистной, берез, а также полидоминантных широколиственных лесов. Роль термофилов увеличивалась 5820–5510, 4610–4310, 4800–3600, 4020–3750 л.н., что отвечает теплым событиям с разной степенью увлажнения. Зафиксирован ряд холодных событий, некоторые из них имели глобальное проявление, в том числе похолодание 4350–4020 л.н., близкое по времени к новой границе среднего–позднего голоцена.

5. Сравнение данных по развитию береговых озер п-ова Песчаный и гидроклиматических изменений в других регионах Восточной Азии показывает, что выделенные короткопериодные события тесно связаны с изменением потока солнечной радиации и аномалиями в океане и атмосфере Азиатско-Тихоокеанского региона.

Список литературы

1. Короткий А.М., Гребенникова Т.А., Пушкарь В.С., Разжигаева Н.Г., Волков В.Г., Ганзей Л.А., Мохова Л.М., Базарова В.Б., Макарова Т.Р. **1997**. Климатические смены на территории юга Дальнего Востока в позднем плейстоцене – голоцене. *Вестник ДВО РАН*, 3: 121–143.
2. Короткий А.М. **2002**. Палинологические характеристики и радиоуглеродные датировки верхнечетвертичных отложений Российского Дальнего Востока (низовья р. Амур, Приморье, о. Сахалин, Курильские острова). В кн.: Андерсон П.М., Ложкин А.В. (ред.) *Позднечетвертичные растительность и климаты Сибири и Российского Дальнего Востока (палинологическая и радиоуглеродная база данных)*. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 257–369.
3. Микишин Ю.А., Петренко Т.И., Гвоздева И.Г., Попов А.Н., Кузьмин Я.В., Раков В.А., Горбаренко С.А. **2008**. Голоцен побережья юго-западного Приморья. *Научное обозрение*, 1: 8–27. EDN: PWPORL
4. Микишин Ю.А., Петренко Т.И., Гвоздева И.Г. **2019**. Поздняя фаза атлантического периода голоцена на юге Приморья. *Успехи современного естествознания*, (12): 96–107.
5. Белянин П.С., Андерсон П.М., Ложкин А.В., Белянина Н.И., Арсланов Х.А., Максимов Ф.Е., Горнов Д.А. **2019**. Изменения растительности на юге российского Дальнего Востока в среднем и позднем голоцене. *Известия РАН. Серия географическая*, 2: 69–84. <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019269-84>
6. Лящевская М.С. **2015**. Динамика растительного покрова островов залива Петра Великого. *Известия РАН. Серия географическая*, (3): 143–50. doi.org/10.15356/0373-2444-2015-3-121-128
7. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Мохова Л.М., Чаков В.В., Копотева Т.А., Климин М.А., Симонова Г.В. **2023**. Проявление глобальных похолоданий позднего голоцена на морском побережье юга Дальнего Востока. *Геоморфология и палеогеография*, 54(1): 112–130. <https://doi.org/10.31857/S2949178923010115>; EDN: GQNMFT
8. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Lyashevskaya M.S., Makarova T.R., Kudryavtseva E.P., Grebennikova T.A., Panichev A.M., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Petrov A.Yu., Malkov S.S. **2019**. Climatic and human impacts on landscape development of the Murav'ev Amursky Peninsula (Russian South Far East) in the Middle/Late Holocene and historical time. *Quaternary International*, 516: 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.12.007>
9. Субетто Д.А. **2009**. *Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции*. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 343 с. EDN: QKIZRX
10. Субетто Д.А., Сапелко Т.В., Столба В.Ф., Кузнецов Д.Д., Лудикова А.В., Неуструева И.Ю. **2023**. Палеолимнология озер Западного Крыма. *Доклады РАН. Науки о Земле*, 510(1): 106–111. EDN: DURVQT
11. Назарова Л.Б., Разжигаева Н.Г., Дикман Б., Гребенникова Т.А., Ганзей Л.А., Белянина Н.И., Арсланов Х.А., Кайстренко В.М., Горбунов А.О., Харламов А.А., Головатюк Л.В., Сырых Л.С., Субетто Д.А., Лисицын А.П. **2019**. Реконструкция экологических условий голоцена северо-запада Тихоокеанского региона в соотношении с палеоданными острова Шикотан. *Доклады АН*, 486(2): 212–216. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524862212-216>
12. Lozhkin A.V., Anderson P.M., Brown T.A., Grebennikova T.A., Korzun J.A., Tsigankova V.I. **2021**. Lake development and vegetation history in coastal Primor'ye: implications for Holocene climate of the southeastern Russian Far East. *Boreas*, 50(4): 983–997. <https://doi.org/10.1111/bor.12477>
13. Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г. **2014**. Палеосреда острова Русский (южное Приморье) в среднем–позднем голоцене. *Фундаментальные исследования*, 3: 516–522. <https://doi.org/10.17513/fr.33706>
14. Андерсон П.М., Белянин П.С., Белянина Н.И., Ложкин А.В. **2017**. Эволюция растительного покрова западного побережья залива Петра Великого в позднем плейстоцене – голоцене. *Тихоокеанская геология*, 36(4): 99–108.
15. Лящевская М.С., Ганзей К.С., Макарова Т.Р. **2017**. Реконструкция палеоусловий острова Стенина (Японское море) в среднем–позднем голоцене. *Biodiversity and Environment of Far East Reserves*, 2(11): 3–20.
16. Лящевская М.С., Базарова В.Б., Макарова Т.Р. **2023**. Развитие природной среды и эволюция озера Гнилого (юго-восточное Приморье) за последние 3300 лет. *Геоморфология и палеогеография*, 54(3): 108–123.
17. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Макарова Т.Р., Корнюшенко Т.В., Кудрявцева Е.П., Ганзей К.С., Судьин В.В., Харламов А.А. **2020**. Палеозеро острова Шкота (залив Петра Великого): природный архив изменений климата и ландшафтов. *Геосистемы переходных зон*, 2: 230–249. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.2.230-249>
18. Razjigaeva N., Ganzey L., Grebennikova T., Kornushenko T., Ganzey K., Kudryavtseva E., Prokopets S. **2020**. Environmental changes and human impact on landscapes as recorded in lagoon-lacustrine sequences of Russky Island, South Far East. *J. of Asian Earth Sciences*, 197: 104386. <https://doi.org/10.1016/j.jsaes.2020.104386>
19. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Kopoteva T.A., Kudryavtseva E.P., Belyanin P.S., Panichev A.M., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Petrov A.Yu., Sudin V.V., Klimin M.A., Kornushenko T.V. **2021**. Holocene mountain landscape development and monsoon variation in the southernmost Russian Far East. *Boreas*, 50(4): 1043–1058. <https://doi.org/10.1111/bor.12545>
20. Базарова В.Б., Климин М.А., Копотева Т.А. **2018**. Голоценовая динамика восточноазиатского муссона в Нижнем Приамурье (юг Дальнего Востока). *География и природные ресурсы*, 3: 124–133. doi:10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(124-133); EDN: XYUIEN

21. Leipe C., Nakagawa T., Gotanda K., Müller S., Tarasov P. **2015**. Late Quaternary vegetation and climate dynamics at the northern limit of the East Asian summer monsoon and its regional and global-scale controls. *Quaternary Science Reviews*, 116: 57–71. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.012>
22. Razjigaeva N., Ganzey L., Grebennikova T., Ponomarev V. **2023**. “Cold-Dry” and “Cold-Wet” events in the Late Holocene, Southern Russian Far East. *Climate*, 11(4): 91. <https://doi.org/10.3390/cli11040091>
23. Li C., Wu Ya., Hou X. **2011**. Holocene vegetation and climate in Northeast China revealed from Jingbo Lake sediment. *Quaternary International*, 229(1–2): 67–73. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.12.015>
24. Chen R., Shen J., Li C., Zhang E., Sun W., Ji M. **2015**. Mid- to Late-Holocene East Asian summer monsoon variability recorded in lacustrine sediments from Jingpo Lake, Northeastern China. *Holocene*, 25: 454–468. (First online 2014). <https://doi.org/10.1177/0959683614561888>
25. Kong G.S., Kim K.-O., Kim S.-P. **2013**. Characteristics of the East Asian summer monsoon in the South Sea of Korea during the Little Ice Age. *Quaternary International*, 286: 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.07.022>
26. Leipe C., Müller S., Hille K., Kato H., Kobe F., Schmidt M., Seyffert K., Spengler III R., Wagner M., Weber A.W., Tarasov P. **2018**. Vegetation change and human impacts on Rebun Island. *Quaternary Science Reviews*, 193: 129–144. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.06.011>
27. Park J., Park Jinh., Yi S., Kim J.C., Lee E., Choi J. **2019**. Abrupt Holocene climate shifts in coastal East Asia, including the 8.2 ka, 4.2 ka, and 2.8 ka BP events, and societal responses on the Korean Peninsula. *Scientific Reports*, 9: 10806. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47264-8>
28. Park Jinh., Park Jung., Yi S., Lim J., Kim J.C., Jin Q., Choi J. **2021**. Holocene hydroclimate reconstruction based on pollen, XRF, and grain-size analysis and its implications for past societies of the Korean Peninsula. *The Holocene*, 31(9): 1489–1500. <https://doi.org/10.1177/09596836211019115>
29. Lim J., Um I.-K., Yi S., Jun C.-P. **2022**. Hydroclimate change and its controlling factors during the middle to late Holocene and possible 3.7-ka climatic shift over East Asia. *Quaternary Research*, 109: 53–64. <https://doi.org/10.1017/qua.2022.13>
30. Рассказов С.В., Саранина Е.В., Мартынов Ю.А., Чащин А.А., Максимов С.О., Брандт И.С., Брандт С.Б., Масловская М.Н., Коваленко С.В. **2003**. Развитие позднекайнозойского магматизма активной континентальной окраины Южного Приморья. *Тихоокеанская геология*, 22(1): 92–109. EDN: TUNYYP
31. Глезер З.И., Жузе А.П., Макарова И.В., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова-Порецкая В.С. (ред.) **1974**. *Диатомовые водоросли СССР. Ископаемые и современные*. Л.: Наука, т. 1, 403 с.
32. Покровская И.М. **1966**. Методика камеральных работ. В кн.: *Палеопалинология*. Л.: Недра, т. 1, с. 32–61.
33. Reimer P., Austin W.E.N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Ramsey B.C., Butzin M., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T., Hogg A.G. **2020**. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 kcal BP). *Radiocarbon*, 62: 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
34. Blaauw M., Christen J.A. **2011**. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*, 6: 457–474. <https://doi.org/10.1214/11-BA618>
35. Вострецов Е.В. **2022**. Поселение Песчаный-1: от Арсеньева до наших дней. *Труды ИИАЭ*, 35: 7–33. doi:10.24412/2658-5960-2022-35-7-33; EDN: WARMBO
36. Археологические раскопки на полуострове Песчаном, произведенные В.К. Арсеньевым в 1921 году. **2020**. В кн.: *Арсеньев В.К. Полное собрание сочинений*. Владивосток: Рубеж, т. 4, кн. 1, с. 85–102.
37. Хорев В.А. **1978**. *Археологические памятники Приморского края*. Владивосток: Дальневост. кн. изд-во, 72 с.
38. Kuzmin Y.V., Burr G.S., Timothy Jull A.J. **2001**. Radiocarbon reservoir correction ages in the Peter the Great Gulf, Sea of Japan, and eastern coast of the Kunashir, Southern Kuriles (Northwestern Pacific). *Radiocarbon*, 43(2A): 477–481. <https://doi.org/10.1017/s0033822200038364>
39. Grebennikova T., Razjigaeva N., Ganzey L., Ganzei K., Arslanov Kh., Maksimov F., Petrov A., Kharlamov A. **2020**. Evolution of a paleolake on Russian Island (Sea of Japan) in middle-late Holocene: record of sea-level oscillations, extreme storms and tsunamis. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science: The 5th International Conference “Ecosystem dynamics in the Holocene”*, 438: 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/438/1/012009>
40. Зенкович В.П. **1962**. *Основы учения о развитии морских берегов*. М.: АН СССР, 710 с.
41. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Kudryavtseva E.P., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Starikova A.A. **2018**. Landscape and environmental changes along the Eastern Primorye coast during the middle to late Holocene and human effects. *Journal of Asian Earth Sciences*, 158: 160–172. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.02.013>
42. Лихачева О.Ю., Пушкарь В.С., Черепанова М.В., Павлюткин Б.И. **2009**. Зональная диатомовая шкала и основные геобиологические события неогена Приморья. *Вестник ДВО РАН*, 4: 64–72.
43. Авраменко А.С., Черепанова М.В., Пушкарь В.С., Ярусова С.Б. **2015**. Характеристика некоторых дальневосточных диатомитов. *Геология и геофизика*, 56(6): 1206–1220. doi:10.15372/GiG20150610; EDN: TYWKCH

44. Dam (van) H., Mertens A., Sinkeldam J. **1994**. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from The Netherlands. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, 28: 117–133. <https://doi.org/10.1007/bf02334251>
45. Fukumoto Y., Kashima K., Orkhonselenge A., Ganzorig U. **2012**. Holocene environmental changes in northern Mongolia inferred from diatom and pollen records of peat sediment. *Quaternary International*, 254: 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.10.014>
46. Харитонов В.Г. **2010**. Конспект флоры диатомовых водорослей (*Bacillariophyceae*) Северного Охотоморья. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 189 с.
47. Liu Y., Wang O., Fu C. **2011**. Taxonomy and distribution of diatoms in the genus *Eunotia* from the Da'erbin Lake and Surrounding Bogs in the Great Xing'an Mountains, China. *Nova Hedwigia*, 92(1–2): 205–232.
48. Krammer K., Lange-Bertalot H. **1991**. *Bacillariophyceae*. Teil 3: *Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 576 p.
49. Fazlutdinova A., Gabidullin Y., Allaguvatova R., Gaysina L. **2020**. Diatoms in Kamchatka's Hot Spring Soil. *Diversity*, 12(11): 435. <https://doi.org/10.3390/d12110435>
50. You Q., Liu Y., Wang Y., Wang Q. **2009**. Taxonomy and distribution of diatoms in the genera *Epithemia* and *Rhopalodia* from the Xinjiang Uygur Autonomous Region, China. *Nova Hedwigia*, 89(3–4): 397–430. <https://doi.org/10.1127/0029-5035/2009/0089-0397>
51. Krammer K., Lange-Bertalot H. **1986**. *Bacillariophyceae*. Teil 1: *Naviculaceae*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 876 p. (Ettl H. et al. (eds) Süßwasserflora von Mitteleuropa; 2).
52. Ncsje A., Aa A.R., Kvarnme M., Sønstegeard E. **1994**. A record of Late Holocene avalanche activity in Frudalen, Sogndalsdalen, western Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 74: 71–76.
53. Копотева Т.А., Купцова В.А. **2011**. Пирогенный фактор на маревых болотах Приамурья. *Вестник СВНЦ ДВО РАН*, 3: 37–41. EDN: NXSVYP
54. Кудрявцева Е.П., Базарова В.Б., Лящевская М.С., Мохова Л.М. **2018**. Амброзия полынолистная: современное распространение, структура сообществ и присутствие в голоценовых отложениях Приморского края (юг Дальнего Востока России). *Комаровские чтения*, 66: 125–146. <https://doi.org/10.25221/kl.66.5>
55. Сергушева Е.А. **2007**. Раннее земледелие в Приморье. *Вестник ДВО РАН*, 3: 116–120. EDN: LASZMX
56. Вострецов Ю.Е. **2009**. Первые земледельцы на побережье залива Петра Великого. *Вестник НГУ. Серия История, филология*, 8(3): 113–120. EDN: KWCPAP
57. Chen X.-Y., Blockley S.P.E., Tarasov P.E., Xu Y.-G., McLean D., Tomlinson E.L., Albert P.G., Liu J.-Q., Müller S., Wagner M., Menzies M.A. **2016**. Clarifying the distal to proximal tephrochronology of the Millennium (B-Tm) eruption, Changbaishan Volcano, northeast China. *Quaternary Geochronology*, 33: 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2016.02.003>
58. Акуличев В.А., Астахов А.С., Малахов М.И., Аксентов К.И., Карабцов А.А., Марьяш А.А., Алаторцев А.В. **2016**. Первая находка криптотефры катастрофических извержений вулкана Байтоушань Х в. н.э. в шельфовых отложениях Японского моря. *Доклады АН*, 469(6): 734–738. <https://doi.org/10.7868/S0869565216240166>
59. Разжигаетова Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Мохова Л.М., Арсланов Х.А., Максимов Ф.Е., Петров А.Ю., Сахно В.Г. **2020**. Пепел В-Тm катастрофического извержения вулкана Байтоушань в континентальных отложениях Приморья, как временной маркер малого оптимума голоцена. *Доклады РАН. Науки о Земле*, 494(2): 29–37. <https://doi.org/10.31857/S268673972010014X>; EDN: СМІЕКК
60. Сахно В.Г. **2007**. Вулкан Пектусан: хронология извержений, состав и эволюция магм на основе К-Аг-датирования и изотопов $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $\delta^{18}\text{O}$. *Доклады АН*, 412(2): 226–233.
61. Krammer K., Lange-Bertalot H. **1988**. *Bacillariaceae*. Teil 2: *Epithemiaceae, Surirellaceae*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 536 p.
62. Wanner H., Solomina O., Grosjean M., Ritz S.P., Jemel M. **2011**. Structure and origin of Holocene cold events. *Quaternary Science Review*, 30: 3109–3123. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.07.010>
63. Constantine M., Kim M., Park J. **2019**. Mid- to late Holocene cooling events in the Korean Peninsula and their possible impact on ancient societies. *Quaternary Research*, 92(1): 98–108. <https://doi.org/10.1017/qua.2018.132>
64. Selvaraj K., Chen C.T.A., Lou J.-Y. **2007**. Holocene East Asian monsoon variability: Links to solar and tropical Pacific forcing. *Geophysical Research Letters*, 34: L01703. <https://doi.org/10.1029/2006GL028155>
65. Steinhilber F., Beer J., Fröhlich C. **2009**. Total solar irradiance during the Holocene. *Geophysical Research Letters*, 36(19): L19704. <https://doi.org/10.1029/2009GL040142>
66. Sun Y., Oppo D.W., Xiang R., Liu W., Gao S. **2005**. Last deglaciation in the Okinawa Trough: Subtropical northwest Pacific link to Northern Hemisphere and tropical climate. *Paleoceanography*, 20(4): PA4005. <https://doi.org/10.1029/2004PA001061>
67. Ruan J., Xu Y., Ding S., Wang Y., Zhang X.A. **2015**. A high resolution record of sea surface temperature in southern Okinawa Trough for the past 15,000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 426: 209–215. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.03.007>
68. Stott L., Cannariato K., Thunell R., Haug G.H., Koutavas A., Lund S. **2004**. Decline of surface temperature and salinity in the western tropical Pacific Ocean in the Holocene epoch. *Nature*, 431: 56–59. <https://doi.org/10.1038/nature02903>
69. Moy C.M., Seltzer G., Rodbell D.T., Anderson D.M. **2002**. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch. *Nature*, 420(6912): 162–165. <https://doi.org/10.1038/nature01194>

70. Lee H., Jin-Young Lee J.-Y., Lim J. **2021**. Holocene hydrologic fluctuations on the southern coast of Korea and their link to ENSO activity. *Geosciences Journal*, 26(1): 129–140. <https://doi.org/10.1007/s12303-021-0020-8>
71. Woodruff J.D., Donnelly J.P., Okusu A. **2009**. Exploring typhoon variability over the mid-to-late Holocene: evidence of extreme coastal flooding from Kamikoshiki, Japan. *Quaternary Science Reviews*, 28(17–18): 1774–1785. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.02.005>
72. Schmidt M., Leipe Ch., Becker F., Goslar T., Hoelzmann Ph., Mingram J., Müller S., Tjallingii R., Wagner M., Tarasov P.E. **2019**. A multi-proxy palaeolimnological record of the last 16,600 years from coastal Lake Kushu in northern Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 514: 613–626. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.11.010>
73. Solomina O.N., Bradley R.S., Hodgson D.A., Ivy-Ochs S., Jomelli V., Mackintosh A.N., Nesje A., Owen L.A., Wanner H., Wiles G.C., Young N.E. **2015**. Holocene glacier fluctuations. *Quaternary Science Reviews*, 111: 9–34. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.11.018>
74. Jian Z.M., Wang P., Saito Y., Wang J.L., Pflaumann U., Oba T., Cheng X.R. **2000**. Holocene variability of the Kuroshio Current in the Okinawa Trough, northwestern Pacific Ocean. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 184(1): 305–319. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(00\)00321-6](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(00)00321-6)
75. Walker M., Head M.J., Lowe J., Berkelhammer M., Björck S., Cheng H., Cwynar L.C., Fisher D., Gkinis V., Long A., Newnham R., Rasmussens S., Weiss H. **2019**. Subdividing the Holocene Series/Epoch: formalization of stages/ages and subseries/subepochs, and designation of GSSPs and auxiliary stratotypes. *Journal of Quaternary Science*, 34(3): 173–186. <https://doi.org/10.1002/jqs.3097>
76. Сапелко Т.В. **2022**. Подразделения голоцена по новой международной стратиграфической шкале и схема Блитта–Сернандера. В кн: Субетто Д.А. (ред.) *Динамика экосистем в голоцене*: сб. ст. СПб: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, с. 359–363. EDN: UOJVFT
77. Stebich M., Rehfeld K., Schlütz F., Tarasov P.E., Liu J., Mingram J. **2015**. Holocene vegetation and climate dynamic of NE China based on the pollen record from Sihailongwan Maar Lake. *Quaternary Science Reviews*, 124: 275–289. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.07.021>
78. Katsuki K., Yang D.Y., Seto K., Yasuhara M., Takata H., Otsuka M., Nakanishi T., Yoon Y., Um I.K., Cheung R.C.W., Khim B.K., Kashima K. **2016**. Factors controlling typhoons and storm rain on the Korean Peninsula during the Little Ice Age. *J. Paleolimnology*, 55: 35–48. <https://doi.org/10.1007/s10933-015-9861-3>
79. Бышев В.И., Нейман В.Г., Пономарев В.И., Романов Ю.А., Серых И.В., Цурикова Т.В. **2014**. Роль глобальной атмосферной осцилляции в формировании климатических аномалий Дальневосточного региона России. *Доклады АН*, 458(1): 92–96. <https://doi.org/10.7868/S0869565214250148>; EDN: SJDPTZ
80. Разжигаева Н.Г., Гребенникова Т.А., Ганзей Л.А., Пономарев В.И., Харламов А.А. **2022**. Отклик озерной экосистемы Малой Курильской гряды на палеоклиматические и сейсмические события. *Геофизические процессы и биосфера*, 21(4): 53–73. <https://doi.org/10.21455/GPB2022.4-4>
81. Прушковская И.А. **2022**. *Изменение палеосреды залива Петра Великого Японского моря в позднем голоцене (на основе изучения кремнистых микроводорослей)*: автореф. дисс. ... канд. геол.-минер. наук. Тихоокеан. океанол. ин-т им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток.

References

1. Korotkii A.M., Grebennikova T.A., Pushkar' V.S., Razzhigaeva N.G., Volkov V.G., Ganzei L.A., Mokhova L.M., Bazarova V.B., Makarova T.R. **1997**. [Climatic changes of the territory of Southern Far East in the Late Pleistocene – Holocene]. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 3: 121–143. (In Russ.).
2. Korotky A.M. **2002**. Palynological characteristics and radiocarbon data of Late Quaternary deposits of the Russian Far East (Lower Amur valley, Primor'ye, Sakhalin Island, Kuril Islands). In: Anderson P.M., Lozhkin A.V. (eds.) *Late Quaternary vegetation and climate of Siberia and the Russian Far East (Palynological and radiocarbon database)*. Magadan: SVNTs DVO RAN [NESC FEB RAS], p. 257–369. (In Russ.).
3. Mikishin Yu.A., Petrenko T.I., Gvozdeva I.G., Popov A.N., Kuz'min Ya.V., Rakov V.A., Gorbarenko S.A. **2008**. Holocene of South-Western Primorye coast]. *Nauchnoe obozrenie = Scientific Review*, 1: 8–27. (In Russ.). EDN: PWPORL
4. Mikishin Yu.A., Petrenko T.I., Gvozdeva I.G. **2019**. Late phase of Atlantic period of the Holocene in Southern Primorye (Russian Far East). *Uspekhi sovremenogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*, 12: 96–107. (In Russ.).
5. Belyanin P.S., Anderson P.M., Lozhkin A.V., Belyanina N.I., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Gornov D.A. **2019**. Vegetation changes in the south of the Russian Far East in the Middle and Late Holocene. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 2: 69–84. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019269-84>
6. Lyashchevskaya M.S. **2015**. Dynamics of vegetation of the islands of Peter the Great Bay. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 3: 143–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2015-3-121-128>
7. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Chakov V.V., Kopoteva T.A., Klimin M.A., Simonova G.V. **2023**. Global cooling events of the Late Holocene preserved in the coastal sediments in the southern Far East of Russia. *Geomorphology and Paleogeography*, 54(1): 112–130. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178923010115>; EDN: QQNMTF

8. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Lyashevskaya M.S., Makarova T.R., Kudryavtseva E.P., Grebennikova T.A., Panichev A.M., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Petrov A.Yu., Malkov S.S. **2019**. Climatic and human impacts on landscape development of the Murav'ev Amursky Peninsula (Russian South Far East) in the Middle/Late Holocene and historical time. *Quaternary International*, 516: 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.12.007>
9. Subetto D.A. **2009**. [*Bottom sediments of the lakes: paleolimnological reconstructions*]. SPb.: Izd-vo RGPU A.I. Gertsena, 343 p. (In Russ.). EDN: QKIZRX
10. Subetto D.A., Sapelko T.V., Stolba V.F., Kuznetsov D.D., Ludikova A.V., Neustrueva I.Yu. **2023**. Paleolimnology of lakes of western Crimea. *Doklady Earth Sciences*, 510(1): 329–334. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23600184>
11. Nazarova L.B., Razjigaeva N.G., Diekmann B., Grebennikova T.A., Ganzey L.A., Belyanina N.I., Arslanov K.A., Kaistrenko V.M., Gorbunov A.O., Kharlamov A.A., Golovatyuk L.G., Syrykh L.S., Subetto D.A., Lisitsyn A.P. **2019**. Reconstruction of Holocene environmental changes in North-Western Pacific in relation to paleorecord from Shikotan Island. *Doklady Earth Sciences*, 486(1): 494–497. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19050143>
12. Lozhkin A.V., Anderson P.M., Brown T.A., Grebennikova T.A., Korzun J.A., Tsigankova V.I. **2021**. Lake development and vegetation history in coastal Primor'ye: implications for Holocene climate of the southeastern Russian Far East. *Boreas*, 50(4): 983–997. <https://doi.org/10.1111/bor.12477>
13. Mikishin Yu.A., Gvozdeva I.G. **2014**. Mid to Late Holocene of Russkyi Island (southern Primorye). *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 3: 516–522. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/fr.33706>
14. Anderson P.M., Belyanin P.S., Belyanina N.I., Lozhkin A.V. **2017**. Evolution of the vegetation cover of Peter the Great Bay western coast in the Late Pleistocene – Holocene. *Russian Journal of Pacific Geology*. 36(4): 99–108. (In Russ.).
15. Lyashchevskaya M.S., Ganzei K.S., Makarova T.R. **2017**. Paleogeographical reconstruction for Stenina Island (Sea of Japan) during Middle-Late Holocene. *Biodiversity and Environment of Far East Reserves*, 2(11): 3–20. (In Russ.).
16. Lyashchevskaya M.S., Bazarova V.B., Makarova T.R. **2023**. [Environment development and the evolution of Gniloe Lake (south-eastern Primorye) during the last 3300 years]. *Geomorphology and Paleogeography*, 54(3): 108–123. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178923030064>
17. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Makarova T.R., Kornushenko T.V., Kudryavtseva E.P., Ganzei K.S., Sudin V.V., Kharlamov A.A. **2020**. Paleolake of Shkot Island: natural archive of climatic and landscape changes. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2: 230–249. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/grtz.2020.4.2.230-249>
18. Razjigaeva N., Ganzey L., Grebennikova T., Kornushenko T., Ganzei K., Kudryavtseva E., Prokopets S. **2020**. Environmental changes and human impact on landscapes as recorded in lagoon-lacustrine sequences of Russky Island, South Far East. *J. of Asian Earth Sciences*, 197: 104386. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104386>
19. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Kopoteva T.A., Kudryavtseva E.P., Belyanin P.S., Panichev A.M., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Petrov A.Yu., Sudin V.V., Klimin M.A., Kornushenko T.V. **2021**. Holocene mountain landscape development and monsoon variation in the southernmost Russian Far East. *Boreas*, 50(4): 1043–1058. <https://doi.org/10.1111/bor.12545>
20. Bazarova V.B., Klimin M.A., Kopoteva T.A. **2018**. Holocene dynamics of the east-asian monsoon in the Lower Amur area. *Geography and Natural Resources*, 39(3): 239–247. <https://doi.org/10.1134/S1875372818030071>
21. Leipe C., Nakagawa T., Gotanda K., Müller S., Tarasov P. **2015**. Late Quaternary vegetation and climate dynamics at the northern limit of the East Asian summer monsoon and its regional and global-scale controls. *Quaternary Science Reviews*, 116: 57–71. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.012>
22. Razjigaeva N., Ganzey L., Grebennikova T., Ponomarev V. **2023**. “Cold-Dry” and “Cold-Wet” events in the Late Holocene, Southern Russian Far East. *Climate*, 11(4): 91. <https://doi.org/10.3390/cli11040091>
23. Li C., Wu Ya., Hou X. **2011**. Holocene vegetation and climate in Northeast China revealed from Jingbo Lake sediment. *Quaternary International*, 229(1–2): 67–73. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.12.015>
24. Chen R., Shen J., Li C., Zhang E., Sun W., Ji M. **2015**. Mid- to late-Holocene East Asian summer monsoon variability recorded in lacustrine sediments from Jingpo Lake, Northeastern China. *Holocene*, 25: 454–468. (First online 2014). <https://doi.org/10.1177/0959683614561888>
25. Kong G.S., Kim K.-O., Kim S.-P. **2013**. Characteristics of the East Asian summer monsoon in the South Sea of Korea during the Little Ice Age. *Quaternary International*, 286: 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.07.022>
26. Leipe C., Müller S., Hille K., Kato H., Kobe F., Schmidt M., Seyffert K., Spengler III R., Wagner M., Weber A.W., Tarasov P. **2018**. Vegetation change and human impacts on Rebus Island. *Quaternary Science Reviews*, 193: 129–144. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.06.011>
27. Park J., Park Jinh., Yi S., Kim J.C., Lee E., Choi J. **2019**. Abrupt Holocene climate shifts in coastal East Asia, including the 8.2 ka, 4.2 ka, and 2.8 ka BP events, and societal responses on the Korean Peninsula. *Scientific Reports*, 9: 10806. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47264-8>
28. Park Jinh., Park Jung., Yi S., Lim J., Kim J.C., Jin Q., Choi J. **2021**. Holocene hydroclimate reconstruction based on pollen, XRF, and grain-size analysis and its

- implications for past societies of the Korean Peninsula. *The Holocene*, 31(9): 1489–1500. <https://doi.org/10.1177/09596836211019115>
29. Lim J., Um In-K., Yi S., Jun C.-P. **2022**. Hydroclimate change and its controlling factors during the middle to late Holocene and possible 3.7-ka climatic shift over East Asia. *Quaternary Research*, 109: 53–64. <https://doi.org/10.1017/qua.2022.13>
 30. Rasskazov S.V., Saranina E.V., Martynov Yu.A., Chashchin A.A., Maksimov S.O., Brandt I.S., Brandt S.B., Maslovskaya M.N., Kovalenko S.V. **2003**. Evolution of late Cenozoic magmatism at the active continental margin of southern Primorye. *Russian Journal of Pacific Geology*, 22(1): 92–109. (In Russ.). EDN: TUHYYP
 31. Gleser Z.I., Jouse A.P., Makarova I.V., Proshkina-Lavrenko A.I., Sheshukova-Poretskaya V.S. (eds) **1974**. [*Diatoms of the USSR. Fossil and recent*]. Vol. 1. Leningrad: Nauka, 403 p. (In Russ.).
 32. Pokrovskaya I.M. **1966**. [A technique of cameral works]. In: Pokrovskaya I.M. (ed.) In: *Paleopalynology*. Leningrad: Nedra, vol. 1: 32–61. (In Russ.).
 33. Reimer P., Austin W.E.N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Ramsey B.C., Butzin M., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T., Hogg A.G. **2020**. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 kcal BP). *Radiocarbon*, 62: 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
 34. Blaauw M., Christen J.A. **2011**. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*, 6: 457–474. <https://doi.org/10.1214/11-BA618>
 35. Vostretsov E.V. **2022**. [Peschany-1 site: from V.K. Arseniev to us]. *Trudy IIAE DVO RAN = Proceedings of the Institute of History, Archaeology and Ethnology of the FEB RAS*, 35: 7–33. (In Russ.). doi:10.24412/2658-5960-2022-35-7-33; EDN: WARMBO
 36. [Archaeological excavations on Peschany Peninsula, carried out by V.K. Arseniev in 1921]. **2020**. In: [Arseniev V.K. Full composition of writings]. Vladivostok: Rubezh, vol. 4, B. 1, p. 85–102.
 37. Khorev V.A. **1978**. [*Archaeological sites of Primorye*]. Vladivostok: Dal'nevostochnoe kn. izd-vo, 72 p.
 38. Kuzmin Ya.V., Burr G.S., Timothy Jull A.J. **2001**. Radiocarbon reservoir correction ages in the Peter the Great Gulf, Sea of Japan, and eastern coast of the Kunashir, Southern Kuriles (Northwestern Pacific). *Radiocarbon*, 43(2A): 477–481. <https://doi.org/10.1017/s0033822200038364>
 39. Grebennikova T., Razjigaeva N., Ganzey L., Ganzei K., Arslanov Kh., Maksimov F., Petrov A., Kharlamov A. **2020**. Evolution of a paleolake on Russian Island (Sea of Japan) in middle-late Holocene: record of sea-level oscillations, extreme storms and tsunami. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science: The 5th International Conference "Ecosystem dynamics in the Holocene"*, 438: 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/438/1/012009>
 40. Zenkovich V.P. **1962**. [*Basics of study of marine coast development*]. Moscow: AN SSSR, 710 p.
 41. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Kudryavtseva E.P., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Starikova A.A. **2018**. Landscape and environmental changes along the Eastern Primorye coast during the middle to late Holocene and human effects. *Journal of Asian Earth Sciences*, 158: 160–172. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.02.013>
 42. Likhacheva O.Yu., Pushkar' V.S., Cherepanova M.V., Pavlyutkin B.I. **2009**. Zonal diatom scale and the major geobiological events of Primorye Neogene. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 4: 64–72. (In Russ.). EDN: LATAJZ
 43. Avramenko A.S., Cherepanova M.V., Pushkar' V.S., Yarusova S.B. **2015**. Diatom characteristics of the Far East siliceous organogenic deposits. *Russian Geology and Geophysics*, 56(6): 947–958. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.05.010>
 44. Dam (van) H., Mertens A., Sinkeldam J. **1994**. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from The Netherland. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, 28: 117–133. <https://doi.org/10.1007/bf02334251>
 45. Fukumoto Y., Kashima K., Orkhonselenge A., Ganzorig U. **2012**. Holocene environmental changes in northern Mongolia inferred from diatom and pollen records of peat sediment. *Quaternary International*, 254: 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.10.014>
 46. Kharitonov V.G. **2010**. [*Summary of the diatom flora (Bacillariophyceae) of the Northern coast of the Okhotsk Sea*]. Magadan: SVNTs DVO RAN [NESC FEB RAS], 189 p. (In Russ.).
 47. Liu Y., Wang Q., Fu Ch. **2011**. Taxonomy and distribution of diatoms in the genus *Eunotia* from the Da'erbin Lake and Surrounding Bogs in the Great Xing'an Mountains, China. *Nova Hedwigia*, 92(1–2): 205–232. <https://doi.org/10.1127/0029-5035/2011/0092-0205>
 48. Krammer K., Lange-Bertalot H. **1991**. *Bacillariophyceae*. Teil 3: *Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 576 p.
 49. Fazlutdinova A., Gabidullin Y., Allaguvatova R., Gaysina L. **2020**. Diatoms in Kamchatka's Hot Spring Soil. *Diversity*, 12(11): 435. <https://doi.org/10.3390/d12110435>
 50. You Q., Liu Y., Wang Y., Wang Q. **2009**. Taxonomy and distribution of diatoms in the genera *Epithemia* and *Rhopalodia* from the Xinjiang Uygur Autonomous Region, China. *Nova Hedwigia*, 89(3–4): 397–430. <https://doi.org/10.1127/0029-5035/2009/0089-0397>
 51. Krammer K., Lange-Bertalot H. **1986**. *Bacillariophyceae*. Teil 1: *Naviculaceae*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 876 p. (Ettl H. et al. (eds) Süßwasserflora von Mitteleuropa; 2).
 52. Ncsje A., Aa A.R., Kvarnme M., Sønstegeard E. **1994**. A record of late Holocene avalanche activity in Frudalen, Sogndalsdalen, western Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 74: 71–76.

53. Kopoteva T.A., Kuptsova V.A. **2011**. Fire in water-logged open larch forests in the Amur R. area. *Vestnik SVNTc DVO RAN = Bulletin of the NESCFEB RAS*, 3: 37–41. (In Russ.). EDN: NXSVYP
54. Kudryavtseva E.P., Bazarova V.B., Lyashchevskaya M.C., Mokhova L.M. **2018**. Common ragweed (*Ambrosia artemisifolia*): the present-day distribution and the presence in the Holocene deposits of Primorsky krai (south of the Russian Far East). *Komarovskie Chteniya*, 66: 125–146. (In Russ.). <https://doi.org/10.25221/kl.66.5>
55. Sergusheva E.A. **2007**. Early agriculture in Primorye. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 3: 116–120. (In Russ.). EDN: LASZMX
56. Vostretsov Yu.E. **2009**. First cultivators in the coast of the Peter the Great Bay. *Vestnik NGU. Seriya Istoriya, filologiya*, 8(3): 113–120. EDN: KWCPAP
57. Chen X.-Y., Blockley S.P.E., Tarasov P.E., Xu Y.-G., McLean D., Tomlinson E.L., Albert P.G., Liu J.-Q., Müller S., Wagner M., Menzies M.A. **2016**. Clarifying the distal to proximal tephrochronology of the Millennium (B-Tm) eruption, Changbaishan Volcano, northeast China. *Quaternary Geochronology*, 33: 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2016.02.003>
58. Akulichev V.A., Astakhov A.S., Malakhov M.I., Ak-sentov K.I., Karabtsov A.A., Mar'yash A.A., Alatortsev A.V. **2016**. The first discovery of cryptotephra of the catastrophic eruptions of the Baitoushan volcano in the tenth century A.D. in the shelf deposits of the Sea of Japan. *Doklady Earth Sciences*, 469(2): 887–891. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16080201>
59. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Petrov A.Yu., Sakhno V.G. **2020**. B-Tm ash of a catastrophic eruption of Baitoushan Volcano in terrestrial deposits of Primorye as an age marker of the Medieval Warm Period in the Holocene. *Doklady Earth Sciences*, 494(2): 779–786. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20100116>
60. Sakhno V.G. **2007**. Chronology of eruptions, composition, and magmatic evolution of the Paektusan Volcano: evidence from K-Ar, $^{87}\text{SR}/^{86}\text{SR}$, and $\delta^{18}\text{O}$ isotope data. *Doklady Earth Sciences*, 412(1): 22–28. doi:10.1134/S1028334X07010060
61. Krammer K., Lange-Bertalot H. **1988**. *Bacillariaceae. Teil 2: Epithemiaceae, Surirellaceae*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 536 p.
62. Wanner H., Solomina O., Grosjean M., Ritz S.P., Jettel M. **2011**. Structure and origin of Holocene cold events. *Quaternary Science Review*, 30: 3109–3123. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.07.010>
63. Constantine M., Kim M., Park J. **2019**. Mid- to late Holocene cooling events in the Korean Peninsula and their possible impact on ancient societies. *Quaternary Research*, 92(1): 98–108. <https://doi.org/10.1017/qua.2018.132>
64. Selvaraj K., Chen C.T.A., Lou J.-Y. **2007**. Holocene East Asian monsoon variability: Links to solar and tropical Pacific forcing. *Geophysical Research Letters*, 34: L01703. <https://doi.org/10.1029/2006GL028155>
65. Steinhilber F., Beer J., Fröhlich C. **2009**. Total solar irradiance during the Holocene. *Geophysics Research Letters*, 36(19): L19704. <https://doi.org/10.1029/2009GL040142>
66. Sun Y., Oppo D.W., Xiang R., Liu W., Gao S. **2005**. Last deglaciation in the Okinawa Trough: Subtropical northwest Pacific link to Northern Hemisphere and tropical climate. *Paleoceanography*, 20(4): PA4005. <https://doi.org/10.1029/2004PA001061>
67. Ruan J., Xu Y., Ding S., Wang Y., Zhang X.A. **2015**. A high resolution record of sea surface temperature in southern Okinawa Trough for the past 15,000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 426: 209–215. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.03.007>
68. Stott L., Cannariato K., Thunell R., Haug G.H., Koutavas A., Lund S. **2004**. Decline of surface temperature and salinity in the western tropical Pacific Ocean in the Holocene epoch. *Nature*, 431: 56–59. <https://doi.org/10.1038/nature02903>
69. Moy C.M., Seltzer G., Rodbell D.T., Anderson D.M. **2002**. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch. *Nature*, 420(6912): 162–165. <https://doi.org/10.1038/nature01194>
70. Lee H., Lee J.-Y., Lim J. **2021**. Holocene hydrologic fluctuations on the southern coast of Korea and their link to ENSO activity. *Geosciences Journal*, 26(1): 129–140. <https://doi.org/10.1007/s12303-021-0020-8>
71. Woodruff J.D., Donnelly J.P., Okusu A. **2009**. Exploring typhoon variability over the mid-to-late Holocene: evidence of extreme coastal flooding from Kamikoshiki, Japan. *Quaternary Science Reviews*, 28(17–18): 1774–1785. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.02.005>
72. Schmidt M., Leipe Ch., Becker F., Goslar T., Hoelzmann Ph., Mingram J., Müller S., Tjallingii R., Wagner M., Tarasov P.E. **2019**. A multi-proxy palaeolimnological record of the last 16,600 years from coastal Lake Kushu in northern Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 514: 613–626. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.11.010>
73. Solomina O.N., Bradley R.S., Hodgson D.A., Ivy-Ochs S., Jomelli V., Mackintosh A.N., Nesje A., Owen L.A., Wanner H., Wiles G.C., Young N.E. **2015**. Holocene glacier fluctuations. *Quaternary Science Reviews*, 111: 9–34. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.11.018>
74. Jian Z.M., Wang P., Saito Y., Wang J.L., Pflaumann U., Oba T., Cheng X.R. **2000**. Holocene variability of the Kuroshio Current in the Okinawa Trough, northwestern Pacific Ocean. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 184(1): 305–319. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00321-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00321-6)
75. Walker M., Head M.J., Lowe J., Berkelhammer M., Björck S., Cheng H., Cwynar L.C., Fisher D., Gkinis V., Long A., Newnham R., Rasmussens S., Weiss H. **2019**. Subdividing the Holocene Series/Epoch: formalization of stages/ages and subseries/subepochs, and designation of GSSPs and auxiliary stratotypes. *Journal of Quaternary Science*, 34(3): 173–186. <https://doi.org/10.1002/jqs.3097>

76. Sapelko T.V. **2022**. Holocene subdivisions according to the new international stratigraphic scale and the Blitt-Sernander scheme. In: Subetto D.A. (ed.) [*Dynamic of ecosystems in Holocene*]. Saint Petersburg: Izd-vo RGPU A.I. Gertsena, p. 359–363.
77. Stebich M., Rehfeld K., Schlütz F., Tarasov P.E., Liu J., Mingram J. **2015**. Holocene vegetation and climate dynamic of NE China based on the pollen record from Sihailongwan Maar Lake. *Quaternary Science Reviews*, 124: 275–289. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.07.021>
78. Katsuki K., Yang D.Y., Seto K., Yasuhara M., Takata H., Otsuka M., Nakanishi T., Yoon Y., Um I.K., Cheung R.C.W., Khim B.K., Kashima K. **2016**. Factors controlling typhoons and storm rain on the Korean Peninsula during the Little Ice Age. *Journal Paleolimnology*, 55: 35–48. <https://doi.org/10.1007/s10933-015-9861-3>
79. Byshev V.I., Neiman V.G., Ponomarev V.I., Romanov Y.A., Serykh I.V., Tsurikova T.V. **2014**. The influence of global atmospheric oscillation on formation of climate anomalies in the Russian Far East. *Doklady Earth Sciences*, 458(1): 1116–1120. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14090025>
80. Razzhigayeva N.G., Grebennikova T.A., Ganzey L.A., Ponomarev V.I., Kharlamov A.A. **2022**. Response of the lake ecosystem of the Lesser Kuril Ridge to paleoclimatic and seismic events. *Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, 58(11): 1377–1397. <https://doi.org/10.1134/S0001433822110068>
81. Prushkovskaya I.A. **2022**. [*Change of paleoenvironments of Peter the Great Bay of the Sea of Japan in Late Holocene (on the base of siliceous microalgae studying)*]: extended abstract ... Cand. Sci. (Geology and Mineralogy). V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the FEB RAS, Vladivostok.

Об авторах

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

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

Гребенникова Татьяна Афанасьевна (<https://orcid.org/0000-0002-5805-391X>), кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории палеогеографии и геоморфологии, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, tagrebennikova@mail.ru

Мохова Людмила Михайловна (<https://orcid.org/0000-0003-0396-4756>), научный сотрудник лаборатории палеогеографии и геоморфологии, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, tigpaleo@mail.ru

Арсланов Хикматулла Адиевич (<https://orcid.org/0000-0002-2302-8175>), доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана, Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, arslanovkh@mail.ru

Поступила 07.08.2023

Принята к публикации 02.10.2023

About the Authors

Razzhigayeva, Nadezhda G. (<https://orcid.org/0000-0001-7936-1797>), Doctor of Geography, Principal Researcher, Laboratory of paleogeography and geomorphology, Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, nadyar@tigdvo.ru

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

Grebennikova, Tatiana A. (<https://orcid.org/0000-0002-5805-391X>), Cand. Sci. (Geography), Leading Researcher, Laboratory of paleogeography and geomorphology, Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, tagrebennikova@mail.ru

Mokhova, Ludmila M. (<https://orcid.org/0000-0003-0396-4756>), Researcher, Laboratory of paleogeography and geomorphology, Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, tigpaleo@mail.ru

Arslanov, Khikmatulla A. (<https://orcid.org/0000-0002-2302-8175>), Doctor Sci. (Geol. and Miner.), Leading Researcher, Laboratory of paleogeography and geomorphology of polar countries and the World Ocean, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, Saint Petersburg, arslanovkh@mail.ru

Received 7 August 2023

Accepted 2 October 2023

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



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

УДК 550.34+539.42

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.405-418>
<https://www.elibrary.ru/bpomeb>

Синхронизация мультифрактальных свойств непрерывной акустической эмиссии при подготовке и реализации подвижки по модельному разлому

И. А. Пантелеев¹, В. И. Окунев², В. А. Новиков²

@E-mail: pia@icmm.ru

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

² Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

Резюме. Согласно модели прерывистого скольжения, относительное движение берегов разлома представляет собой акт неустойчивого проскальзывания, при котором движение начинается после достижения напряжениями, касательными к плоскости разлома, определенного предела. Физический механизм динамического проскальзывания по разлому заключается в последовательном формировании в зоне контакта конгломератов нагруженных частиц (силовых цепочек) и последующем их разрушении. Данные цепочки в совокупности формируют силовой скелет, характеризующийся определенной пространственной структурой и прочностными характеристиками. Повышение сдвигового напряжения на берегах разлома приводит к локальным разрушениям силового скелета, дальнейшая эволюция системы выводит процессы деструкции на более высокие пространственные уровни, что в результате приводит к сдвигу берегов разлома. Так как развитие процесса деструкции силовых цепочек в контактной зоне разлома по иерархии масштабов снизу-вверх подобно развитию трещинообразования в нагруженной среде от микромасштаба до макромасштаба (масштаба образца), авторами была высказана гипотеза о когерентном поведении акустических шумов, сопровождающих подготовку динамического проскальзывания и регистрируемых в различных областях зоны разлома. Настоящая работа посвящена проверке данной гипотезы в лабораторном масштабе на установке, имитирующей подвижку по разлому. В результате проведенного анализа подтверждена гипотеза о синхронизации статистических свойств акустической эмиссии при подготовке и реализации динамической подвижки. Показано, что наблюдение (выявление) эффекта синхронизации статистических свойств акустической эмиссии зависит как от набора параметров, для которых рассчитывается спектральная мера когерентности, так и от места регистрации исходных данных.

Ключевые слова: модельный разлом, акустическая эмиссия, синхронизация, мультифрактальные свойства

Synchronization of multifractal properties of continuous acoustic emission during the preparation and implementation of dynamic slip in model fault

Ivan A. Panteleev¹, Vladimir I. Okunev², Victor A. Novikov²

@E-mail: pia@icmm.ru

¹ Institute of Continuous Media Mechanics, UB RAS, Perm, Russia

² Joint Institute of High Temperatures, RAS, Moscow, Russia

Abstract. According to the stick-slip model, the relative movement of the fault planes is an act of unstable sliding, where movement begins when the stresses tangential to the fault plane reach a certain limit. The physical mechanism of dynamic slip along a fault consists of the sequential formation of conglomerates of loaded particles (force chains) in the contact zone and their subsequent destruction. These chains together form a force skeleton characterized by a specific spatial

structure and strength properties. An increase in shear stress on the fault banks leads to local destruction of the strength skeleton; further evolution of the system brings destruction processes to higher spatial levels, ultimately leading to a shift in the fault banks. Since the evolution of the process of destruction of force chains in the contact zone of a fault along the hierarchy of scales from bottom to top is similar to the evolution of crack formation in a loaded medium from microscale to macroscale (specimen scale), the authors hypothesized the coherent behavior of acoustic noise accompanying the preparation of dynamic slip and recorded in different areas of fault zones. This work is devoted to testing this hypothesis on a laboratory scale, using an installation that simulates movement along a fault. As a result of the analysis, the hypothesis about the synchronization of the statistical properties of the acoustic emission during the preparation and implementation of the dynamic movement was confirmed. It is shown that the observation (detection) of the effect of the synchronization of the statistical properties of acoustic emission depends both on the set of parameters for which the spectral coherence measure is calculated and on the location of the recording of the initial data.

Keywords: model fault, acoustic emission, synchronization, multifractal properties

Для цитирования: Пантелеев И.А., Окунев В.И., Новиков В.А. Синхронизация мультифрактальных свойств непрерывной акустической эмиссии при подготовке и реализации подвижки по модельному разлому. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 4, с. 405–418. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.405-418>; <https://www.elibrary.ru/bpomeb>

For citation: Panteleev I.A., Okunev V.I., Novikov V.A. Synchronization of multifractal properties of continuous acoustic emission during the preparation and implementation of dynamic slip in model fault. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 4, pp. 405–418. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.405-418>; <https://www.elibrary.ru/bpomeb>

Финансирование

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

Funding

The work has been made with the financial support of Russian Science Foundation (Grant No. 19-77-30008).

Введение

Изучение закономерностей развития разломных зон в кристаллическом фундаменте, стадийности подготовки и реализации подвижки по магистральному сместителю как потенциальному очагу землетрясения является актуальной задачей современной тектонофизики, механики разломных зон и физики очага [1–4]. Наиболее широко распространенным подходом к решению данного класса задач является лабораторный физический эксперимент, базирующийся, в частности, на моделях прерывистого скольжения («stick-slip») [5]. Наличие локальной ослабленной зоны, содержащей контактную поверхность, определяет единственно возможный механизм деформирования такой системы – смещение по контакту. Согласно модели прерывистого скольжения, движение в очаге представляет собой акт неустойчивого проскальзывания, при котором движение начинается после достижения напряжениями, касательными к плоскости разлома, определенного предела. Жесткость ослабленной зоны и свойства заполнителя контакта определяют возможные режимы скольжения по контакту [3, 6–8].

Ранее в работах [9–12] на основе анализа статистических свойств низкочастотного

микросейсмического шума в различных сейсмоактивных районах было показано, что подготовка крупных сейсмических событий сопровождается синхронизацией параметров такого шума на огромных пространственных областях. При этом физической причиной наблюдаемого когерентного поведения низкочастотных шумов является вовлечение в процесс подготовки (аккумуляции энергии) все большего количества разноранговых блоков земной коры [13, 14]. Аналогичные закономерности были обнаружены ранее в лабораторном масштабе при подготовке разрушения образцов различных структурно-неоднородных материалов [15–17], они легли в основу модели лавинно-неустойчивого трещинообразования [17–18]. Формирование очага будущего макроразрушения происходит ввиду роста плотности дефектов, их взаимодействия и последовательного укрупнения. Взаимодействие дефектов различных рангов в нагруженной среде является, по-видимому, возможной причиной синхронизации статистических свойств непрерывной акустической эмиссии (АЭ), обнаруженной при разрушении структурно-неоднородных материалов [19].

Согласно [20–21], физический механизм динамического проскальзывания по разлому

заключается в последовательном формировании в зоне контакта конгломератов нагруженных частиц (силовых цепочек) и последующем их разрушении. Данные цепочки в совокупности формируют силовой скелет, характеризующийся определенной пространственной структурой и прочностными характеристиками. Повышение сдвигового напряжения на берегах разлома приводит к локальным разрушениям силового скелета, дальнейшая эволюция системы выводит процессы деструкции на более высокие пространственные уровни, что в результате приводит к сдвигу берегов разлома.

Так как развитие процесса деструкции силовых цепочек в контактной зоне разлома по иерархии масштабов снизу-вверх подобно развитию трещинообразования в нагруженной среде от микро- до макромасштаба (масштаба образца), авторами была высказана гипотеза о когерентном поведении акустических шумов, сопровождающих подготовку динамического проскальзывания берегов модельного разлома (в модели «stick-slip») и регистрируемых в его различных областях. Настоящая работа посвящена проверке данной гипотезы в лабораторном масштабе на установке, имитирующей подвижку по разлому, с *in situ* регистрацией акустической эмиссии на подвижном блоке и неподвижном основании.

1. Методика проведения эксперимента

Установка, на которой проводились эксперименты по моделированию прерывистого скольжения, является модификацией слайд-модели [5, 22]. Модель представляет собой систему из бетонного блока, нагруженного постоянным нормальным усилием и движущегося по горизонтальному стеклянному основанию под действием сдвигового усилия, приложенного через пружину жесткостью $K = 16.57$ Н/мм. В начале опыта система находилась в покое, далее конец пружины двигался при помощи электропривода с постоянной скоростью 10 мкм/с в течение всего эксперимента. Между блоком и подложкой располагался слой заполнителя (просеянного высушенного речного песка) толщиной около 3 мм. Масса блока состав-

ляла 200 кг, а площадь контакта $S = 0.0256$ м². В ходе проведения опыта контролировались зависимости сдвигового усилия (датчик усилия УММА-К200, точность измерения 0.01 кгс) и перемещения блока (датчик СТЕ-3000, точность измерения 0.1 мм) от времени.

Для регистрации акустической эмиссии при проскальзывании бетонного блока была использована восьмиканальная система Amsy-6 Vallon (Германия) с предусилителями АЕР4 (коэффициент усиления 34дБ) и преобразователями акустической эмиссии двух типов. Для регистрации сигналов акустической эмиссии на подвижном блоке (на боковой поверхности) использовались три широкополосных преобразователя 2SMEG-P (Deci, США), работающих в диапазоне 200–2000 кГц (каналы № 1, 2, 6). Для регистрации акустической эмиссии на неподвижном основании были использованы миниатюрные преобразователи М-31 (Fujisera, Япония) с плоской амплитудно-частотной характеристикой в интервале 300–800 кГц (каналы № 3, 4, 8). Датчики размещались под слоем песка, чтобы вся область возможного расположения источников акустической эмиссии имела одинаковые условия для распространения упругих волн. Преобразователи акустической эмиссии крепились и на блоке, и на основании при помощи цианакрилатного клея. Схема расположения датчиков АЭ представлена на рис. 1.

Запись волновых форм акустической эмиссии по всем шести каналам в течение эксперимента осуществлялась в непрерывном беспороговом режиме с частотой дискретизации 2.5 МГц. До начала эксперимента система была проверена на отсутствие электромагнитных наводок при включенном приводе и системе измерения усилия и перемещения.

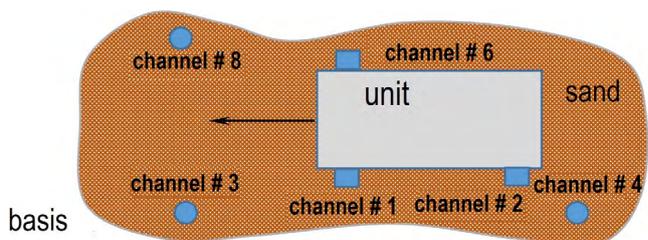


Рис. 1. Схема расположения датчиков акустической эмиссии.
Fig. 1. Layout of acoustic emission sensors.

2. Статистические свойства и методы анализа данных акустической эмиссии

Основываясь на результатах анализа геофизических полей различной природы при мониторинге подготовки крупных сейсмических событий [12], авторами была принята гипотеза о том, что коррелированное поведение сигналов акустической эмиссии должно проявляться не в целом для всего регистрируемого волнового поля, а на определенных частотах, связанных с характерными масштабами исследуемого процесса. При этом для избавления от отрицательного влияния размерного (масштабного) эффекта, характеристик используемой аппаратуры и измерительного тракта, необходимо перейти от поиска корреляций в исходных данных к поиску синхронного, коррелированного поведения параметров, описывающих статистические свойства исходных сигналов. В качестве статистических свойств сигналов акустической эмиссии были выбраны параметры их мультифрактальных спектров: ширина спектра ΔH и величина носителя спектра сингулярности H_{max} , реализующего его максимум.

Мультифрактальный анализ в настоящее время является широко используемым инструментом для исследований временной и пространственной динамики систем различной сложности [23–30]. Во многих отраслях знаний показано, что деградация динамики сложной эволюционирующей системы в поле внешних воздействий от мультифрактальной к монофрактальной отражает потерю этой системой инструментов адаптации и сокращение количества каналов диссипации «закачиваемой» в нее энергии. Для построения мультифрактального спектра временных сигналов акустической эмиссии был использован алгоритм MF-DFA (мультифрактальный метод на основе анализа флуктуаций анализируемых данных с исключенным наклоном), который, в отличие от методов, использующих быстрое преобразование Фурье и вейвлет-преобразование, является прямым методом построения частичных функций. Подробный алгоритм расчета мультифрактального спектра сигнала можно найти, например, в [19].

Для исследования степени коррелированности временных рядов параметров мультифрактального спектра сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных на подвижном блоке и неподвижном основании, использовалась частотно-зависимая мера когерентного поведения компонент многомерных временных рядов, введенная в работах А.А. Любушина [31–32]. Спектральная мера когерентности $k(t, \nu)$ строится как произведение модулей покомпонентных канонических когерентностей

$$k(t, \nu) = \prod_{j=1}^m |\mu_j(t, \nu)|, \quad (1)$$

где $m \geq 2$ – общее число совместно анализируемых временных рядов (размерность многомерного временного ряда), ν – частота, t – временная координата правого конца скользящего временного окна, состоящего из определенного числа смежных отсчетов, $\mu_j(t, \nu)$ – каноническая когерентность j -го скалярного временного ряда, которая описывает силу связанности этого ряда со всеми прочими рядами. Величина $|\mu_j(t, \nu)|^2$ является обобщением традиционного квадратичного спектра когерентности между двумя сигналами на случай, когда второй сигнал является не скалярным, а векторным. Выполняется неравенство $0 \leq |\mu_j(t, \nu)| \leq 1$, и чем ближе значение $|\mu_j(t, \nu)|$ к единице, тем сильнее линейно связаны вариации на частоте ν во временном окне с координатой t -го ряда с аналогичными вариациями во всех прочих рядах. Соответственно, величина $0 \leq k(t, \nu) \leq 1$, в силу своего построения, описывает эффект совокупного когерентного (синхронного, коллективного) поведения всех сигналов.

Частотно-зависимые канонические когерентности $\mu_j(\nu)$ для временного многомерного ряда заданного размера (фиксированного размера временного окна) определяются как

$$\mu_j^2(\nu) = S_j^H(\nu) \left(S^{(j)}(\nu) \right)^{-1} S_j(\nu) / P_j(\nu), \quad (2)$$

где $S^{(j)}(\nu)$ – эрмитова матрица размером $(m-1) \times (m-1)$, которая получается из полной спектральной матрицы $S(\nu)$ размером $m \times m$ многомерного временного ряда путем удаления i -го столбца и j -й строки; $S_j(\nu)$ – $(m-1)$ -мерный вектор, состоящий из кросс-спектров между j -й компонентой временного ряда и всеми

прочими компонентами. Вектор $S_j(v)$ состоит из элементов i -го столбца полной спектральной матрицы $S(v)$, за исключением элемента в j -й строке, $S_j^H(v)$ – эрмитово сопряжение вектора $S_j(v)$. Наконец, $P_j(v)$ является спектром мощности j -й компоненты многомерного временного ряда, т.е. j -м элементом на главной диагонали полной спектральной матрицы $S(v)$. Поскольку матрица $S_j(v)$ является эрмитовой и положительно-определенной, то квадратичная форма $S_j^H(v) \left(S^{(j)}(v) \right)^{-1} S_j(v)$ вещественна и неотрицательна. Несомненным преимуществом этого подхода является отсутствие ограничений на количество анализируемых одновременно рядов и их размер.

3. Результаты эксперимента

На рис. 2 представлено изменение с течением времени усилия, прикладываемого к бетонному блоку. Видно, что динамическая подвижка блока сопровождается падением усилия на 2.3 кг. Характерные сигналы акустической эмиссии, зарегистрированные на неподвижном основании и подвижном блоке, приведены на рис. 3. Для вычисления статистических свойств каждый из записанных сиг-

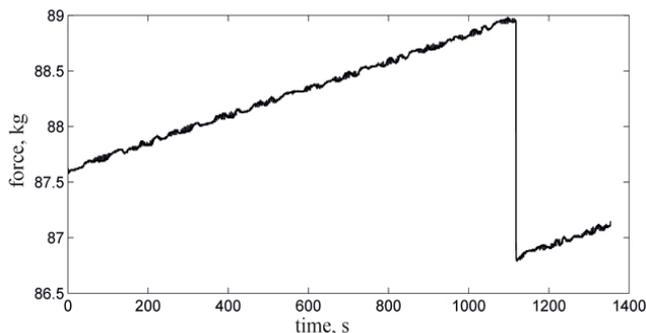
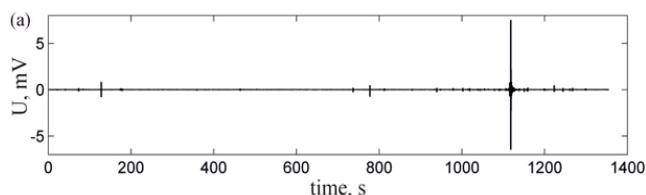


Рис. 2. Изменение усилия во временной окрестности динамической подвижки бетонного блока.

Fig. 2. Change in force in the temporary vicinity of the dynamic slip of a concrete block.



налов прореживался так, что итоговая частота дискретизации сократилась в 16 раз (с 2.5 МГц до 156.25 кГц). Необходимость уменьшения объема обрабатываемых данных, с одной стороны, определяется целесообразностью поиска корреляций на временах на порядки выше, чем время между двумя соседними отсчетами, а с другой стороны – необходимостью оптимизации затрат машинного времени.

Мультифрактальный спектр каждого из сигналов АЭ вычислялся в скользящем временном окне размером 104.85 мс, с шагом 52.425 мс. Эволюция параметров мультифрактального спектра по каждому из каналов с течением времени представлена на рисунках 4 и 5. Из анализа построенных зависимостей следует, что тенденции изменения ширины спектра подобны как для датчиков, установленных на блоке, так и для датчиков, установленных на основании. Во временной окрестности наблюдается увеличение ширины мультифрактального спектра для сигналов АЭ, зарегистрированных каждым из каналов. Иная ситуация наблюдается для носителя спектра, реализующего его максимум. Для данных АЭ с основания данный параметр резко возрастает при сбросе усилия, тогда как для данных АЭ с блока он уменьшается.

Величина спектральной меры когерентного поведения оценивалась в соответствии с соотношением (1) в скользящем временном окне трех различных размеров 13.4, 53 и 429.5 секунд с шагом в каждом случае 0.21 с. Различные размеры временного окна были взяты для поиска корреляций на больших (429.5 с), средних (53 с) и малых (13.4 с) временах.

Для оценки вариаций спектральной меры когерентного поведения временных рядов с течением времени могут быть рассмотрены различные комбинации рядов статистических свойств акустической эмиссии. Так, спектраль-

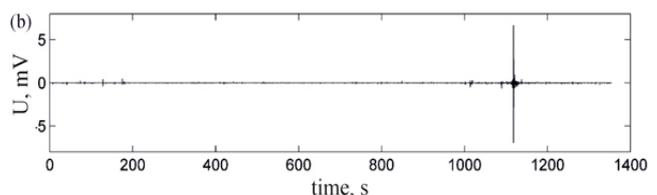


Рис. 3. Характерные сигналы акустической эмиссии, зарегистрированные на подвижном блоке (а) и неподвижном основании (б).

Fig. 3. Characteristic acoustic emission signals recorded on a moving block (a) and a fixed base (b).

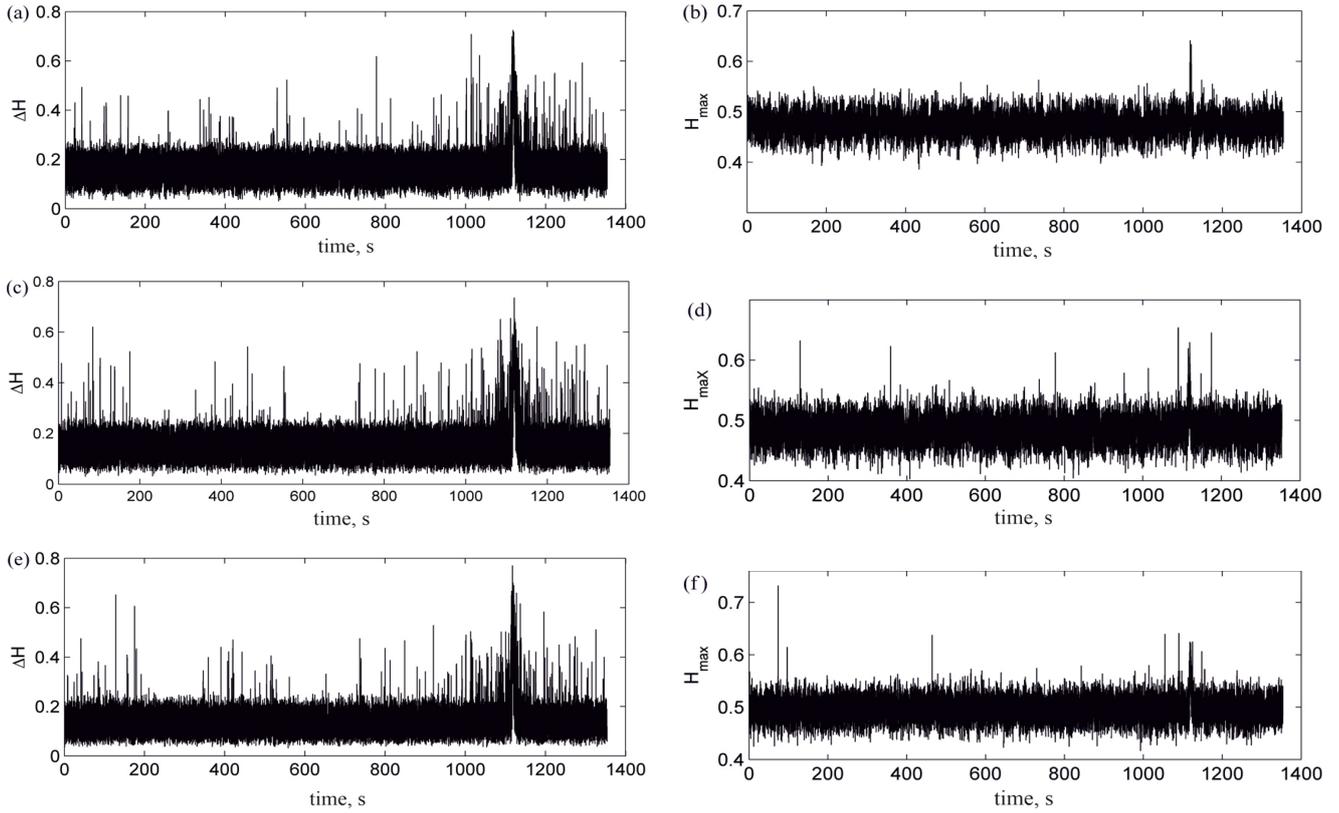


Рис. 4. Временная динамика ширины мультифрактального спектра (а, с, е) и носителя спектра, реализующая его максимум (b, d, f) для установленных на основании датчиков № 3 (а, b), № 4 (с, d) и № 8 (е, f).

Fig. 4. Time dynamics of the width of the multifractal spectrum (a, c, e) and the spectrum carrier, realizing its maximum (b, d, f) for sensors No. 3 (a, b), No. 4 (c, d) and installed on the base No. 8 (e, f).

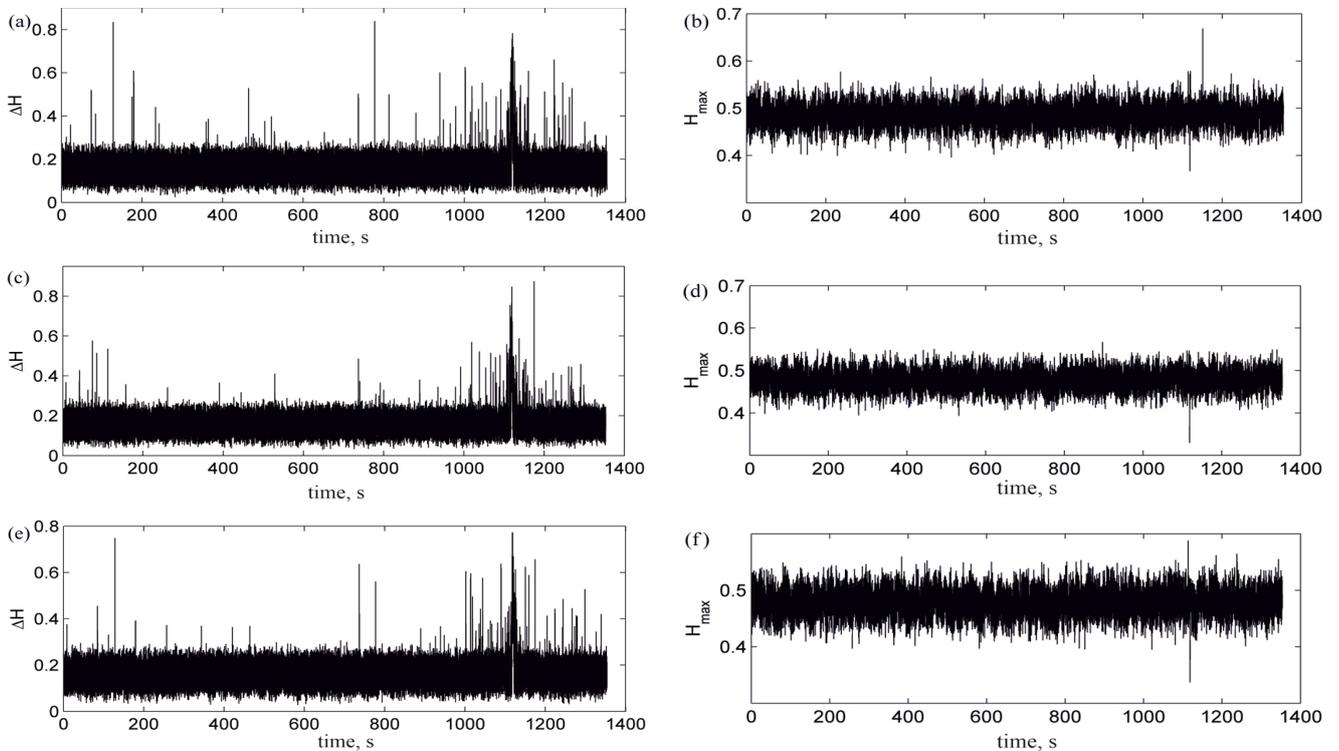


Рис. 5. Временная динамика ширины мультифрактального спектра (а, с, е) и носителя спектра, реализующая его максимум (b, d, f) для установленных на подвижном блоке датчиков № 1 (а, b), № 2 (с, d) и № 6 (е, f).

Fig. 5. Time dynamics of the width of the multifractal spectrum (a, c, e) and the spectrum carrier, realizing its maximum (b, d, f) for sensors No. 1 (a, b), No. 2 (c, d) and No. 6 (e, f) installed on the moving block.

ная мера может быть оценена отдельно для рядов каждого параметра мультифрактального спектра, для обоих параметров, для параметров сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных на основании и подвижном блоке или отдельно только на основании или только на блоке. В рамках данной работы была реализована многовариантная процедура расчета вариаций спектральной меры когерентного поведения временных рядов мультифрактальных свойств акустической эмиссии. Результаты были объединены в два блока.

3.1 Когерентное поведение параметров мультифрактального спектра после сброса усилия

В качестве первого шага в исследовании коррелированного изменения статистических свойств непрерывной акустической эмиссии при подготовке и реализации динамической подвижки были выявлены условия, при которых наблюдается коррелированное изменение статистических свойств акустической эмиссии с момента сброса усилия. Необходимо отметить, что критерием коррелированного поведения временных рядов статистических свойств акустической эмиссии являлось превышение в каком-либо интервале частот спектральной мерой когерентности $k(t, \nu)$ фоновых значений (на других частотах) более чем в 3 раза. Сводные данные представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что наиболее часто синхронизация временных рядов после сброса усилия наблюдается для ширины мультифрактального спектра сигналов акустической эмиссии независимо от места их регистрации. Только для сигналов, зарегистрированных на неподвижном основании, такая корреляция отсутствует. На рис. 6 представлена эволюция спектральной меры $k(t, \nu)$ когерентного поведения временных рядов ширины мультифрактального спектра акустической эмиссии, зарегистрированной на неподвижном основании и подвижном блоке, для среднего и большого временного окна. В обоих случаях после реализации динамической подвижки (сброса усилия) наблюдается коррелированное поведение указанных временных рядов в интервале

частот 1–2 Гц (величина спектральной меры на порядок превышает фоновый уровень). С некоторой задержкой повышенная корреляция сигналов также проявляется в интервале 3–4 Гц.

Наихудшая, с точки зрения обнаружения коррелированного поведения рядов статистических свойств непрерывной акустической эмиссии, ситуация наблюдается для данных параметра H_{max} . Когерентное поведение многомерных временных рядов этого параметра имеет место только для наибольшего временного окна (429.5 с) независимо от места регистрации сигналов акустической эмиссии (рис. 7). Необходимо отметить, что коррелированное поведение временных рядов в этом случае наблюдается также для двух интервалов частот, один из которых совпадает с обнаруженным для ширины спектра (1–2 Гц), а второй смещен в область более высоких частот (4–5 Гц).

На представленных рисунках эволюции спектральной меры когерентного поведения многомерных временных рядов параметров мультифрактального спектра акустической эмиссии видно, что частотные интервалы коррелированного поведения проявляются и до

Таблица 1. Сводные данные синхронизации временных рядов параметров мультифрактального спектра акустической эмиссии с момента сброса усилия

Table 1. Summary data for synchronization of time series of parameters of the acoustic emission multifractal spectrum from the moment of force release

Параметр спектра	Окно, секунды	Основание + блок	Основание	Блок
$\Delta H + H_{max}$	13.4	+	–	–
	53	+	+	+
	429.5	+	+	+
ΔH	13.4	+	–	+
	53	+	+	+
	429.5	+	+	+
H_{max}	13.4	–	–	–
	53	–	–	–
	429.5	+	+	+

Примечание. «+» – синхронное изменение выбранных временных рядов, «–» – отсутствие корреляции рядов на каких-либо частотах.

Note. “+” – synchronous change of selected time series, “–” – absence of correlation of series at any frequencies.

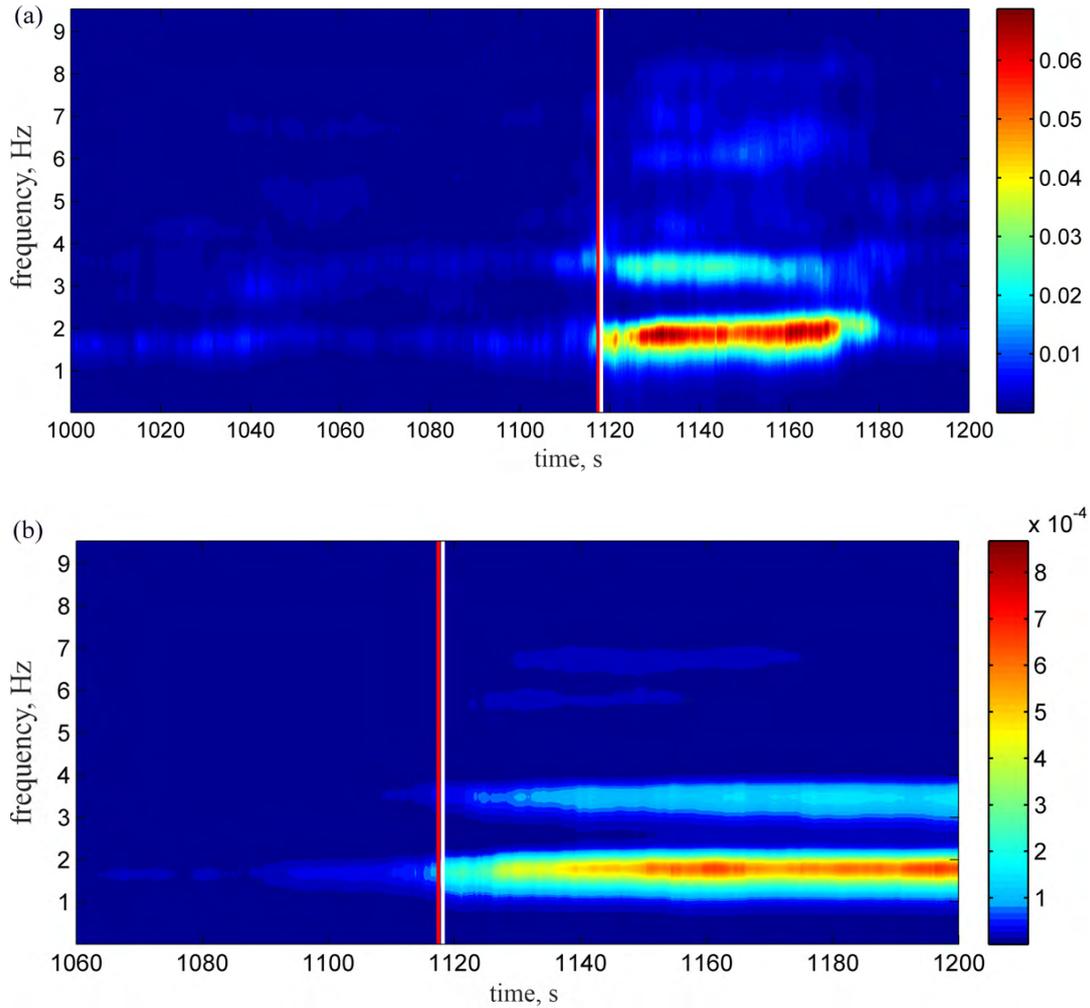


Рис. 6. Эволюция спектральной меры когерентного поведения многомерного временного ряда ширины мультифрактального спектра акустической эмиссии, зарегистрированной на основании и подвижном блоке для временного окна 53 (а) и 429.5 с (b)
Fig. 6. Evolution of the spectral measure of the coherent behavior of the multidimensional time series of the width of the acoustic emission multifractal spectrum recorded on the base and moving block for a time window of 53 (a) and 429.5 s (b).

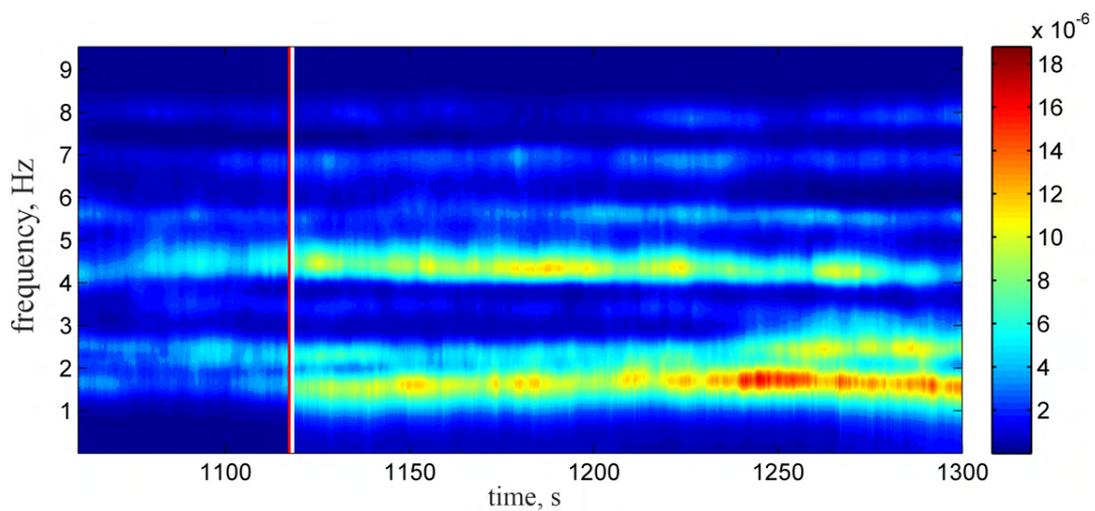


Рис. 7. Эволюция спектральной меры когерентного поведения многомерного временного ряда параметра H_{max} мультифрактального спектра акустической эмиссии, зарегистрированной на неподвижном основании и подвижном блоке, для временного окна 429.5 с.
Fig. 7. Evolution of the spectral measure of the coherent behavior of the multidimensional time series of the parameter of the acoustic emission multifractal spectrum recorded on a fixed base and a moving block, for a time window of 429.5 s.

реализации динамической подвижки. Однако превышение фоновой величины спектральной меры когерентного поведения незначительно и не может быть охарактеризовано как прогностический признак приближающегося динамического события.

3.2 Когерентное поведение параметров мультифрактального спектра до сброса усилия

Проведенный многовариантный расчет вариаций спектральной меры когерентного поведения временных рядов мультифрактальных свойств акустической эмиссии позволил выявить условия, при которых обнаруживается коррелированное поведение временных рядов перед наступлением динамической подвижки. Сводные результаты приведены в табл. 2.

В отличие от предыдущего случая, когерентное изменение временных рядов мульти-

Таблица 2. Сводные данные синхронизации временных рядов параметров мультифрактального спектра акустической эмиссии до динамической подвижки

Table 2. Summary data of synchronization of time series of parameters of the multifractal spectrum of acoustic emission before dynamic movement

Параметр спектра	Окно, секунды	Основание + блок	Основание	Блок
$\Delta H + H_{max}$	13.4	–	–	–
	53	–	–	–
	429.5	–	–	–
ΔH	13.4	–	+	–
	53	–	+	–
	429.5	–	–	–
H_{max}	13.4	–	–	–
	53	–	–	–
	429.5	–	+	+

Примечание. «+» – синхронное изменение выбранных временных рядов, «–» – отсутствие корреляции рядов на каких-либо частотах.

Note. “+” – synchronous change of selected time series, “–” – absence of correlation of series at any frequencies.

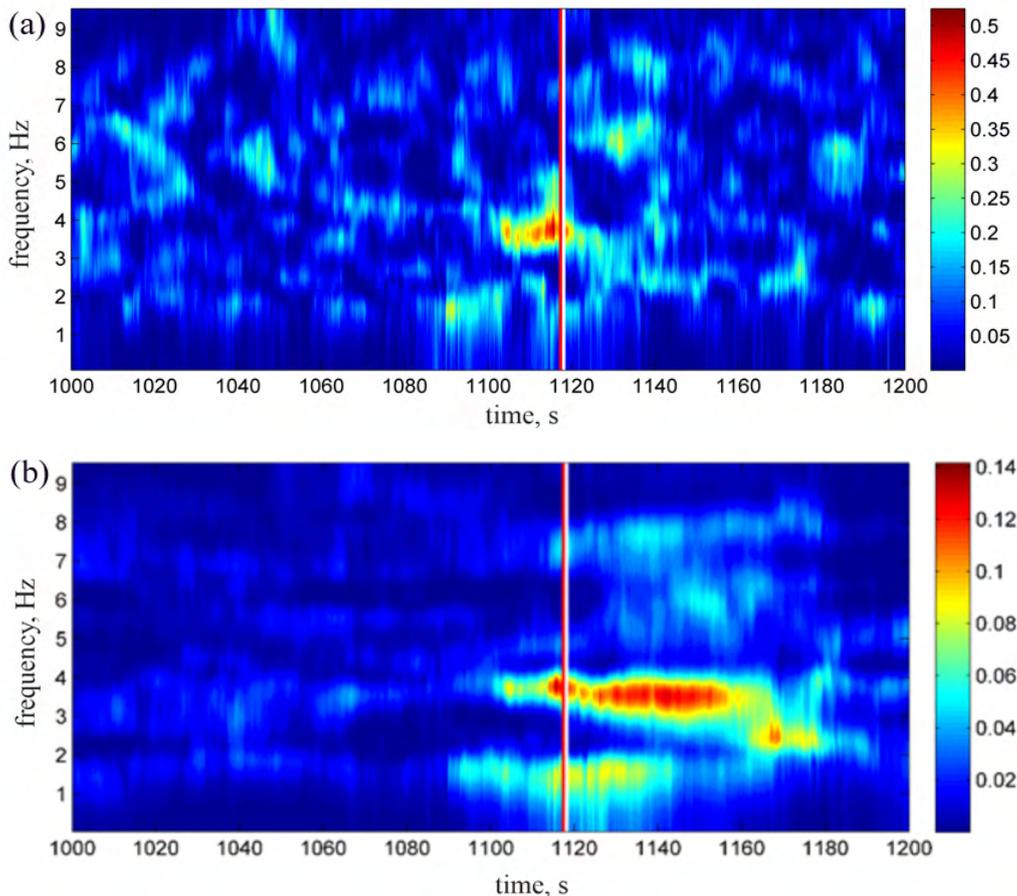


Рис. 8. Эволюция спектральной меры когерентного поведения многомерного временного ряда ширины мультифрактального спектра акустической эмиссии, зарегистрированной на основании, для временного окна 13.4 (а) и 53 с (б).

Fig. 8. Evolution of the spectral measure of the coherent behavior of the multidimensional time series of the width of the acoustic emission multifractal spectrum recorded on the base, for a time window of 13.4 (a) and 53 s (b).

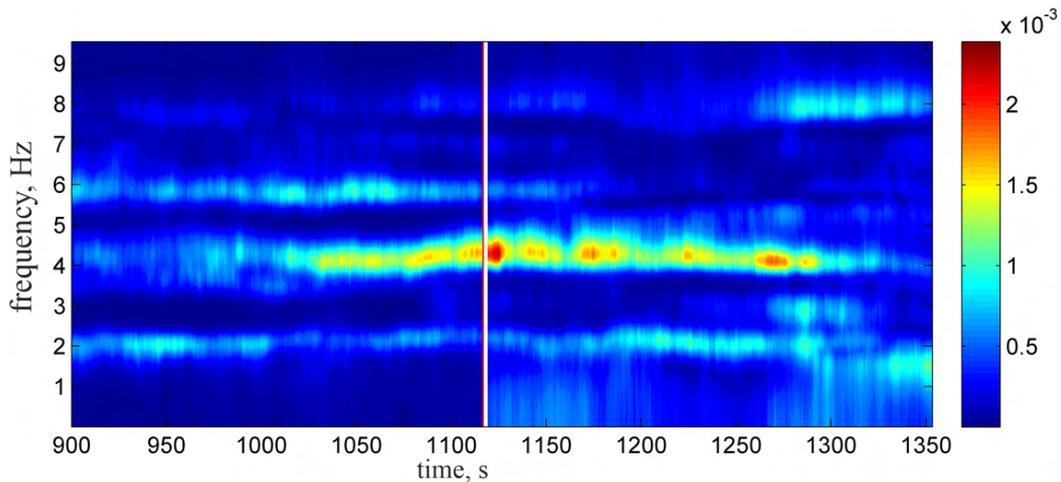


Рис. 9. Эволюция спектральной меры когерентного поведения многомерного временного ряда параметра H_{max} мультифрактального спектра акустической эмиссии, зарегистрированной на подвижном блоке, для временного окна 429.5 с.

Fig. 9. Evolution of the spectral measure of the coherent behavior of the multidimensional time series of the parameter H_{max} of the acoustic emission multifractal spectrum recorded on the moving unit for a time window of 429.5 s.

фрактальных свойств акустической эмиссии до динамической подвижки имеет место только

- для рядов ширины мультифрактального спектра акустической эмиссии, зарегистрированной на неподвижном основании, в случае оценки спектральной меры во временном окне 13.4 и 53 с (рис. 8);
- для рядов носителя спектра H_{max} , реализующего его максимум, оцененного для сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных отдельно на подвижном блоке и основании, в случае оценки спектральной меры во временном окне 429.5 с (рис. 9).

В отношении рядов ширины мультифрактального спектра видно, что их коррелированное поведение наблюдается в интервале частот 3.5–4.5 Гц. При этом при оценке спектральной меры $k(t, \nu)$ в окне размером 13.4 с коррелированное поведение фактически пропадает после динамической подвижки, тогда как для временного окна 53 с оно имеет место и после подвижки с расширением ширины частотного интервала синхронизации. Еще одно отличие построенных зависимостей заключается в длительности когерентного поведения, которое больше в случае оценки спектральной меры в окне среднего размера.

Для параметра H_{max} и оценки спектральной меры $k(t, \nu)$ во временном окне размером 429.5 с синхронизация временных рядов имеет место в интервале 4–5 Гц и начинается существенно раньше, чем в случае параметра

ΔH , что связано с размером выбранного временного окна. После динамической подвижки повышенные значения меры в этом интервале сохраняются.

4. Обсуждение результатов

Проведенная работа по анализу непрерывной акустической эмиссии, регистрируемой на подвижном блоке и неподвижном основании, позволила проверить выдвинутую авторами гипотезу о синхронизации статистических свойств акустической эмиссии при подготовке и реализации динамической подвижки. Показано, что наблюдение (выявление) эффекта синхронизации статистических свойств АЭ зависит как от набора параметров, для которых рассчитывается спектральная мера когерентности, так и от места регистрации исходных данных.

При использовании носителя мультифрактального спектра, реализующего его максимум, в качестве основного параметра, для которого ищется корреляции во временных рядах АЭ, эффекты синхронизации обнаруживаются только на больших временах (при использовании в вычислениях меры когерентности временного окна большого размера). Размер наибольшего использованного в работе окна составил 33 % от всей продолжительности эксперимента. При этом предвестниковые изменения, заключающиеся в когерентном изменении временных рядов параметра H_{max}

на определенной частоте, наблюдаются для данных, зарегистрированных либо только на основании, либо только на подвижном блоке. Комплексование данных АЭ с блока и основания приводит к потере возможности выявления предвестниковых изменений. Еще одна обнаруженная особенность состоит в том, что именно для параметра H_{max} и временного окна 429.5 с наблюдаются наиболее заблаговременные предвестниковые изменения в эволюции спектральной меры когерентности. Для данных, зарегистрированных на основании, эти изменения начинаются за 42, а для блока – за 97 с до сброса усилия (динамической подвижки).

Использование для поисков эффекта синхронизации параметра ширины мультифрактального спектра акустической эмиссии приводит к качественно иному результату. Интервалы синхронизации временных рядов этого параметра сразу после сброса усилия не обнаруживаются только в случае использования минимального временного окна и данных, полученных с основания. В остальных случаях варьируют как количество интервалов синхронизации, так и несущие частоты, на которых они расположены.

С точки зрения поиска предвестниковых изменений меры когерентности рядов ширины мультифрактального спектра АЭ, регистрация акустической эмиссии на подвижном блоке наименее предпочтительна. Независимо от размеров окна предвестниковые изменения меры когерентности в этом случае не наблюдаются. Наоборот, наиболее явно выраженные предвестники приближения динамической подвижки обнаруживаются для данных акустической эмиссии, зарегистрированной на неподвижном основании. При этом на малых и средних временах предвестниковые изменения проявляются за 15 с до подвижки.

Заключение

В работе проведено экспериментальное исследование корреляционных свойств непрерывной акустической эмиссии, зарегистрированной при подготовке и реализации динамической подвижки в лабораторной модели разломной зоны. Лабораторная модель

разломной зоны представляет собой классическую «слайдер-модель», в которой блок под действием приложенного сдвигового усилия скользит по поверхности раздела. Регистрация акустической эмиссии осуществлялась несколькими датчиками, установленными на боковых поверхностях подвижного блока и неподвижном основании с разных сторон от блока.

Для поиска интервалов синхронизации статистических свойств АЭ при подготовке и реализации динамической подвижки проводилось вычисление параметров мультифрактального спектра сигнала акустической эмиссии с каждого из датчиков (с использованием метода MF-DFA) и последующее вычисление спектральной меры когерентности для различного набора временных рядов параметров спектра в скользящем временном окне трех различных размеров: 13.4, 53, 429.5 с.

В результате проведенного анализа была подтверждена гипотеза о синхронизации статистических свойств акустической эмиссии при подготовке и реализации динамической подвижки. Показано, что наблюдение (выявление) эффекта синхронизации статистических свойств акустической эмиссии зависит как от набора параметров, для которых рассчитывается спектральная мера когерентности, так и от места регистрации исходных данных.

Установлены оптимальные параметры и наборы исходных данных для наблюдения эффекта синхронизации мультифрактальных свойств акустической эмиссии до и после динамической подвижки. Выявлены интервалы и особенности предвестниковых изменений спектральной меры когерентного поведения многомерных временных рядов параметров акустической эмиссии.

Полученные результаты демонстрируют перспективность использования данного подхода для акустического мониторинга реальных активных разломов, а также необходимость дальнейших исследований обнаруженного эффекта синхронизации с целью определения влияния на него таких факторов, как состав, физико-механические свойства и влажность заполнителя, скорость и режимы скольжения.

Список литературы

1. Быков В.Г. **2005**. Деформационные волны земли: концепция, наблюдения и модели. *Геология и геофизика*, 46(11): 1176–1190.
2. Семинский К.Ж. **2008**. Иерархия зонно-блоковой структуры литосферы Центральной и Восточной Азии. *Геология и геофизика*, 49(10): 1018–1030.
3. Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Новиков В.А., Остапчук А.А. **2014**. Медленные перемещения по разломам: параметры, условия возникновения, перспективы исследований. *Геодинамика и тектонофизика*, 5(4): 863–891. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0160>
4. Борняков С.А., Пантелеев И.А., Черемных А.В., Каримова А.А. **2018**. Экспериментальное исследование периодической активизации разлома в сейсмической зоне. *Геодинамика и тектонофизика*, 9(3): 653–670.
5. Brace W.F., Byerlee J.D. **1966**. Stick-slip as a mechanism for earthquakes. *Science*, 153: 990–992. <https://doi.org/10.1126/science.153.3739.990>
6. Кочарян Г.Г., Марков В.К., Остапчук А.А., Павлов Д.В. **2013**. Мезомеханика сопротивления сдвигу по трещине с заполнителем. *Физическая мезомеханика*, 16(5): 5–15.
7. Ben-David O., Rubinstein S.M., Fineberg J. **2010**. Slip-stick and the evolution of frictional strength. *Nature*, 463: 76–79. <https://doi.org/10.1038/nature08676>
8. Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В., Гридин Г.А., Морозова К.Г., Hongwen J., Пантелеев И.А. **2022**. Лабораторные исследования закономерностей фрикционного взаимодействия блоков скальной породы метрового масштаба. Методика и первые результаты. *Физика Земли*, 6: 162–174.
9. Любушин А.А., Соболев Г.А. **2006**. Мультифрактальные меры синхронизации микросейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов. *Физика Земли*, 9: 18–28.
10. Любушин А.А. **2008**. Микросейсмический шум в минутном диапазоне периодов: свойства и возможные прогностические признаки. *Физика Земли*, 4: 17–34.
11. Любушин А.А. **2009**. Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров поля низкочастотных микросейсм. *Физика Земли*, 5: 15–28.
12. Любушин А.А. **2010**. Статистики временных фрагментов низкочастотных микросейсм: их тренды и синхронизация. *Физика Земли*, 6: 86–96.
13. Любушин А.А. **2011**. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 года. Долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсам. *Геофизические процессы и биосфера*, 10(1): 9–35.
14. Любушин А.А. **2012**. Прогноз Великого Японского землетрясения. *Природа*, 8: 23–33.
15. Мячкин В.И., Костров Б.В., Шамина О.Г., Соболев Г.А. **1975**. Основы физики очага и предвестники землетрясений. В кн.: *Физика очага землетрясения*. М.: Наука, 9–41.
16. Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V.S., et al. **1992**. Observations of quasistatic fault growth from acoustic emissions. In: Evans B., Wong T.-F., et al. (Eds.). *Fault mechanics and transport properties of rocks*. London: Acad. Press, p. 3–31.
17. Соболев Г.А., Пономарев А.В. **2003**. *Физика землетрясений и предвестники*. М.: Наука, 270 с.
18. Соболев Г.А. **1993**. *Основы прогноза землетрясений*. М.: Наука, 310 с.
19. Пантелеев И.А., Баяндин Ю.В., Плехов О.А. **2022**. Эффект синхронизации статистических свойств непрерывной акустической эмиссии при деформировании структурно-неоднородных материалов. *Вестник ПНИПУ. Механика*, 3: 5–13. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2022.3.01>
20. Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Markov V.K., Krashe-ninnikov A.V. **2016**. Study of acoustic emission signals during fracture shear deformation. *Acoustical Physics*, 62(4): 505–513. <https://doi.org/10.1134/s1063771016040138>
21. Кочарян Г.Г. **2016**. *Геомеханика разломов*. М.: ГЕОС, 424 с.
22. Кочарян Г.Г., Новиков В.А. **2015**. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Ч. 1. Лабораторные эксперименты. *Физическая мезомеханика*, 18(4): 94–104.
23. Gerasimova E., Audit B., Roux S.-G., Khalil A., Gileva O., Argoul F., Naimark O., Arneodo A. **2014**. Wavelet-based multifractal analysis of dynamic infrared thermograms to assist in early breast cancer diagnosis. *Frontiers in Physiology*, 5: 176. <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00176>
24. Ghost D., Dutta S., Samanta S. **2012**. Fluctuation of gold price: a multifractal approach. *Acta Physica Polonica B*, 43(6): 1261–1274.
25. Absil P., Sepulchre R., Bilge A., Gerard P. **1999**. Non-linear analysis of cardiac rhythm fluctuations using DFA method. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 271: 235–244. [https://doi.org/10.1016/s0378-4371\(99\)00295-2](https://doi.org/10.1016/s0378-4371(99)00295-2)
26. Makowiec D., Gałaska R., Dudkowska A., Rynkiewicz A., Zwierz M. **2006**. Long-range dependencies in heart rate signals – revisited. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 369: 632–644. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.02.038>
27. Biswas A., Zeleke T.B., Si B.C. **2012**. Multifractal detrended fluctuation analysis in examining scaling properties of the spatial patterns of soil water storage. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 19: 227–238. <https://doi.org/10.5194/npg-19-227-2012>
28. Movahed M.S., Jafari G.R., Ghasemi F., Rahvar S., Reza Rahimi Tabar M. **2006**. Multifractal detrended fluctuation analysis of sunspot time series. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2006(02): 02003. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/2011/09/e09001>
29. Pedron I.T. **2010**. Correlation and multifractality in climatological time series. *Journal of Physics: Conference*

- Series*, 246: 012034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/246/1/012034>
30. Пантелеев И.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. **2016**. Пространственно-временные закономерности развития поврежденности при деформировании стекловолоконного тканого ламината по данным акустической эмиссии. *Физическая мезомеханика*, 19(4): 64–73.
 31. Любушин А.А. **1998**. Анализ канонических когерентностей в задачах геофизического мониторинга. *Физика Земли*, 1: 59–66.
 32. Любушин А.А. **2007**. *Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга*. М.: Наука, 228 с.
- ### References
1. Bykov V.G. **2005**. [Strain waves in the Earth: theory, field data, and models]. *Geologiya i Geofizika*, 46(11): 1176–1190. (In Russ.).
 2. Seminsky K.Zh. **2008**. Hierarchy in the zone-block lithospheric structure of Central and Eastern Asia. *Russian Geology and Geophysics*, 49(10): 771–779. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.11.017>
 3. Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Novikov V.A., Ostapchuk A.A. **2014**. Slow slip events: parameters, conditions of occurrence, and future research prospects. *Geodynamics & Tectonophysics*, 5(4): 863–891. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0160>
 4. Bornyakov S.A., Panteleev I.A., Cheremnykh A.V., Karimova A.A. **2018**. Physical modeling experiments to study periodic activation of faults in seismic zones. *Geodynamics & Tectonophysics*, 9(3): 653–670. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2018-9-3-0366>
 5. Brace W.F., Byerlee J.D. **1966**. Stick-slip as a mechanism for earthquakes. *Science*, 153: 990–992. <https://doi.org/10.1126/science.153.3739.990>
 6. Kocharyan G.G., Markov V.K., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V. **2014**. Mesomechanics of shear resistance along a filled crack. *Physical Mesomechanics*, 17(2): 123–133. doi:10.1134/S1029959914020040
 7. Ben-David O., Rubinstein S.M., Fineberg J. **2010**. Slip-stick and the evolution of frictional strength. *Nature*, 463: 76–79. <https://doi.org/10.1038/nature08676>
 8. Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Gridin G.A., Morozova K.G., Hongwen J., Panteleev I.A. **2022**. Laboratory study on frictional behavior of rock blocks of meter scale. Methods and preliminary results. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 58: 929–940. <https://doi.org/10.1134/s1069351322060064>
 9. Lyubushin A.A., Sobolev G.A. **2006**. Multifractal measures of synchronization of microseismic oscillations in a minute range of periods. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 42: 734–744. <https://doi.org/10.1134/S1069351306090035>
 10. Lyubushin A.A. **2008**. Microseismic noise in the low frequency range (periods of 1–300 min): Properties and possible prognostic features. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 44: 275–290. <https://doi.org/10.1134/s11486-008-4002-6>
 11. Lyubushin A.A. **2009**. Synchronization trends and rhythms of multifractal parameters of the field of low-frequency microseisms. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 45: 381–394. <https://doi.org/10.1134/s1069351309050024>
 12. Lyubushin A.A. **2010**. The statistics of the time segments of low-frequency microseisms: Trends and synchronization. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 46: 544–554. <https://doi.org/10.1134/s1069351310060091>
 13. Lyubushin A.A. **2011**. Seismic catastrophe in Japan on March 11, 2011: Long-term prediction on the basis of low-frequency microseisms. *Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, 46: 904–921. doi:10.1134/S0001433811080056
 14. Lyubushin A.A. **2012**. [Forecast of the Great Japan Earthquake]. *Priroda = Nature*, 8: 23–33. (In Russ.)
 15. Myachkin V.I., Kostrov B.V., Shamina O.G., Sobolev G.A. **1975**. [Fundamentals of focal physics and earthquake precursors]. In: *Physics of earthquake source*. Moscow: Nauka, 9–41. (In Russ.)
 16. Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V.S., et al. **1992**. Observations of quasistatic fault growth from acoustic emissions. In: Evans B., Wong T.-F., et al. (Eds.). *Fault mechanics and transport properties of rocks*. London: Acad. Press, p. 3–31.
 17. Sobolev G.A., Ponomarev A.V. **2003**. [Earthquake physics and precursors]. Moscow: Nauka, 270 p. (In Russ.).
 18. Sobolev G.A. **1993**. [Fundamentals of the earthquake prediction]. Moscow: Nauka, 313 p. (In Russ.). EDN: TGSIGH
 19. Panteleev I.A., Bayandin Yu.V., Plekhov O.A. **2022**. Effect of synchronization of continuous acoustic emission statistical properties during structurally heterogeneous materials deformation. *Vestnik PNIPU. Mekhanika = Bulletin of PNIPU. Mechanics*, 3: 5–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2022.3.01>
 20. Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Markov V.K., Krasheinnikov A.V. **2016**. Study of acoustic emission signals during fracture shear deformation. *Acoustical Physics*, 62(4): 505–513. <https://doi.org/10.1134/s1063771016040138>
 21. Kocharyan G.G. **2016**. *Geomechanics of faults*. Moscow: GEOS, 424 p. (In Russ.).
 22. Kocharyan G.G., Novikov V.A. **2016**. Experimental study of different modes of block sliding along interface. Pt 1. Laboratory experiments. *Physical Mesomechanics*, 19: 189–199. <https://doi.org/10.1134/s1029959916020120>
 23. Gerasimova E., Audit B., Roux S.-G., Khalil A., Gilleva O., Argoul F., Naimark O., Arneodo A. **2014**. Wavelet-based multifractal analysis of dynamic infrared thermograms to assist in early breast cancer diagnosis. *Frontiers in Physiology*, 5: 176. <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00176>

24. Ghost D., Dutta S., Samanta S. **2012**. Fluctuation of gold price: a multifractal approach. *Acta Physica Polonica B*, 43(6): 1261–1274.
25. Absil P., Sepulchre R., Bilge A., Gerard P. **1999**. Non-linear analysis of cardiac rhythm fluctuations using DFA method. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 271: 235–244. [https://doi.org/10.1016/s0378-4371\(99\)00295-2](https://doi.org/10.1016/s0378-4371(99)00295-2)
26. Makowiec D., Gałaska R., Dudkowska A., Rynkiewicz A., Zwierz M. **2006**. Long-range dependencies in heart rate signals – revisited. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 369: 632–644. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.02.038>
27. Biswas A., Zeleke T.B., Si B.C. **2012**. Multifractal detrended fluctuation analysis in examining scaling properties of the spatial patterns of soil water storage. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 19: 227–238. <https://doi.org/10.5194/npg-19-227-2012>
28. Movahed M.S., Jafari G.R., Ghasemi F., Rahvar S., Reza Rahimi Tabar M. **2006**. Multifractal detrended fluctuation analysis of sunspot time series. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2006(02): 02003. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/2011/09/e09001>
29. Pedron I.T. **2010**. Correlation and multifractality in climatological time series. *Journal of Physics: Conference Series*, 246: 012034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/246/1/012034>
30. Panteleev I.A., Bayandin Yu.V., Naimark O.B. **2016**. [Spatial and temporal patterns of damage development during deformation of a glass fiber woven laminate according to acoustic emission data]. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, 19(4): 64–73. (In Russ.).
31. Lyubushin A.A., Jr. **1998**. Analysis of canonical coherences in the problems of geophysical monitoring. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 34(1): 52–58.
32. Lyubushin A.A. **2007**. [Analysis of data from geophysical and environmental monitoring systems]. Moscow: Nauka, 228 p. (In Russ.)

Об авторах

Пантелеев Иван Алексеевич (<https://orcid.org/0000-0002-7430-3667>), доктор физико-математических наук, зав. лабораторией цифровизации горнотехнических процессов, Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, pia@icmm.ru

Окунев Владимир Иванович (<https://orcid.org/0000-0001-6024-0848>), старший научный сотрудник лаборатории импульсной энергетики в геофизике, Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, viok56@mail.ru

Новиков Виктор Александрович (<https://orcid.org/0000-0001-9009-8862>), кандидат технических наук, заведующий лабораторией импульсной энергетики в геофизике, Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, novikov_victor_a@mail.ru

About the Authors

Panteleev, Ivan A. (<https://orcid.org/0000-0002-7430-3667>), Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Laboratory of digitalization of mining processes, Institute of Continuum Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, pia@icmm.ru

Okunev, Vladimir I. (<https://orcid.org/0000-0001-6024-0848>), Senior Researcher at the Laboratory of pulsed power systems for geophysics, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, viok56@mail.ru

Novikov, Viktor A. (<https://orcid.org/0000-0001-9009-8862>), Cand. Sci. (Engineering), Head of the laboratory of pulsed power systems for geophysics, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, novikov_victor_a@mail.ru

Поступила 25.11.2023

Принята к публикации 4.12.2023

Received 25 November 2023

Accepted 4 December 2023

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



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

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 551.3.051+622.831.3

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.4.419-426>
<https://www.elibrary.ru/lhqxwe>

О некоторых закономерностях развития трещиноватости в терригенных породах острова Сахалин

П. А. Каменев¹, А. Р. Лукманов²

@E-mail: p.kamenev@imgg.ru

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

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН Москва, Россия

Резюме. В рамках комплексных исследований свойств нефтегазоматеринских пород Сахалина получены первые предварительные результаты о зависимости распределения трещиноватости от мощности пласта. Выполнены массовые замеры элементов залегания слоистости, мощностей пластов, определены ориентации систем ортогональной трещиноватости для холмской свиты. Выведенные зависимости описываются линейной аппроксимацией, которые соответствуют общемировым данным, полученным для аналогичного класса пород и мощностей пластов.

Ключевые слова: трещиноватость, терригенные породы, тектонические напряжения, нефтегазоматеринские свиты Сахалина, кремнистые коллекторы, нетрадиционные коллекторы

Patterns of fracturing placement in terrigenous rocks of Sakhalin Island

Pavel A. Kamenev¹, Anton R. Lukmanov²

@E-mail: p.kamenev@imgg.ru

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

² Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Russia

Abstract. Within complex studies of properties of hydrocarbons source rocks in Sakhalin Island the first preliminary results on the correlations of relations between the fractures distribution and bed thickness were obtained. Numerous measurements of stratification bedding planes, thicknesses of beds and orientations of orthogonal fracturing systems for the Kholmsk formation were performed. The received relations are described by linear approximation and correspond to the global data obtained for similar types of rocks and bed thicknesses.

Keywords: fracturing, terrigenous sedimentary rocks, tectonic stresses, Sakhalin Island source rocks, siliceous reservoirs, unconventional reservoirs

Для цитирования: Каменев П.А., Лукманов А.Р. О некоторых закономерностях развития трещиноватости в терригенных породах острова Сахалин. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 4, с. 419–426. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.4.419-426>; <https://www.elibrary.ru/lhqxwe>

For citation: Kamenev P.A., Lukmanov A.R. Patterns of fracturing placement in terrigenous rocks of Sakhalin Island. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 4, pp. 419–426. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.4.419-426>; <https://www.elibrary.ru/lhqxwe>

Финансирование и благодарности

Авторы признательны А.И. Шеменде, профессору Университета Ниццы – София Антиполис, за ценные предложения и дискуссии, благодаря которым было инициировано проведение настоящих исследований на Сахалине.

Funding and Acknowledgements

The Authors are grateful to Alexandre I. Chemenda, Professor at the University of Nice – Sophia Antipolis for constructive suggestions and comments which initiated our research in the Sakhalin.

Введение

Несомненно, в мире уже произошла так называемая «сланцевая революция», эффект от нее получился, возможно, не такой, как первоначально ожидалось. Тем не менее, как минимум благодаря этим событиям произошла перестройка европейского (и других) рынков углеводородного сырья. В России, с ее огромными запасами традиционных коллекторов, к инициативе разработки нетрадиционных залежей отнеслись довольно скептически. Несмотря на это, на востоке и западе страны были начаты разработки и исследования, направленные на поиски и освоение таких месторождений. Наиболее известные и крупные проекты – это изучение доманиковых отложений на западе РФ в Волго-Уральской провинции, баженовской свиты Западно-Сибирского осадочного бассейна и куонамской свиты Восточной Сибири. Если в Сибири такие работы были продиктованы необходимостью освоения новых месторождений в динамично развивающемся регионе, то в западной части они связаны с истощением традиционных резервуаров и попыткой вдохнуть новую жизнь в хорошо развитую нефтегазовую инфраструктуру региона.

Аналогичные мотивы дали старт исследовательским работам на севере Сахалина [1]. Сахалинские нефтегазовые промыслы являются старейшими в стране. Их разработка была начата еще в Российской империи. Разумеется, сухопутные месторождения в значительной степени истощены, и возникает вопрос о восполнении ресурсной базы. Таким источником могут стать нефтегазоматеринские свиты. Но их разработка в значительной степени зависит от геомеханических характеристик углеводородной системы. Это, прежде всего, ориентация главных напряжений, механические свойства горных пород и степень их трещиноватости.

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) совместно с Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), другими профильными институтами и высшими учебными заведениями начали комплексные исследования геомеханических характеристик нефтегазоматеринских пород Сахалина. Были изучены [2] и продолжают изучаться ориентация главных напряжений и

механические свойства горных пород [3]. В то же время работы, посвященные исследованиям трещиноватости этих пород, практически отсутствуют. Во времена СССР подобные работы проводились, но носили несколько иные цели. Они были предназначены для изучения трещиноватости угленосных месторождений и связанных с этим проблем их освоения [4, 5].

Цель настоящей работы – показать первые результаты статистических закономерностей развития трещиноватости в терригенных породах Сахалина.

Исследованию нетрадиционных коллекторов Сахалина посвящено достаточно много работ [6, 7, 8 и др.], но в большинстве из них исследуется нефтегазоматеринский потенциал. При этом геомеханическая составляющая исследований, которая в конечном итоге и будет определять потенциальную добычу углеводородов, как правило, опускается. В то же время за рубежом активно исследуются как лабораторные свойства горных пород [9], тектонические напряжения [10], так и трещиноватость. Предпринято достаточно много попыток обобщения и поиска статистических закономерностей распределения трещиноватости как ранее [11], так и в недавнее время [12, 13]. Одни из современных обобщений зависимости трещиноватости от мощности пластов осадочных пород представлены в работах [14, 15]. При этом вопрос о характере зависимости (линейном или нелинейном) остается открытым [15]. К одним из относительно недавних геологических работ, проведенных на Сахалине, относятся [16, 17]. Актуальность таких исследований связана не только с потенциальной добычей углеводородов, но и с вопросами стабильности горных массивов при их разработке и устойчивости склонов. Работы перечисленных авторов были проведены за рубежом, а также на Сахалине на достаточно обширной территории и с другими смежными целями. Поэтому нами было принято решение о проведении аналогичных [15] работ в южной части о. Сахалин.

Объект и методика исследования

В качестве объекта исследования был выбран клиф северного побережья зал. Анива в окрестности г. Корсаков в точке с координатами 46°35.476' N, 142°48.758' E (рис. 1 и 2).

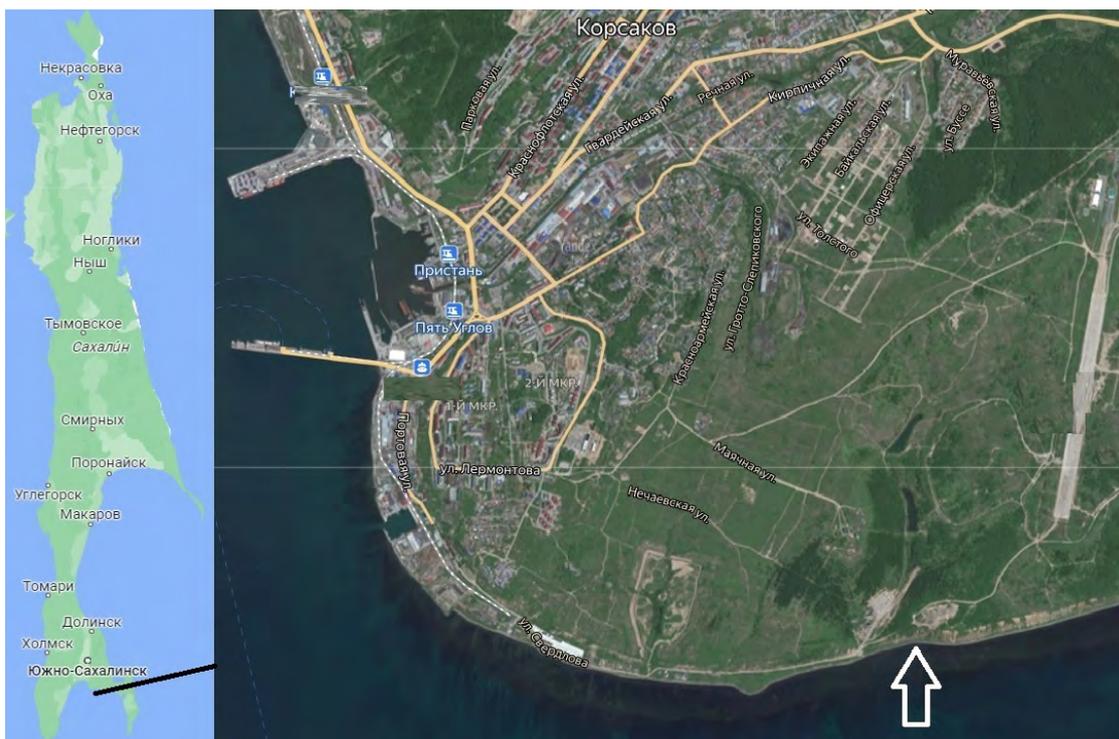


Рис. 1. Район исследования.

Fig. 1. The research area.

URL: https://yandex.ru/maps/geo/korsakov/53067840/?l=sat%2Cskl&ll=142.799204%2C46.615234&source=serp_navig&z=14



Рис. 2. Объект исследования.

Fig. 2. The object of the study.

Неогеновые отложения в прогибе зал. Анива представлены холмской N_1hl и нельской N_1nv свитами нижнемиоценового возраста, курасийской N_1kr_2 свитой средневерхнемиоценового возраста и маруямской $N_{1-2}mr$ верхнемиоценового–плиоценового возраста [18]. В точке исследования породы представлены преимущественно кремнистыми алевролитами с прослоями песчаников, туфо-песчаников, реже туфогравелитами холмской свиты (рис. 3).

Алевролиты кремнистые, от светло-серых до темно-серых с ожелезнением на поверхности, с обильными включениями песчаников и туфов, иногда с прожилками кальцита (рис. 3, 9). Песчаники мелко-среднезернистые, темно-серые до коричневых, в большинстве случаев вулканомиктовые с переотложенным пирокластическим материалом (рис. 3, 10). Туфогравелиты от светло-серых до коричневых (рис. 3, 1). Отложения холмской свиты залегают согласно на отложениях аракайской свиты P_3ar , граница между ними проводится весьма условно при смене грубообломочных пород на мелкозернистые [18].

В структурном плане меловые и олигоцен-миоценовые образования в районе исследова-

ния смяты в систему складок СВ простирания с пологим (10°) погружением осей в ЮЗ направлении и косо ориентированных к ним складок СВ простирания. Это указывает на формирование данных структур в результате сжатия СЗ направления и преимущественно левосторонние перемещения вдоль Мерейской разломной зоны. На поверхностях разрывов установлены также правосторонние и сбросовые перемещения, следы которых менее интенсивны и на современной структуре практически не отразились. Левосдвиговые и складчатые дислокации наложены на олигоцен-миоценовые и меловые образования [16].

Холмская свита, как правило, не рассматривается большинством исследователей в качестве одной из основных нефтегазоматеринских пород Сахалина. Тем не менее, по данным [18], содержание органического углерода $C_{орг}$ холмской свиты от 0.3 до 0.7 %, что отвечает одному из критериев нефтегазоматеринского потенциала. Аналогичные лабораторные результаты были получены и в работе [17]. Кроме того, породы свиты характеризуются достаточно хорошими люминесцентно-битумологическими свойствами. Дополнительным фактором, позволяющим отнести эту свиту к нефтегазоматеринским, является тот факт, что на действующих Анивских газовых месторождениях она залегает под маруямской свитой, из которой непосредственно производится добыча [18]. Весьма вероятно, что холмская свита внесла и вносит определенный вклад в генерацию углеводородов и, как следствие, в уровень добычи на месторождении.

Учитывая обширную территорию распространения холмской свиты, от п-ова Крильон до Тымовского района, в том числе и на территориях интенсивного строительства ин-

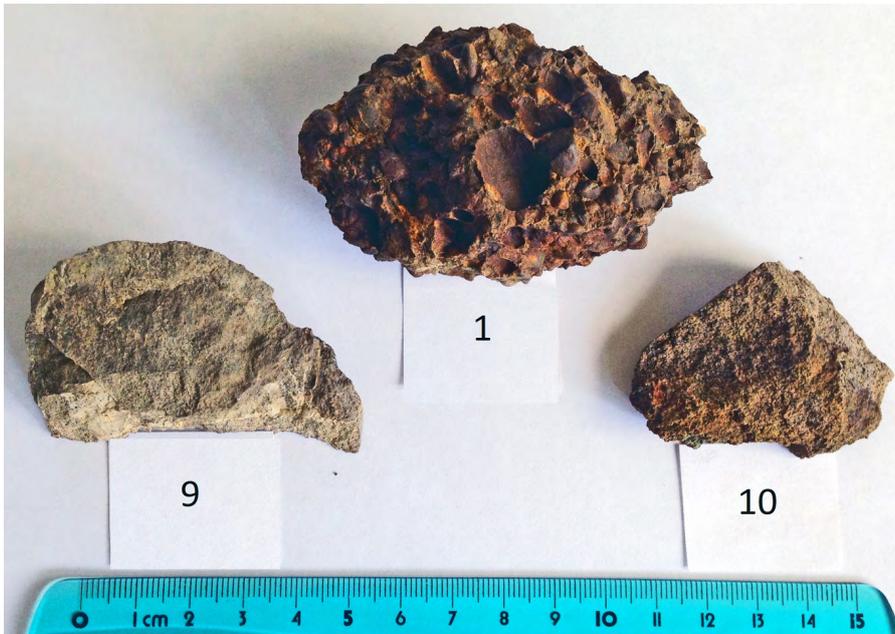


Рис. 3. Терригенные породы холмской свиты в точке проведения исследований. Цифры – номера пластов. Описание пород в тексте.

Fig. 3. Terrigenous rocks of Kholmok formation at the point of research. The numbers indicate the beds numbers. The rock descriptions is in the text.

фраструктуры, задача изучения трещиноватости становится еще более актуальной.

На выбранном объекте (рис. 2) изучались элементы залегания слоистости, мощность пластов, взаимосвязь количества трещин и расстояний между ними для двух систем ортогональных трещин – J1 и J2 (рис. 4). В системе J1 плоскость трещин параллельна береговой линии, средний азимут падения 202° и угол падения 76° . В системе J2 плоскость трещин перпендикулярна береговой линии, средний азимут падения 287° и угол падения 81° . Средние значения элементов залегания слоистости варьируют от 16 до 45° по азимуту падения и от 12 до 15° по углу падения.

На рис. 4 А показана ориентация плоскостей трещин.

В выбранной точке было исследовано 9 пластов. Каждому пласту присвоен порядковый номер (нумерация снизу вверх). Большинство пластов выбранного объекта имеет мощность от 15 до 80 см. Единственный пласт большой мощности – 3.8 м (пласт № 1) представлен туфогравелитами (рис. 3, 1).

На каждый пласт проводилось по 10 замеров ориентации каждой системы трещин, расстояний между ними, мощности и элементов залегания слоистости – суммарно по 60 замеров для одного пласта. Всего выполнено около 540 измерений.

На рис. 4 В и С показаны зависимости количества трещин от расстояния между ними для двух систем ортогональных трещин. Гистограммы обеих систем трещин практически подобны друг другу. Максимальное количество трещин (60–70) наблюдается в диапазоне 10 см, меньшее (около 20) – в диапазоне 20 см. Для системы J1 довольно многочисленны также расстояния 30 см. Остальные значения для обеих систем трещин находятся в фоновом диапазоне. Относительно азимутов плоскостей трещин (рис. 4 А) наблюдается достаточно очевидная ортогональность, несмотря на существенный разброс значений: от 160 до 230 для J1 и от 240 до 300 для J2.

Зависимость трещиноватости от мощности пласта для системы ортогональных трещин J1 и J2 представлена на рис. 5. Как вид-

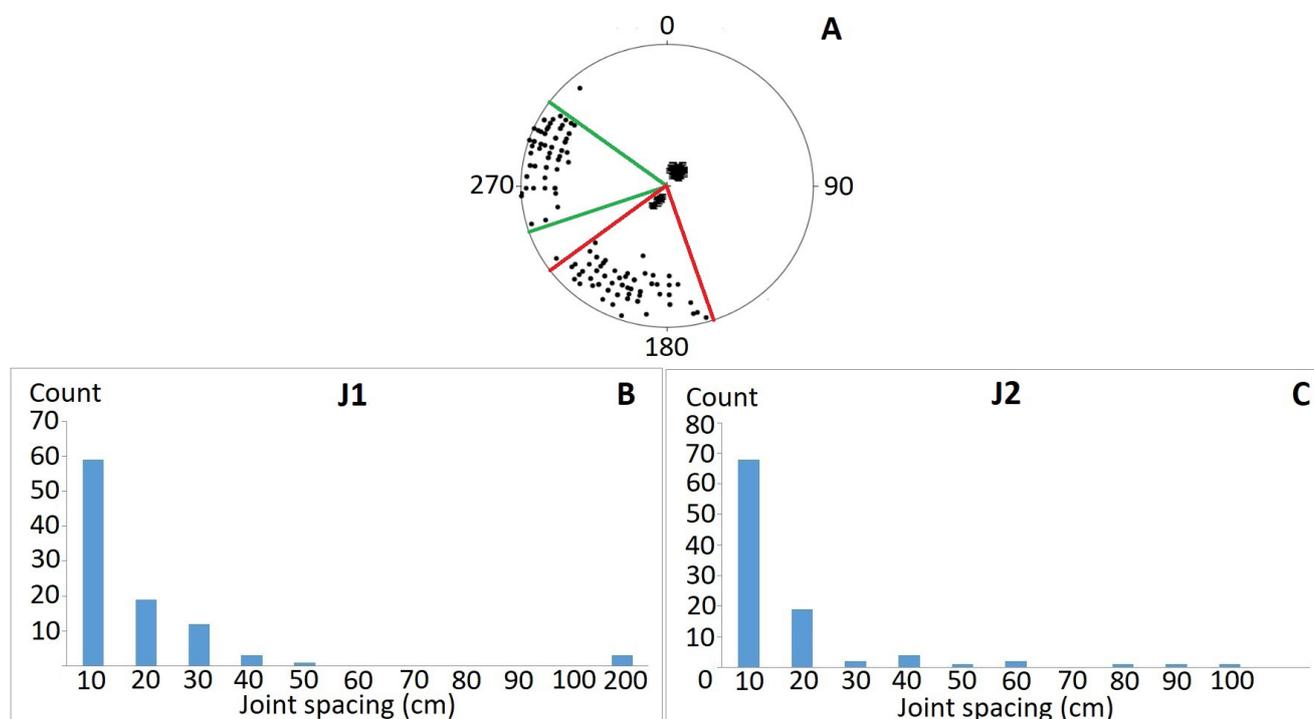


Рис. 4. Элементы залегания слоистости (по центру) и ориентация основной системы трещин (зеленым отмечен западный сектор, красным – южный) с проекцией на верхнюю полусферу (А); взаимосвязь количества трещин и расстояния между ними (В – система J1; С – J2).

Fig. 4. Stratigraphic bedding planes (in the center) and orientation of the main system of fractures (green – western sector, red – southern sector) with projection on the upper hemisphere (A), dependence of joints number versus distance between them (B – systems J1; C – J2).

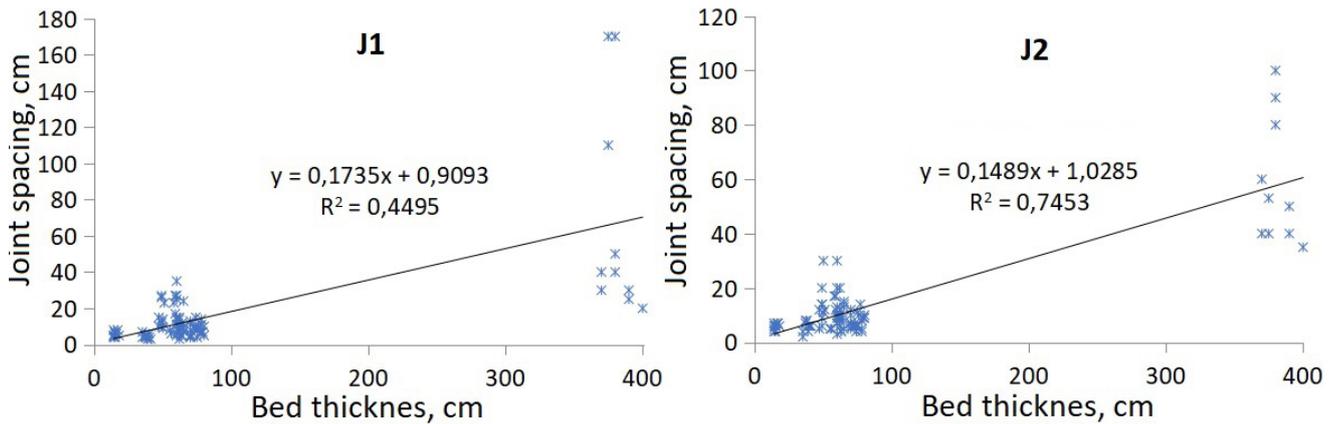


Рис. 5. Зависимость трещиноватости от мощности пласта для систем ортогональных трещин J1 и J2.

Fig. 5. Dependence of fracturing versus bed thickness for the system of orthogonal fractures J1 and J2.

но из рисунка, для получения более точных корреляций недостает диапазонов мощностей пластов 2, 3 и более 4 м. В этом и заключается сложность при выборе объекта исследования.

Тем не менее получены линейные корреляции с удовлетворительной степенью достоверности, что в целом соответствует общемировым данным. В работе [15] приведены корреляции для более представительного распределения мощностей пластов с интервалом от 0.1 до 8 м. Представлена закономерность распределения, описываемая степенной функцией:

$$s(J1) = 0.66t + 2.90 \quad (R^2 = 0.72), \quad (1)$$

$$s(J2) = 1.08t + 12.20 \quad (R^2 = 0.74). \quad (2)$$

Но для мощностей пластов первых метров более адекватна линейная корреляция.

В нашем случае:

$$s(J1) = 0.17t + 0.90 \quad (R^2 = 0.45), \quad (3)$$

$$s(J2) = 0.15t + 1.03 \quad (R^2 = 0.74). \quad (4)$$

Степенная аппроксимация результатов наших измерений дает меньшую достоверность, но при этом корреляция более схожа с величинами в работах [13, 14, 15]:

$$s(J1) = 0.5772t^{0.6988} \quad (R^2 = 0.45), \quad (5)$$

$$s(J2) = 0.5033t^{0.7186} \quad (R^2 = 0.53). \quad (6)$$

Здесь везде s – расстояние между трещинами, t – мощность пласта, R^2 – величина достоверности аппроксимации.

Кроме полученных корреляций (1), (2) в работе [15] проведена обширная систематизация ранее выполненных другими авторами

результатов изучения ортогональной трещиноватости в осадочных породах на различных локациях по всему миру, в том числе и отечественными исследователями на территории СССР. В значительной части этих работ получены линейные корреляции для систем ортогональной трещиноватости, другая часть исследований лучше описывается степенной функцией. В нашем случае малое количество пластов большой мощности не позволяет сделать более конкретные и обоснованные выводы. В будущем, на объектах с широким диапазоном мощностей пластов и наличием системы ортогональной трещиноватости, планируется проведение дополнительных исследований.

Заключение

Для терригенных пород южного Сахалина были получены первые предварительные результаты о зависимости распределения трещиноватости от мощности пласта. Проведены массовые замеры элементов залегания слоистости, мощностей пластов и ориентации систем ортогональной трещиноватости. Полученные зависимости распределения плотности трещин от мощности пласта описываются линейной аппроксимацией, они вполне соответствуют общемировым данным. Предварительные данные показывают важность продолжения исследований в этом направлении. Их результаты могут быть использованы в самом широком спектре развивающейся экономики региона, от строительной до нефтегазовой и горнодобывающей отрасли.

Список литературы

1. Маринин А.В., Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Каменев П.А., Костров Ю.В., Бондарь И.В., Гордеев Н.А., Дегтярев В.А. **2021**. Реконструкция тектонических напряжений на полуострове Шмидта (Сахалин). *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*, 4(52): 73–88. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2021-4-52-73-88>
2. Каменев П.А., Маринин А.В., Дегтярев В.А., Лукманов А.Р. **2023**. Реконструкция тектонических напряжений Центрального Сахалина. *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*, 1(57): 89–103. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-1-57-89-103>
3. Kamenev P.A., Bogomolov L.M., Usoltseva O.M., Tsoi P.A., Semenov V.N. **2021**. Geomechanical parameters of sedimentary rocks of Southern Sakhalin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012013>
4. Шпеталенко Л.П. **1974**. К прогнозированию мелкоамплитудных разрывов угольных месторождений Сахалина. В кн.: *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сахалина и Курильских островов*. Южно-Сахалинск: Сах. отд-ние Дальневост. кн. изд-ва, с. 51–53.
5. Шпеталенко Л.П. **1973**. О количественной характеристике тектонической нарушенности угольных месторождений Сахалина. В кн.: *Геология и перспективы нефтегазоносности, рудного и нерудного сырья Советского Дальнего Востока*. Южно-Сахалинск: Сах. отд-ние Дальневост. кн. изд-ва, с. 91–93.
6. Грецкая Е.В. **1990**. *Исходный нефтегазоматеринский потенциал органического вещества осадков (на примере впадин Охотского моря)*. Владивосток: ДВО АН СССР, 111 с.
7. Харахинов В.В. **2010**. *Нефтегазовая геология Сахалинского региона*. М.: Науч. мир, 275 с.
8. Керимов В.Ю., Лавренова Е.А., Синявская О.С., Сизиков Е.А. **2015**. Оценка углеводородного потенциала генерационно-аккумуляционных углеводородных систем Охотского моря. *Труды Рос. гос. ун-та нефти и газа им. И.М. Губкина*, 3: 18–30.
9. Zoback M.D. **2007**. *Reservoir geomechanics*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 505 p.
10. Heidbach O., Rajabi M., Cui X., Fuchs K., Müller K., Reinecker B., Reiter J., Tingay K., Wenzel F., Xie F., Ziegler M., Zoback M.L., Zoback M.D. **2018**. The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744: 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
11. Huang Q., Angelier J. **1989**. Fracture spacing and its relation to bed thickness. *Geological Magazine*, 126(4): 355–362. <https://doi.org/10.1017/S0016756800006555>
12. Saein A.F., Riahi Z.T. **2019**. Controls on fracture distribution in Cretaceous sedimentary rocks from the Isfahan region, Iran. *Geological Magazine*, 156(6): 1092–1104. <https://doi.org/10.1017/S0016756817000346>
13. Chemenda A.I., Lamarche J., Matonti C., Bazalgette L., Richard P. **2021**. Origin of strong nonlinear dependence of fracture (joint) spacing on bed thickness in layered rocks: Mechanical analysis and modeling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(3). <https://doi.org/10.1029/2020JB020656>
14. Chemenda A.I. **2022**. Bed thickness-dependent fracturing and inter-bed coupling define the nonlinear fracture spacing-bed thickness relationship in layered rocks: Numerical modeling. *Journal of Structural Geology*, 165(104741). <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104741>
15. Shaocheng Ji, Le Li, Denis Marcotte. **2021**. Power-law relationship between joint spacing and bed thickness in sedimentary rocks and implications for layered rock mechanics. *Journal of Structural Geology*, 150(104413). <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104413>
16. Голозубов В.В., Касаткин С.А., Гранник В.М., Нечаюк А.Е. **2012**. Деформации позднемиоценовых и кайнозойских комплексов Западно-Сахалинского террейна. *Геотектоника*, 5: 22–43. EDN: РСІКНН
17. Кирюхина Т.А., Бордунов С.И., Соловьева А.А. **2016**. Нефтематеринские толщи в юго-западной части Южно-Сахалинского бассейна. *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*, 6: 64–73. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2016-6-64-73>
18. Тютрин И.И., Дуничев В.М. **1985**. *Тектоника и нефтегазоносность северо-западной части Тихоокеанского пояса*. М.: Недра, 174 с.

References

1. Marinin A.V., Rebetskiy Yu.L., Sim L.A., Kamenev P.A., Kostrov Yu.V., Bondar I.V., Gordееv N.A., Degtyarev V.A. **2021**. Reconstruction of tectonic stresses on the Schmidt Peninsula (Sakhalin). *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*, 4(52): 73–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2021-4-52-73-88>
2. Kamenev P.A., Marinin A.V., Degtyarev V.A., Lukmanov A.R. **2023**. Reconstruction of tectonic stresses in Central Sakhalin. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*, 1(57): 89–103. (In Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-1-57-89-103>
3. Kamenev P.A., Bogomolov L.M., Usoltseva O.M., Tsoi P.A., Semenov V.N. **2021**. Geomechanical parameters of sedimentary rocks of Southern Sakhalin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012013>
4. Shpetalenko L.P. **1974**. [To the prediction of small-amplitude ruptures of Sakhalin coal deposits]. In: *Geology and mineral resources of Sakhalin and the Kuril Islands*. Yuzhno-Sakhalinsk: Sahalinskoe otdelenie Dal'nevostochnogo kn. izd-va, p. 51–53. (In Russ.).
5. Shpetalenko L.P. **1973**. [On the quantitative characteristics of the tectonic disturbance of Sakhalin coal deposits]. In: *Geology and prospects of oil and gas potential, ore and non-metallic raw materials of the Soviet*

- Far East. Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalinskoe otdelenie Dal'nevostochnogo kn. izd-va*, p. 91–93. (In Russ.).
6. Gretskaia E.V. **1990**. [*The initial oil and gas source potential of organic matter of sediments (on the example of the depressions of the Sea of Okhotsk)*]. Vladivostok: Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences, 111 p. (In Russ.).
 7. Kharakhinov V.V. **2010**. [*Oil-and-gas geology of the Sakhalin region*]. M.: Nauchnyi mir, 275 p. (In Russ.).
 8. Kerimov V.Yu., Lavrenova E.A., Sinyavskaya O.S., Sizikov E.A. **2015**. The estimation of hydrocarbon potential of the generative-accumulative hydrocarbon systems of the Sea of Okhotsk. *Proceedings of Gubkin University*, 3: 18–30. (In Russ.).
 9. Zoback M.D. **2007**. *Reservoir geomechanics*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 505 p.
 10. Heidbach O., Rajabi M., Cui X., Fuchs K., Müller K., Reinecker B., Reiter J., Tingay K., Wenzel F., Xie F., Ziegler M., Zoback M.L., Zoback M.D. **2018**. The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744: 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
 11. Huang Q., Angelier J. **1989**. Fracture spacing and its relation to bed thickness. *Geological Magazine*, 126(4): 355–362. <https://doi.org/10.1017/S0016756800006555>
 12. Saein A.F., Riahi Z.T. **2019**. Controls on fracture distribution in Cretaceous sedimentary rocks from the Isfahan region, Iran. *Geological Magazine*, 156(6): 1092–1104. <https://doi.org/10.1017/S0016756817000346>
 13. Chemenda A.I., Lamarche J., Matonti C., Bazalgette L., Richard P. **2021**. Origin of strong nonlinear dependence of fracture (joint) spacing on bed thickness in layered rocks: Mechanical analysis and modeling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(3). <https://doi.org/10.1029/2020JB020656>
 14. Chemenda A.I. **2022**. Bed thickness-dependent fracturing and inter-bed coupling define the nonlinear fracture spacing-bed thickness relationship in layered rocks: Numerical modeling. *Journal of Structural Geology*, 165(104741). <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104741>
 15. Shaocheng Ji, Le Li, Denis Marcotte. **2021**. Power-law relationship between joint spacing and bed thickness in sedimentary rocks and implications for layered rock mechanics. *Journal of Structural Geology*, 150(104413). <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104413>
 16. Golozubov V.V., Kasatkin S.A., Grannik V.M., Nechayuk A.E. **2012**. Deformation of the Upper Cretaceous and Cenozoic complexes of the West Sakhalin terrane. *Geotectonics*, 46: 333–351. <https://doi.org/10.1134/S0016852112050020>
 17. Kiryukhina T.A., Bordunov S.I., Solovyeva A.A. **2016**. Source rock in the South-Western part of the South-Sakhalin basin. *Moscow University Bulletin. Series Geology*, 6: 64–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2016-6-64-73>
 18. Tyutrin I.I., Dunichev V.M. **1985**. [*Tectonics and oil-and-gas potential of the northwestern part of the Pacific belt*]. Moscow: Nedra, 174 p. (In Russ.).

Об авторах

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

Лукманов Антон Романович, научный сотрудник лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, antonlukmanov@mail.ru

Поступила 20.11.2023

Принята к публикации 3.12.2023

About the Authors

Kamenev, Pavel A. (<https://orcid.org/0000-0002-9934-5855>), Senior Researcher, Laboratory of geochemistry and regional geology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, p.kamenev@imgg.ru

Lukmanov, Anton R., Researcher, Laboratory fundamental and applied problems of tectonophysics, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, antonlukmanov@mail.ru

Received 20 November 2023

Accepted 3 December 2023

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



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

МОНИТОРИНГ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 551.21

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.427-438>
<https://www.elibrary.ru/zfyzzg>

Вулканическая активность на Курильских островах в 2022 г.

А. В. Дегтерев[@], М. В. Чибисова

^{@E-mail:} d_a88@mail.ru

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

Резюме. В 2022 г. вулканическая активность на Курильских островах была повышенной. В состоянии извержения находились вулканы Алаид (о. Атласова), Эбеко, Чикурачки (о. Парамушир) и Чиринкотан (о. Чиринкотан, Северные Курилы). На вулкане Алаид в период с сентября по декабрь происходило вершинное эффузивно-эксплозивное извержение: по южному склону вулкана излилось два лавовых потока протяженностью 2.6 и 1 км, и произошло не менее 15 пепловых выбросов на высоту от 2.5 до 6 км н.у.м. Вулкан Эбеко, с декабря 2021 г. находившийся в состоянии покоя, в июне 2022 г. возобновил характерную для последних лет интенсивную активность вулканического типа, характеризующуюся частыми пепловыми выбросами. За 7 мес. деятельности вулкана (с июня по декабрь 2022 г.) зафиксировано более 600 пепловых выбросов, из них 253 на высоту 3 км и более н.у.м.). К июлю эксплозивная активность Эбеко резко усилилась: было отмечено 174 события (из них 51 на высоту 3 км и более н.у.м.), что стало максимальным значением за весь период видеонаблюдений, выполняемых с октября 2017 г. Вулкан Чикурачки на протяжении всего года характеризовался повышенной активностью: с января по октябрь отмечено не менее 5 эпизодов эксплозивной активности продолжительностью от 2 до 13 дней. Наблюдались как отдельные выбросы, так и серии эксплозий на высоту 2–5 км н.у.м., а также периоды относительно спокойной эмиссии пепло-газовой смеси различной интенсивности. На влк. Чиринкотан 22 марта зафиксирован единичный слабый пепловый выброс (3 км н.у.м.).

Ключевые слова: вулкан, извержение, Курильские острова, вулканический пепел, спутниковые снимки

Volcanic activity on the Kuril Islands in 2022

Artem V. Degterev[@], Marina V. Chibisova

^{@E-mail:} d_a88@mail.ru

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

Abstract. In 2022, volcanic activity in the Kuril Islands was increased. Alaid (Atlasov Island), Ebeko, Chikurachki (Paramushir Island) and Chirinkotan volcanoes (Chirinkotan Island, Northern Kuriles) were erupting. A summit effusive-explosive eruption occurred on the Alaid volcano from September till December: two lava flows 2.6 and 1 km long erupted along the southern slope of the volcano and at least 15 explosions occurred to a height of 2.5 to 6 km a.s.l. Ebeko Volcano, which has been dormant since December 2021, in June 2022 resumed the intense volcanic activity characteristic for recent years, characterized by frequent ash emissions. Over 7 months of volcano activity (from June till December 2022) more than 600 ash ejections were recorded, 253 of which were at a height of 3 or more km above sea level). By July, explosive activity increased sharply – 174 events were recorded (51 of them at a height of 3 or more km a.s.l.), which became the maximum value for the entire period of video observations carried out since October 2017. The Chikurachki volcano was characterized by an increased activity, in the period from January till October, at least 5 episodes of explosive activity were observed. Both single ejections and series of explosions to a height of 2–5 km a.s.l., as well as periods of relatively quiet emission of ash-gas mixture of various intensity were observed. On March 22, a single weak ash ejection (3 km a.s.l.) was recorded at the Chirinkotan volcano.

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

Для цитирования: Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Вулканическая активность на Курильских островах в 2022 г. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 4, с. 427–438. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.4.427-438>; <https://www.elibrary.ru/zfyzzg>

For citation: Degterev A.V., Chibisova M.V. Volcanic activity on the Kuril Islands in 2022. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 4, pp. 427–438. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.4.427-438>; <https://www.elibrary.ru/zfyzzg>

Финансирование и благодарности

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

Авторы признательны Сергею Петровичу Лакомову, Горанько Елене Константиновне, Сергею Захаровичу Смирнову (ИГМ СО РАН), Рафаэлю Владимировичу Жаркову (ИМГиГ ДВО РАН) за предоставленные фото-, видеоматериалы и информацию о состоянии активных вулканов в минувшем году.

Авторы благодарят уважаемых рецензентов, чьи рекомендации позволили улучшить текст этой статьи.

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 Authors are grateful to Sergei P. Lakomov, Elena K. Goranko, Sergei Z. Smirnov (IGM SB RAS), Rafael V. Zharkov (IMGG FEB RAS) for providing photo, video materials and information about condition of active volcanoes for last year.

The Authors would like to thank the respected Reviewers whose recommendations allowed to improve the text of this article.

Введение

В 2022 г. в состоянии извержения находились вулканы, расположенные на Северных Курилах, – Алаид (о. Атласова), Эбеко, Чикурачки (о. Парамушир) и Чиринкотан (о. Чиринкотан).

Наблюдение за вулканической активностью, осуществляемое Сахалинской группой реагирования на вулканические извержения (SVERT), традиционно проводилось на основе данных дистанционного зондирования: использовались космические снимки NOAA-18/19 (AVHRR/POES), Terra и Aqua (MODIS), SuomiNPP и JPSS-1 (VIIRS), Sentinel-2 и Himawari-8/9 по разности инфракрасных каналов 10–12 мкм (4–5 каналы AVHRR, 31–32 каналы MODIS, 14–15 каналы Himawari-8/9, VIIRS), обрабатываемые информационными системами «ВЕГА-Science» [1], и данные системы «Дистанционный мониторинг вулканов Камчатки и Курил» VolSatView [2, 3]. Наблюдение за активностью влк. Эбеко основывалось на изображениях, поступающих с IP-камеры AXIS (0526-001), установленной в октябре 2017 г. на территории Северо-Курильска Камчатским филиалом ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» совместно с Институтом морской геологии и геофизики ДВО РАН. Спутниковые данные, как показала практика, малопригодны для отслеживания эксплозий Эбеко.

Данное сообщение продолжает серию сводок по вулканической активности, посвя-

щенных описанию произошедших событий. Более подробная информация об активности вулканов Алаид и Чикурачки в 2022 г. приводится в ранее опубликованных работах [4, 5].

Вопросы изучения вещественного состава продуктов вулканической активности в данной публикации не рассматривались. Подробные сведения о геологическом строении, истории активности и петрохимии пород рассматриваемых вулканов содержатся в работах [5–12].

Результаты наблюдений

Вулкан Алаид

Базальтовый стратовулкан Алаид (о. Атласова) расположен в 20 км к северо-западу от о. Парамушир (Северные Курильские о-ва) (рис. 1). Он является самым северным и высочим вулканом Курильской островной дуги – высота надводной части постройки, формирующей о. Атласова, составляет 2339 м н.у.м., а превышение постройки над дном Охотского моря достигает 3000 м [7, 8, 10]. Вершину вулкана венчает кратер размером 800×1200 м, образованный несколькими разновозрастными эксплозивными формами. В его южной части расположены свежие шлаковые конусы и лавовые потоки, образовавшиеся в ходе извержения вулкана – в 2015–2016 гг. [8, 14].

В историческое время наблюдалось не менее 9 извержений влк. Алаид: 1793, 1854, 1860, 1894, 1933–1934, 1972, 1981, 2012, 2015–2016 гг. По своему характеру это были как

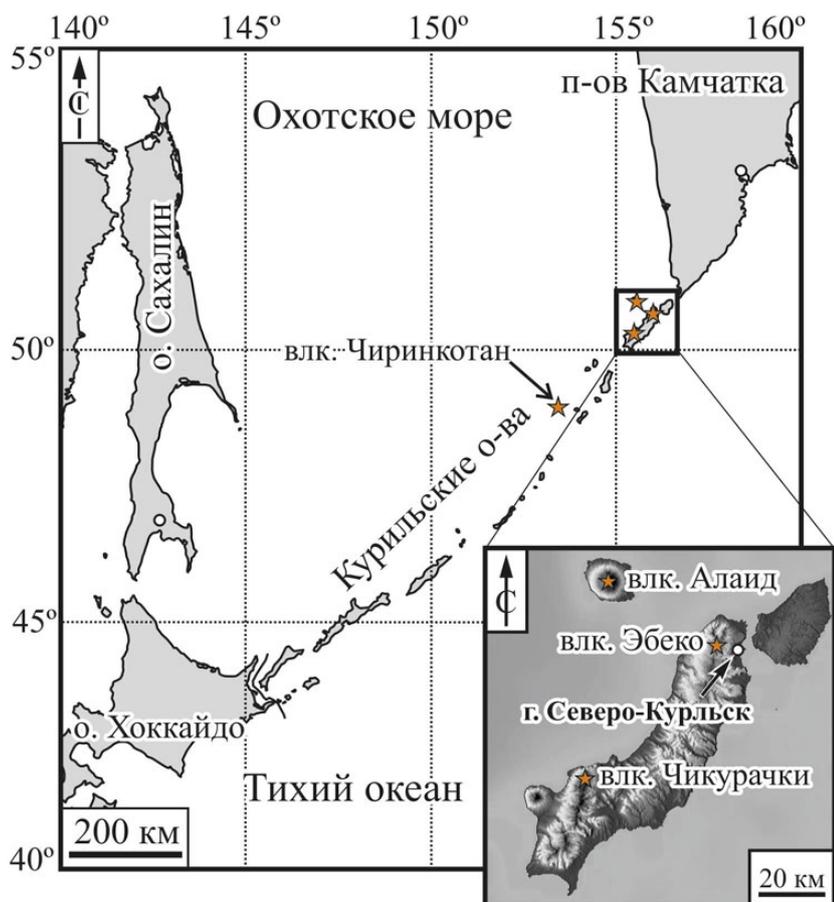


Рис. 1. Географическое положение вулканов Алаид, Эбеко, Чикурачки и Чиринкотан в системе Курильской островной дуги.

Fig. 1. Geographical location of Alaid, Ebeko, Chikurachki and Chirinkotan volcanoes in the system of the Kuril Island arc.

терминальные, так и побочные извержения вулканского, вулканско-стромболианского и субплинианского типов [7, 8, 14–17].

В сентябре 2022 г. началось очередное извержение влк. Алаид. 10 сентября в 6:20 UTC (здесь и далее приводится время по UTC, Coordinated Universal Time – всемирное координированное время) специалистами VAAC Токио (Volcanic Ash Advisories Center – Консультативный центр по вулканическому пеплу) зарегистрирован парогазовый выброс с примесью пепла на высоту 3 км н.у.м (космические снимки Himawari-8/9). Шлейф от него простирался на 65 км в восток-юго-восточном направлении (здесь и далее используется аэронавигационное обозначение направления движения пепловых облаков). 15 сентября на снимках Sentinel-2 была зафиксирована интенсивная термальная аномалия. В последующие дни наблюдался постепенный рост тепловой

мощности в пределах кратерной зоны (данные Sentinel-2, Suomi NPP, Aqua/Terra и др.), что свидетельствовало о заполнении кратера лавой. 19, 23, 29 сентября в телеграмм-канале (<https://t.me/kurilband>) были опубликованы ночные фотографии (авторы Я.Я. Яковлев и В.П. Петров) извержения влк. Алаид, на которых было запечатлено сильное свечение над кратером – проявление стромболианской активности. Поступление лавового материала сопровождалось парогазовыми выбросами с примесью пепла на высоту 2.5–3 км н.у.м. (18, 21 и 27 сентября 2022 г.) (рис. 2). Пепловые шлейфы имели протяженность 50–100 км и распространялись преимущественно в восточном и северо-восточном направлениях. Предположительно 27–28 сентября началось излияние лавового потока по южному склону вулкана, зафиксированное по спутниковым снимкам Sentinel-2. К 4 октября 2023 г.

его протяженность составляла ~1 км (рис. 3).

В период с 13 по 16 октября отмечалась очередная серия пепловых выбросов (не менее 5) на высоту 3–6 км н.у.м. (рис. 2). Эруп-

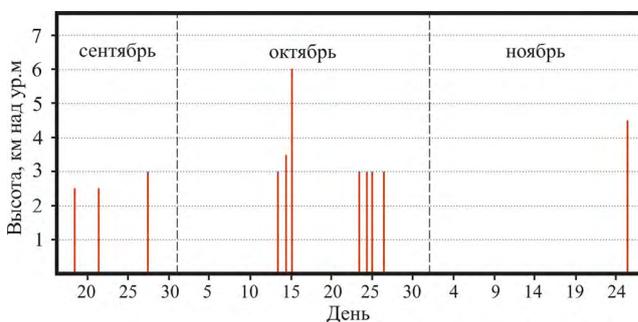
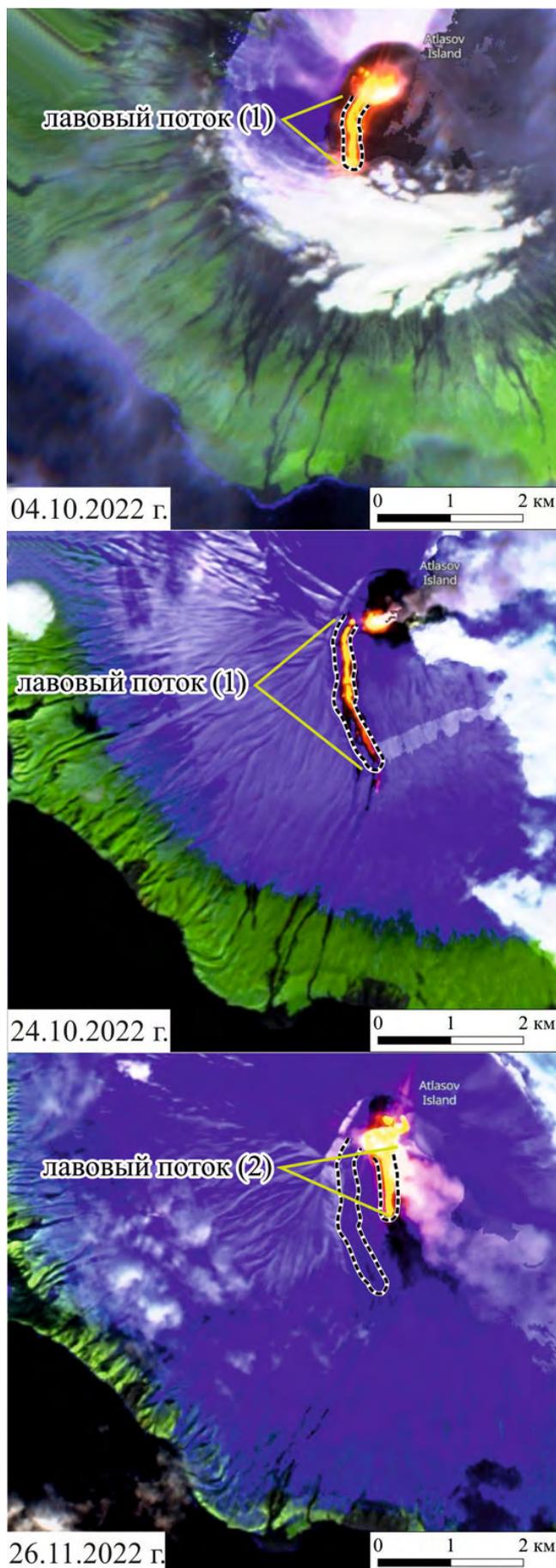


Рис. 2. Хронология эксплозивной активности влк. Алаид в период с сентября по ноябрь 2022 г. (по спутниковым данным NOAA-18/19 (AVHRR/POES), Terra и Aqua (MODIS), SuomiNPP и JPSS-1 (VIIRS) и Himawari-8/9).

Fig. 2. Chronology of the explosive activity of the Alaid volcano in the period from September till November 2022 (according to satellite data of NOAA-18/19 (AVHRR/POES), Terra and Aqua (MODIS), SuomiNPP and JPSS-1 (VIIRS) and Himawari-8/9).



тивные шлейфы распространялись главным образом на восток-юго-восток, восток и юго-восток. Поступление пепла фиксировалось до 7:30 UTC 16 октября 2022 г. Кроме того, 16 и 22 октября с о. Парамушир наблюдалось сильное свечение над лавовым потоком и кратером (по фотоматериалам телеграмм-канала https://t.me/elena_from_kurils). Примечательно, что в эти же дни синхронно с Алаидом эксплозивно извергались вулканы Чикурачки и Эбеко (о. Парамушир) (рис. 1), активность которых рассмотрена ниже. Подобная картина нетривиальна и за время наших наблюдений отмечена впервые.

23–26 октября зафиксировано 5 пепловых выбросов на высоту 3–3.2 км н.у.м. (VAAC Токио, Himawari-8/9). Пепловые шлейфы от них перемещались на восток-юго-восток, юго-восток, северо-восток и фиксировались на удалении до ~200 км от вулкана.

Протяженность лавового потока к этому времени достигала 2.6 км (данные Sentinel-2 от 24.10.2022) (рис. 3). В последующие дни, по имеющейся спутниковой информации, перемещение лавы не фиксировалось. На основе анализа данных инфракрасного излучения (Landsat 8/9, Sentinel-2, Suomi NPP, Aqua/Terra и др.) мы предполагаем, что поступление новых порций и активное продвижение лавового потока прекратилось еще примерно в середине октября 2022 г. С 16 по 21 октября термальные аномалии перестали фиксироваться, а те, что регистрировались позже, в период с 21 октября по 2 ноября, по своей мощности были существенно ниже (10^7 ватт) значений предыдущей активной эффузивной фазы (10^9 ватт с 24 сентября по 16 октября).

Излияние лавы спровоцировало формирование вулканических селей – лахаров, достигших побережья острова и образовавших конус выноса, который частично отложился за пределами береговой линии и впоследствии трансформировался в пляж. Максимальное приращение новообразованной суши составило 129 тыс. м² (19.10.2022). К началу следующего года оно сократилось более чем на треть – до 75 тыс. м² (2.01.2023 г.).

Рис. 3. Лавовые потоки влк. Алаид, излившиеся в октябре–ноябре 2022 г., на спутниковых снимках Sentinel-2 (false color (urban), каналы – 12, 11, 4).

Fig. 3. Alaid volcano lava flows that erupted in October–November 2022 on Sentinel-2 satellite images (false color (urban), channels – 12, 11, 4).

К концу октября 2022 г. активность вулкана существенно снизилась. Интенсивность термальной активности в районе кратерной зоны к 20 ноября достигла фонового уровня. До конца месяца никаких признаков возобновления вулканической активности не обнаруживалось.

25 ноября Алайд вновь активизировался: по спутниковым данным (Sentinel-2, Terra/Aqua и др.), с 13:20 UTC регулярно стали наблюдаться интенсивные термальные аномалии. В 19:40 UTC зафиксирован пепловый выброс на высоту 4–4.5 км н.у.м. (Himawari-8/9) (рис. 2). Эруптивный шлейф от него распространялся главным образом на юго-восток и прослеживался на расстоянии ~200 км. Около 23:00 UTC (26 ноября, ~10:00 утра по сахалинскому времени) житель г. Северо-Курильск С.П. Лакомов во время лыжного похода по северной оконечности о. Парамушир наблюдал проявление эруптивной активности на южном склоне Алайда. У фронтальной части лавового потока происходили фреатические парогазовые выбросы, возникавшие в результате контакта раскаленной лавы со снегом. В 02:00 UTC, по данным Himawari-8/9, был зарегистрирован выброс, пепловое облако от которого перемещалось в восток-юго-восточном и юго-восточном направлениях.

Начиная с 26 ноября мощность инфракрасного излучения резко выросла (Suomi NPP, Terra/Aqua), достигнув максимальных 10^9 ватт. 26 ноября на снимках Sentinel-2 был идентифицирован новый лавовый поток протяженностью ~1 км, сошедший также по южному склону конуса (рис. 3). После 28 ноября мощность теплового излучения резко снизилась.

Слабые термальные аномалии на вулкане отмечались в конце ноября и в течение декабря (спутниковые данные Landsat 8/9, Sentinel-2). 1 декабря 2022 г. эффузивно-эксплозивное извержение влк. Алайд закончилось.

Вулкан Эбеко

Действующий вулкан Эбеко (абс. выс. 1156 м) расположен в северной части о. Парамушир, в ~7 км к запад-северо-западу от г. Северо-Курильск (численность населения – 2439 чел на 1.01.2023 г.) (рис. 1). Его вытянутая с севера на юг постройка сформиро-

вана несколькими слившимися между собой разновозрастными конусами, насаженными на северную часть хр. Вернадского [7, 12, 18]. Вершина влк. Эбеко увенчана тремя крупными, соприкасающимися между собой кратерами (Северный, Средний, Южный). Северный кратер осложнен молодым, формирующимся с 2017 г., кратером Корбута (Новый Северный кратер), в котором локализованы современные активные жерла [12, 13, 19].

По частоте и продолжительности извержений влк. Эбеко является самым активным вулканом на Курильских островах. Исторические извержения вулкана происходили в 1793, 1833–1834, 1859, 1934–1935, 1963, 1965, 1967–1971, 1987–1991, 2005, 2009, 2010–2011 гг.

С октября 2016 по декабрь 2021 г. на влк. Эбеко происходило длительное эксплозивное извержение, протекающее в форме регулярных пепло-газовых взрывов фреатической и фреато-магматической природы [9, 12, 13]. Высота выбросов составляла 1–3 (до 5.5) км н.у.м., протяженность пепловых шлейфов, как правило, не превышала 10 км. Суммарно за этот период произошло не менее 3000 эксплозивных событий (600–800 в год), в отдельные месяцы их регистрировалось более 100 (в дневное время и при удовлетворительной видимости). В окрестностях Северо-Курильска регулярно отмечались пеплопады и регистрировалось превышение предельно допустимых концентраций SO_2 и H_2S .

Начиная с сентября 2021 г. наблюдалось заметное снижение эксплозивной активности вулкана. Всего за период с сентября по декабрь зафиксировано 28 выбросов, из них 1 на высоту 3 км н.у.м., остальные – до 3 км. В декабре 2021 г. было зафиксировано 2 слабых выброса, последний из которых произошел 19 декабря. Деятельность вулкана с декабря 2021 по май 2022 г. характеризовалась проявлением преимущественно парогазовой эмиссии различной интенсивности, редко происходили слабые фреатические взрывы на высоту 1.5–2 км н.у.м.: январь (1), февраль (16), март (5), апрель (10), май (8), июнь (18). Это был наиболее продолжительный период покоя за все время видеонаблюдений за влк. Эбеко (с 2017 г.). В декабре в кратере Корбута образовалось озеро размером 61×80 м [12,

13], длительное существование которого в условиях напряженной эксплозивной активности было невозможно. Судя по анализу спутниковых снимков Sentinel-2, кратерное озеро сохранялось вплоть до середины июня.

С июня 2022 г. начался новый этап эруптивной активности влк. Эбеко: парогазовые выбросы постепенно сменились пепло-газовыми, и к концу июня вулкан полностью перешел в «рабочий» режим. В течение июня зарегистрировано 29 пепловых выбросов, из них 1 на высоту 3 км н.у.м. (рис. 4, 5 а). Кроме того, усиление эксплозивной активности влк. Эбеко привело к исчезновению озера в кратере Корбута.

К июлю эксплозивная активность вулкана достигла пиковых значений – было зафиксировано 174 события (в 51 из них – высота 3 км и более н.у.м.), что стало максимальным значением за весь период видеонаблюдений, выполняемых с октября 2017 г. В последующие месяцы деятельность вулкана также характеризовалась высокой интенсивностью: август – 137 выбросов и в 69 из них высота 3 км и более н.у.м.; сентябрь – 120 и 61; октябрь – 72 и 40; декабрь – 29 и 15 соответственно (рис. 4).

Всего за 7 мес. деятельности влк. Эбеко (с июня по декабрь 2022 г.) зафиксировано (в светлое время суток и при хороших погодных условиях) более 600 пепловых выбросов, из них 253 на высоту 3 км и более н.у.м., что сопоставимо с количеством эксплозий, происшедших на протяжении прошлых лет за полные 12 мес. (2018 г. – 805; 2019 – 561; 2020 –

550; 2021 г. – 611). Это свидетельствует о высокой активности вулкана после перерыва, наблюдавшегося с декабря 2021 по май 2022 г. Наиболее мощные выбросы отмечались в конце июля и в августе (рис. 5 б, с): 30.07.2022 (высота 5 км н.у.м. – 2 события, 5.5 км – 1),

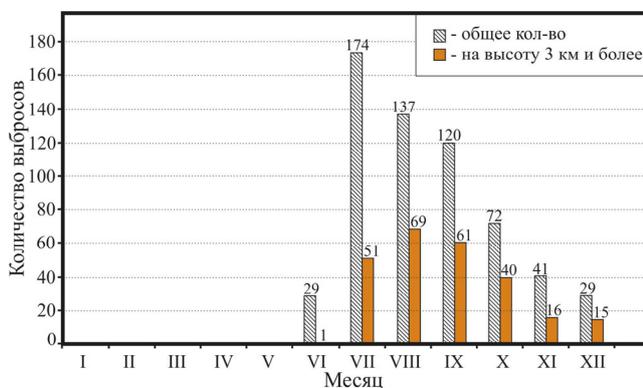


Рис. 4. Распределение общего количества выбросов и выбросов на высоту 3 км и более на влк. Эбеко в 2022 г. (по данным камеры видеонаблюдения).

Fig. 4. Distribution of total explosions and explosions above 3 km a.s.l. at Ebeko volcano in 2022 (according to video surveillance).

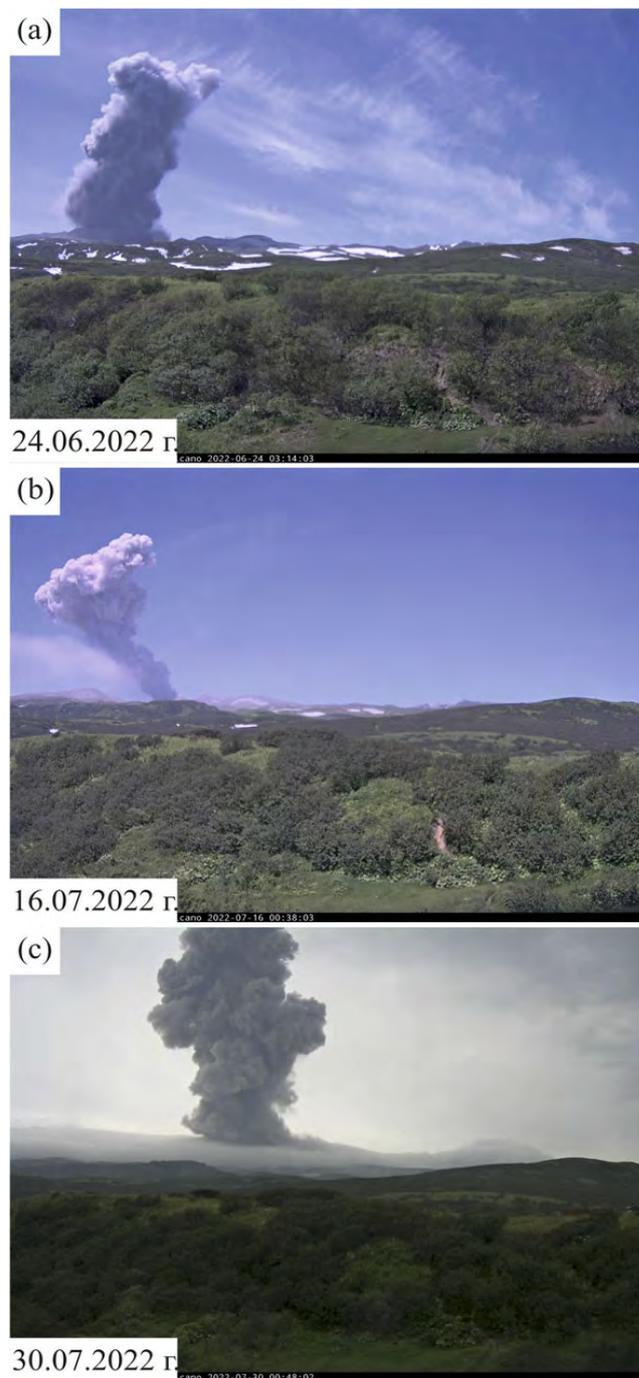


Рис. 5. Эксплозивная активность влк. Эбеко в 2022 г. Примеры пепловых выбросов, зафиксированных камерой видеонаблюдения. Высота выбросов на снимках: а – 4,5, б – 4, с – 5 км н.у.м.

Fig. 5. Explosive activity of Ebeko volcano in 2022. Examples of volcanic explosions recorded by a video surveillance camera.

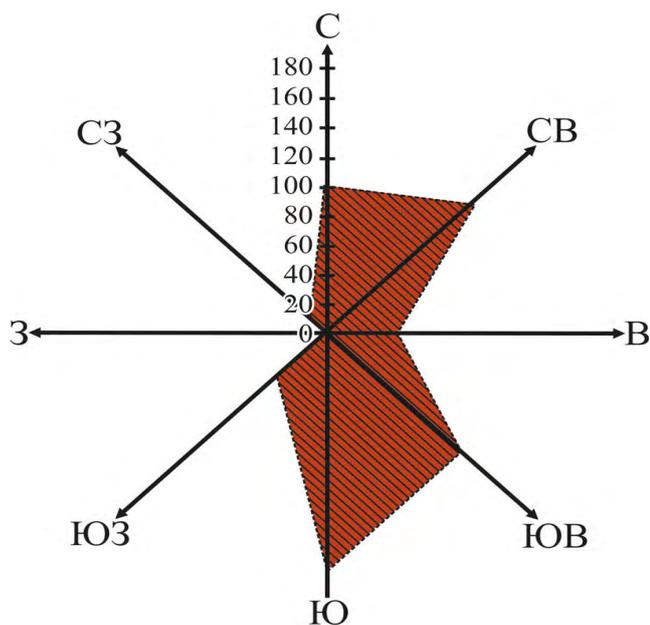


Рис. 6. Основные направления распространения пепловых облаков от влк. Эбеко в 2022 г. На оси отмечено количество наблюдавшихся выбросов.

Fig. 6. The main directions of distribution of ash clouds from Ebeko volcano in 2022. The number of observed emissions is marked on the axis.

03.08.2022 (5 км – 1), 19.08.2022 (5 км – 1). События с высотой выброса 4-4.5 км н.у.м. наблюдались с июня по декабрь: июнь – 1 событие, июль – 4, август – 13, сентябрь – 18, октябрь – 10, ноябрь – 3, декабрь – 2.

Протяженность пепловых шлейфов, как и в прошлые годы, составляла в среднем 5–10 км, распространялись они главным образом на юг, юго-восток, северо-восток и север (рис. 6). Дважды, по данным KVERT, пепловые шлейфы имели протяженность 65 и 110 км (17–18 августа и 1 ноября 2022 г. соответственно) (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=33-2022>; <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2022-11-01>). Периодически отмечались слабые термальные аномалии. На территории Северо-Курильска регулярно наблюдались пеплопады.

Вулкан Чикурачки

Преимущественно базальтовый стратовулкан Чикурачки (1816 м) «насажен» на северную оконечность хр. Карпинского, трассирующего южную часть о. Парамушир (Северные Курильские острова), в 60 км к юго-западу от г. Северо-Курильск (рис. 1). Чикурачки – один из активнейших вулканов Курильских островов и самый высокий вулкан о. Параму-

шир. На его вершине расположен неглубокий кратер, в юго-западной части которого находится колодеобразная бокка [6], являющаяся центром последних извержений вулкана.

Исторические извержения влк. Чикурачки происходили в 1853–1859, 1958, 1961, 1964, 1973, 1986, 2002, 2003, 2005, 2007, 2008, 2015, 2016 гг. [7, 20–22]. Преобладали умеренные и слабые (VEI 1-2) вулканские и стромболианские извержения; дважды, в 1853 и 1986 гг., имели место мощные плинианские события – исключительно редкое явление для вулкана, продуцирующего магмы основного состава [6, 9].

В 2022 г., после 6 лет покоя, Чикурачки вновь активизировался. По спутниковым и визуальным данным в течение года было зафиксировано не менее 5 эпизодов эксплозивной активности, продолжительность каждого из которых варьировала от 2 до 13 дней (рис. 7): 1) 30 января – 3 февраля; 2) 23–24 июня; 3) 30 июня – 1 июля; 4) 21 августа – 2 сентября; 5) 13–20 октября [4].

В период с 30 января по 3 февраля 2022 г. На вулкане произошло не менее 8 парогазовых и пепловых выбросов на высоту 2.5–5 км н.у.м. (рис. 7), происходивших на фоне постоянного интенсивного выноса парогазовой смеси с периодическим поступлением пеплового материала. Пепловые шлейфы и облака распространялись преимущественно в юго-западном, западном, южном и юго-восточном направлениях до 250 км от вулкана. Максимальная площадь пеплового шлейфа отмечена 2 февраля – 9460 км². Зонай интенсивного пеплопада на о. Парамушир стал сектор к юго-юго-востоку от вулкана площадью ~310 км².

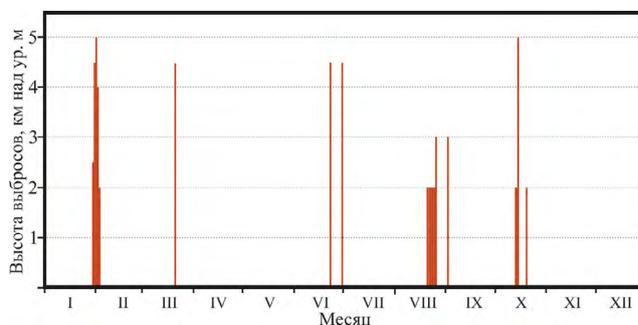


Рис. 7. Хронология эксплозивной активности влк. Чикурачки в 2022 г. (по данным VAAC Токио, KVERT, SVERT).

Fig. 7. Chronology of explosive activity of Chikurachki volcano in 2022 (according to data of VAAC Tokyo, KVERT, SVERT).

23–24 июня 2022 г. 23 июня в 20:00 UTC по космическим снимкам Himawari-8 был идентифицирован пепловый выброс на высоту 4–4.5 км н.у.м. (рис. 7), после которого началась интенсивная пепло-газовая эмиссия. К 22:00 UTC пепловый шлейф, распространявшийся в юго-восточном направлении, имел протяженность 48 км и площадь 386 км². В ~00:00 UTC поступающий из жерла пепловый материал начал менять направление, распространяясь сначала на восток, а позже на восток-северо-восток. Максимальная площадь пеплового облака по состоянию на 07:10 UTC 24 июня составляла 16 638 км² (по данным Himawari-8). По спутниковым данным поступление материала отслеживалось до 09:20 UTC 24 июня.

30 июня – 1 июля 2022 г. 30 июня в 01:00 UTC произошел одиночный пепловый выброс умеренной силы на высоту 4–4.5 км н.у.м. (рис. 7), зарегистрированный ВААС Токио по спутниковым данным Himawari-8. Пепловое облако сначала перемещалось в юго-западном, а затем в запад-юго-западном направлении на 180 км от вулкана. 30 июня в районе вулкана была отмечена термальная аномалия.

По данным KVERT, извержение продолжалось до 00:30 UTC 1 июля 2022 г. (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2022-61>).

21 августа – 2 сентября 2022 г. 21 августа между 16:30 и 18:00 ч по камчатскому времени (5:30–7:00 UTC), по сообщениям очевидцев, на влк. Чикурачки наблюдался небольшой пепловый выброс (рис. 7), после чего отмечалась слабая вулканская активность. Пепло-газовый шлейф серого цвета поднимался на ~200–250 м над кратером. 22–25 августа взрывная деятельность вулкана, по информации KVERT, продолжилась: на спутниковых снимках периодически наблюдались эруптивные облака и пепловые шлейфы (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=34-2022>). Их высота составляла ~2 км н.у.м., а протяженность 20 км. В течение 25–26 августа в районе кратера отмечались термальные аномалии.

26 августа вулкан характеризовался проявлением постоянной пепло-газовой эмиссии (~300 м над кратером). 27 августа наблюдалось интенсивное выделение пепла, клубящегося над кратером и образующего протяженный эруптивный шлейф (рис. 8). Его цвет, по словам очевидцев, заметно изменился – с



Рис. 8. Взрывная активность влк. Чикурачки, 26.08.2022. Вид с юго-запада. На переднем плане слева южный склон влк. Фусса. Фото Е.К. Горанько

Fig. 8. Explosive activity of Chikurachki volcano, August 26, 2022. Photo taken from the southwest, in the foreground on the left is the southern slope of the Fussa volcano. Photo by E.K. Goranko

преимущественно серого (21, 26 августа) до коричнево-серого (днем 27 августа). В последующие дни по спутниковым данным никаких признаков активности не регистрировалось.

2 сентября в 04:30 UTC на снимках Himawari-8 идентифицирован пепловый выброс на высоту 3 км н.у.м. (рис. 7), шлейф от которого простирался в юго-юго-западном направлении на 50 км от вулкана. После этого никаких проявлений эксплозивной активности замечено не было. 4 сентября на вулкане отмечалась слабая термальная аномалия.

13–20 октября 2022 г. 13–14 октября зафиксировано два пепловых выброса на высоту ~2 км н.у.м. (спутниковые данные Aqua MODIS, Suomi NPP (VIIRS)). 15 октября эксплозивная активность Чикурачки усилилась: в 10:50 UTC произошел слабый пепловый выброс (~2 км н.у.м., удаление шлейфа на 10–15 км в восток-юго-восточном направлении). Спустя 3 ч, в 14:00 UTC, последовал следующий, более сильный взрыв с выбросом пепла на высоту 4.5–5 км (данные Himawari-8) (рис. 7). После этого наблюдалась фаза интенсивной эксплозивной активности с непрерывным поступлением пеплового материала на высоту ~5 км н.у.м. По состоянию на 08:03 UTC (NOAA-19) общая площадь пеплового облака составляла 25 408 км². Поступление материала фиксировалось примерно до 15:30 UTC 16 октября.

20 октября зарегистрированы два слабых парогазовых выброса с примесью пепла на высоту до 2 км н.у.м. В последующие дни на вулкане отмечалась умеренная парогазовая активность.

Вулкан Чирикотан

Вулкан Чирикотан (абс. выс. 724 м) расположен в западной вулканической зоне, к западу от островов Экарма и Шиашкотан (рис. 1). Его постройка представляет собой одиночный остров-вулкан с высотой надводного основания 724 м н.у.м. и крупным (диаметр ~800 м) кратером, открытым на юго-запад. Подводная часть вулкана, по данным [7], достигает 2500 м, т.е. общая высота вулкана составляет ~3000 м.

Исторические извержения вулкана происходили в 1760, 1878–1889(?), 1955(?), 1979–1980, 2004, 2013–2017, 2021 гг. [7, 22–24].

22 марта 2022 г. наблюдалась слабая эксплозивная активизация влк. Чирикотан: в 13:20 UTC зафиксирован пепловый выброс на высоту ~3 км н.у.м. (VAAC Токио). Образовавшееся в результате единичной эксплозии пепловое облако площадью 110 км² не образовывало протяженного пеплового шлейфа. По спутниковым снимкам VIIRS NPP оно прослеживалось на удалении до 230 км от вулкана (по состоянию на 15:42 UTC), перемещаясь преимущественно в восток-северо-восточном направлении.

Заключение

В 2022 г. вулканическая активность на Курильских островах была повышенной.

На влк. Алаид в период с 15 сентября по 1 декабря 2022 г. происходило умеренное эффузивно-эксплозивное извержение вершинного кратера. На основе спутниковых и визуальных данных (материалы SVERT, KVERT, VAAC Токио) установлено, что по южному склону вулкана излилось два лавовых потока протяженностью 2.6 и 1 км и произошло не менее 15 выбросов на высоту от 2.5 до 6 км н.у.м. Пепловые шлейфы распространялись в основном в юго-восточном и восток-юго-восточном направлениях, их максимальная протяженность достигала 300–500 км. Извержение представляло опасность для местных авиалиний. Кроме того, изливание лавы спровоцировало формирование вулканических селей – лавхаров, которые достигали побережья острова. Сформированный ими конус выноса частично отложился за пределами береговой линии, вызвав увеличение площади островной суши.

Вулкан Чикурачки с января по октябрь 2022 г. находился в состоянии повышенной активности. По спутниковым данным и результатам визуальных наблюдений было зафиксировано 5 эпизодов эксплозивной активности, продолжительность каждого из которых составляла от 2 до 13 дней: 30 января – 3 февраля, 23–24 июня, 30 июня – 1 июля, 21 августа – 2 сентября, 13–20 октября. По своему характеру и продолжительности все наблюдавшиеся события были аналогичны предыдущим извержениям вулкана, среди которых преобладали слабые и умеренные извержения

вулканского типа: наблюдались как единичные выбросы, так и серии эксплозий на высоту 2–5 км н.у.м., а также периоды относительно стабильной эмиссии пепло-газовой смеси различной интенсивности. Пепловые шлейфы и облака распространялись преимущественно в восточном, южном, юго-восточном, северо-восточном и юго-западном направлениях, их протяженность достигала 790 км, а площадь 25 408 км².

Вулкан Эбеко, с декабря 2021 г. находившийся в состоянии покоя, в июне 2022 г. возобновил характерную для последних лет его деятельности интенсивную вулканскую активность, характеризующуюся частыми пепловыми выбросами. Всего за 7 мес. активности (с июня по декабрь 2022 г.) зафиксировано более 600 пепловых выбросов, их них 253 на высоту 3 км и более н.у.м.). В июле зафиксировано 174 выброса (из них 51 – на высоту 3 км и более н.у.м.) – максимальное значение за весь период видеонаблюдений, выполняемых с октября 2017 г. Протяженность пепловых шлейфов не превышала 5–10 км, распространялись они главным образом на юг, юго-восток, северо-восток и север. Дважды, по данным KVERT, наблюдались пепловые шлейфы, имевшие протяженность 65 и 110 км.

На влк. Чиринкотан зафиксирован единственный слабый пепловый выброс (3 км н.у.м.). Пепловое облако от него распространялось в восток-северо-восточном направлении.

Наблюдавшаяся в октябре 2022 г. синхронная активность сразу трех вулканов – Алайд (о. Атласова), Чикурачки и Эбеко (о. Парамушир) – крайне редкое явление, отмечена впервые за время наших наблюдений.

Список литературы

1. Лупян Е.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. **2015**. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 12(5): 263–284.
2. Гордеев Е.И., Гирина О.А., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Уваров И.А., Бурцев М.А., Романова И.М., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Королев С.П., Верхотуров А.Л. **2016**. Информационная система VolSatView для решения задач мониторинга вулканической активности Камчатки и Курил. *Вулканология и сейсмология*, 6: 1–16. <https://doi.org/10.7868/S0203030616060043>
3. Ефремов В.Ю., Гирина О.А., Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Маневич А.Г., Матвеев А.М., Мельников Д.В., Прошин А.А., Сорокин А.А., Флитман Е.В. **2012**. Создание информационного сервиса «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил». *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 9(5): 155–170.
4. Дегтерев А.В., Чибисова М.В. **2022**. Эксплозивная активность вулкана Чикурачки в январе–октябре 2022 г. (о. Парамушир, Северные Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 6(4): 328–338. <https://doi.org/10.30730/grtz.2022.6.4.328-338>
5. Дегтерев А.В., Чибисова М.В., Романюк Ф.А. **2023**. Эффузивно-эксплозивное извержение вулкана Алайд в 2022 г. (о. Атласова, Северные Курильские острова). *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 2(58): 17–28. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-2-58-17-28>
6. Белоусов А.Б., Белоусова М.Г., Гришин С.Ю., Крестов П.В. **2003**. Исторические извержения вулкана Чикурачки (о. Парамушир, Курильские острова). *Вулканология и сейсмология*, 3: 15–34. EDN: ONTZGR
7. Горшков Г.С. **1967**. *Вулканизм Курильской островной дуги*. М.: Наука, 287 с.
8. Диденко А.Н., Рашидов В.А., Марков Г.П., Трусенко М.С., Петрова В.В., Аникин Л.П. **2021**. Петромагнитная и геохимическая характеристики вулканических извержений 2015–2016 гг. вулкана Алайд, Курильская островная дуга. *Вулканология и сейсмология*, 1: 3–21. doi:10.31857/S0203030621010028
9. Belousov A., Belousova M., Auer A., Walter T.R., Kotenko T. **2021**. Mechanism of the historical and the ongoing Vulcanian eruptions of Ebeko volcano, Northern Kuriles. *Bull. of Volcanology*, 83(4). <https://doi.org/10.1007/s00445-020-01426-z>
10. Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусов А.А. **2006**. Подводный вулкан Григорьева (Курильская островная дуга). *Вулканология и сейсмология*, 5: 17–26. EDN: HVKXET
11. Котенко Т.А. **2022**. Лахары на о. Атласова в сентябре–октябре 2022 г. (Курильские острова). *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*, 4(56): 117–122. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-4-56-117-122>
12. Котенко Т.А., Смирнов С.З., Тимина Т.Ю. **2023**. Активность вулкана Эбеко в 2022 г.: Механизм и продукты извержения. *Вулканология и сейсмология*, 4: 3–22.

13. Котенко Т.А., Котенко Л.В. **2022**. Новое озеро в кратере Корбута вулкана Эбеко (о. Парамушир, Курильские острова). *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*, 1(53): 5–11. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-1-53-5-11>; EDN: DAIEMV
14. Мельников Д.В., Маневич А.Г., Гирина О.А. **2018**. Динамика извержения вулкана Алаид в 2012 и 2015–2016 гг. по данным методов дистанционного зондирования. В кн.: *Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы региональной конф., посвящ. Дню вулканолога, 29–30 марта 2018 г.* Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, с. 68–71.
15. Рашидов В.А., Малик Н.А., Фирстов П.П. и др. **2012**. Активизация вулкана Алаид (Курильские острова) в 2012 году. *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*, 2(20): 9–15. EDN: PWRAMD
16. Федотов С.А., Иванов Б.В., Флеров Г.Б. и др. **1982**. Изучение извержения вулкана Алаид (Курильские острова) в 1981 г. *Вулканология и сейсмология*, 6: 9–27.
17. Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Будников В.А. **1992**. Активность вулкана Эбеко в 1987–1991 гг.: характер извержений, особенности их продуктов, опасность для г. Северо-Курильск. *Вулканология и сейсмология*, 5–6: 21–33.
18. Котенко Т.А., Сандимирова Е.И., Котенко Л.В. **2018**. Извержения вулкана Эбеко (Курильские острова) в 2016–2017 гг. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(37): 32–42. EDN: YUMKHM
19. Котенко Т.А., Котенко Л.В., Шапарь В.Н. **2007**. Активизация вулкана Эбеко в 2005–2006 гг. (остров Парамушир, Северные Курильские о-ва). *Вулканология и сейсмология*, 5: 3–13.
20. Гирина О.А., Малик Н.А., Котенко Л.В. **2008**. Активность вулкана Чикурачки (о. Парамушир, Северные Курилы) в 2002–2007 гг. по данным KVERT. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(11): 67–73. EDN: IUKFGF
21. Гирина О.А., Маневич А.Г., Нуждаев А.А., Сорokin А.А. **2016**. Извержение вулкана Чикурачки (о. Парамушир, Северные Курилы) в 2016 г. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 13(2): 235–239. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-2-235-239>
22. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В. **2017**. Активность вулканов Курильских островов в 2016 г. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(33): 83–88. EDN: YIQXSF
23. Rybin A.V., Karagusov Y.V., Izbekov P.E. et al. **2004**. Monitoring of active volcanoes of the Kurile Islands: Present and future. In: *The 2nd International Conference on Volcanic Ash and Aviation Safety, June 21–24*. Washington, USA, p. 55–61.
24. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В. **2017**. Активность вулкана Чиринкотан (о. Чиринкотан, Северные Курильские острова) в 2013–2016 гг. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 14(4): 76–84. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-4-76-84>

References

1. Loupian E.A., Bourtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskiy A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Suchugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A. **2015**. IKI RAS Center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 12(5): 263–284. (In Russ.).
2. Gordeev E.I., Girina O.A., Lupyan E.A., Sorokin A.A., Kramareva L.S., Efremov V.Yu., Kashnitskii A.V., Uvarov I.A., Burtsev M.A., Romanova I.M., Mel'nikov D.V., Manevich A.G., Korolev S.P., Verkhoturov A.L. **2016**. The VolSatView information system for monitoring of the volcanic activity in Kamchatka and the Kuril Islands. *J. of Volcanology and Seismology*, 10(6): 382–394. <https://doi.org/10.1134/s074204631606004x>
3. Efremov V.Yu., Girina O.A., Kramareva L.S., Lupyan E.A., Manevich A.G., Matveev A.M., Mel'nikov D.V., Proshin A.A., Sorokin A.A., Flitman E.V. **2012**. Creating an Information Service «Monitoring of Active Volcanoes of Kamchatka and the Kuril Islands». *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 9(5): 155–170. (In Russ.).
4. Degterev A.V., Chibisova M.V. **2022**. The explosive activity of Chikurachki volcano in January–October 2022 (Paramushir Island, Northern Kuriles). *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 6(4): 328–338. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.328-338>
5. Degterev A.V., Chibisova M.V., Romanyuk F.A. **2023**. Explosive-effusive eruption of Alaid volcano in 2022 (Atlasova Island, northern Kuril Islands). *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 2(58): 17–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-2-58-17-28>
6. Belousov A.B., Belousova M.G., Grishin S.Yu., Krestov P.V. **2003**. The historical eruptions of Chikurachki volcano. Paramushir I., Kuril Is. *Volcanology and Seismology*, 3: 15–34. (In Russ.). EDN: ONTZGR
7. Gorshkov G.S. **1967**. [*Volcanism of the Kuril island arc*]. Moscow: Nauka, 287 p. (In Russ.). URL: http://repo.kscnet.ru/156/1/Gorshkov_1967.pdf (accessed 15.10.2023).
8. Didenko A.N., Rashidov V.A., Markov G.P., Trusenko M.S., Petrova V.V., Anikin L.P. **2021**. Petro-magnetic and geochemical descriptions of volcanics discharged by Alaid volcano, Kuril Islands, in 2015–2016. *J. of Volcanology and Seismology*, 15(1): 1–18. <https://doi.org/10.1134/S0742046321010097>
9. Belousov A., Belousova M., Auer A., Walter T.R., Kotenko T. **2021**. Mechanism of the historical and the ongoing Vulcanian eruptions of Ebeko volcano, Northern Kuriles. *Bull. of Volcanology*, 83(4). <https://doi.org/10.1007/s00445-020-01426-z>

10. Blokh Yu.I., Bondarenko V.I., Rashidov V.A., Trusov A.A. **2006**. The Grigoriev submarine volcano, Kuril island arc. *Volcanology and Seismology*, 5: 17–26. (In Russ.). EDN: HVKXET
11. Kotenko T.A. **2022**. Lahars on Atlasov island in September–October 2022 (Kuril Islands). *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 4(56): 117–122. (In Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-4-56-117-122>
12. Kotenko T.A., Smirnov S.Z., Timina T.Yu. **2023**. The 2022 Activity of Ebeko Volcano: The mechanism and ejecta. *Volcanology and Seismology*, 17(4): 259–277. <https://doi.org/10.1134/S0742046323700264>
13. Kotenko T.A., Kotenko L.V. **2022**. A new lake in the Korbut Crater on Ebeko Volcano, Paramushir, Kuril Islands. *Vestnik KRAUNTS, Nauki o Zemle*, 1(53): 5–11. (In Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-1-53-5-11>; EDN: DAIEMV
14. Melnikov D.V., Manevich A.G., Girina O.A. **2018**. Dynamics of the Alaid volcano eruption in 2012 and 2015–2016 according to remote sensing methods. In: *Volcanism and related processes: Proceedings of the regional conf. ded. to the Day of the Volcanologist, March 29–30, 2018*. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, p. 68–71. (In Russ.).
15. Rashidov V.A., Malik N.A., Firstov P.P. et al. **2012**. [Activation of the Alaid volcano (Kuril Islands) in 2012]. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 2(20): 9–15. (In Russ.). EDN: PWRAMD
16. Fedotov S.A., Ivanov B.V., Flerov G.B. et al. **1982**. The study of the Alaid Volcano eruption, Kuril Islands during 1981. *Vulkanology and Seismology*, 6: 9–27. (In Russ.).
17. Menyailov I.A., Nikitina L.P., Budnikov V.A. **1992**. Activity of Ebeko volcano in 1987–1991: style of eruptions, characteristics of their products and hazard for Severo-Kurilsk town. *Volcanology and Seismology*, 5–6: 21–33. (In Russ.).
18. Kotenko T.A., Sandimirova E.I., Kotenko L.V. **2018**. Eruptions of the Ebeko volcano (Kuril Islands) in 2016–2017. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1(37): 32–42. (In Russ.). EDN: YUMKHM
19. Kotenko T.A., Kotenko L.V., Shapar' V.N. **2007**. Increased activity on Ebeko Volcano, Paramushir I., North Kurils in 2005–2006. *J. of Volcanology and Seismology*, 1(5): 285–295. <https://doi.org/10.1134/s0742046307050016>
20. Girina O.A., Malik N.A., Kotenko L.V. **2008**. 2002–2007 activity of Chikurachki volcan (Paramushir Island, Northern Kuriles) based on KVERT data. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1(11): 67–73. (In Russ.). EDN: IUKFGF
21. Girina O.A., Manevich A.G., Nuzhdaev A.A., Sorokin A.A. **2016**. 2016 explosive eruption of Chikurachki volcano (Paramushir Island, Northern Kuriles). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 13(2): 235–239. (In Russ.).
22. Rybin A.V., Chibisova M.V., Degterev A.V. **2017**. Activity of the Kurile Islands volcanoes in 2016. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1(33): 83–88. (In Russ.). EDN: YIQXSF
23. Rybin A.V., Karagusov Y.V., Izbekov P.E. et al. **2004**. Monitoring of active volcanoes of the Kurile Islands: Present and future. In: *The 2nd International Conference on Volcanic Ash and Aviation Safety, June 21–24*. Washington, USA, p. 55–61.
24. Rybin A.V., Chibisova M.V., Degterev A.V. **2017**. Activity of Chirinkotan volcano (Chirinkotan Isl., the Northern Kuriles) in 2013–2016. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 14(4): 76–84. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-4-76-84>

Об авторах

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

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

About the Authors

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

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

Поступила 25.09.2023

Принята к публикации 25.10.2023

Received 25 September 2023

Accepted 25 October 2023

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



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

К 50-летию Тихоокеанского океанологического института
им. В.И. Ильичева ДВО РАН

УДК 550.84

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.4.439-447>
<https://www.elibrary.ru/qdurk>

Научное сотрудничество Вьетнамской академии наук и технологий (ВАНТ) и ТОИ ДВО РАН*

Scientific cooperation between the Vietnam Academy of Science and Technology (VAST) and POI FEB RAS

Сотрудничество Вьетнамской академии наук и технологий (ВАНТ) и Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН (ТОИ ДВО РАН) в области морских исследований и изучения Южно-Китайского моря началось более 40 лет назад, в 1974 г., после окончания вьетнамской войны и образования единой Социалистической Республики Вьетнам (СРВ). При сотрудничестве с советскими учеными Вьетнам впервые получил возможность создания и реализации крупной комплексной долгосрочной программы по исследованию окружающей среды и природных ресурсов своих морских акваторий с использованием современного оборудования. Тихоокеанскому океанологическому институту им. В.И. Ильичева принадлежит ведущая роль в проведении научных геолого-геофизических и океанологических исследований Южно-Китайского моря.

Геолого-геофизические исследования пережили период активного становления во времена СССР, тогда были определены главные цели и поставлены основные научные задачи. Экспедиционные исследования

ТОИ ДВО РАН в Южно-Китайском море начались в 70-х годах прошлого столетия. Первая экспедиция была проведена в 1975 г. под руководством д.г.-м.н. И.И. Берсенева на НИС «Первенец», она включала морские геологические работы.

С распадом Советского Союза совместное изучение Южно-Китайского моря было приостановлено, а вместе с этим ослабло сотрудничество между нашими странами в этой области.

Многолетние океанологические совместные исследования ТОИ ДВО РАН с академическими институтами Вьетнама начались в 1981 г. в рамках международного проекта «Южно-Китайское море» (1981–1985 гг.). Они включали большой комплекс гидрологических, гидрофизических, гидрохимических, геологических, геофизических, газогеохимических работ, охвативших не только воды Вьетнама, но и другие районы этого моря.

Организаторами первых геолого-геофизических исследований стали Р.Г. Кулинич (научный руководитель геолого-геофизических работ в рамках указанного проекта) и А.И. Об-

* **Для цитирования:** Научное сотрудничество Вьетнамской академии наук и технологий (ВАНТ) и ТОИ ДВО РАН. Авт.: Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С., Валитов М.Г. и др. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 4, с. 439–447. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.4.439-447>; <https://www.elibrary.ru/qdurk>

For citation: Scientific cooperation between the Vietnam Academy of Science and Technology (VAST) and POI FEB RAS. Authors: Shakirov R.B., Syrbu N.S., Valitov M.G. et al. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 4, pp. 439–447. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.4.439-447>; <https://www.elibrary.ru/qdurk>

жиров (газогеохимия), тогда кандидаты, а впоследствии доктора геолого-минералогических наук.

Экспедиционные работы выполнялись на судах ДВНЦ АН СССР (затем ДВО РАН): «Каллисто», «Академик А. Несмеянов», «Академик М. Лаврентьев», «Профессор Богоров», «Профессор Гагаринский», «Морской геофизик». Эти экспедиции в разное время возглавляли Р.Г. Кулинич, А.И. Обжиров, Ф.Р. Лихт, С.М. Николаев. Большой вклад в получение первичных данных и их анализ внесли геологи А.Н. Деркачев, А.С. Астахов, Ю.Д. Марков, О.В. Дударев, Н.А. Николаева, А.И. Бопул, И.К. Пушин и др., а также геофизики В.В. Здравенин, В.Г. Прокудин, С.В. Азьмук, Т.Н. Колпащикова, В.А. Щукин и др.

На шельфе Вьетнама и в прилегающих районах были изучены литологический состав, литохимические свойства, стратиграфия и условия формирования верхнечетвертичных осадочных отложений (А.С. Астахов, Н.В. Астахова и др.); выделены минералогические провинции, составлена схема соответствующего районирования (А.Н. Деркачев, Н.А. Николаева и др.). В районе дельты р. Меконг изучены литобиохимические маркеры осадочного материала в зоне смешения речных и морских вод (О.В. Дударев и др.). На границе шельфа и континентального склона юго-восточного Вьетнама в придонной воде обнаружены аномальные концентрации метана, водорода и углекислого газа, что послужило первым признаком нефтегазоносности подводных структур, окружающих южный Вьетнам (А.И. Обжиров и др.). На всей акватории Вьетнама выполнены площадные геофизические работы (Р.Г. Кулинич, С.М. Николаев и др.).

В результате получена детальная карта аномального гравитационного поля, на основании которой, в совокупности с другими геолого-геофизическими и газогеохимическими данными, выявлена тектономагматическая зона на границе Вьетнамского шельфа и глубоководной котловины с признаками кайнозойской и современной геодинамической активности (Р.Г. Кулинич, А.И. Обжиров и др.). Помимо этого рассчитана первая геофизическая модель земной коры всего Южно-Китайского моря (Р.Г. Кулинич и др.), на основе ко-

торой определены основные черты глубинного строения Южно-Китайского моря. В 1990-х годах активность совместных исследований существенно снизилась.

После длительного перерыва в 2006 г. по инициативе ВАНТ в Институт морской геологии и геофизики ВАНТ (ИМГГ ВАНТ) были приглашены зам. директора ТОИ ДВО РАН Р.Г. Кулинич и зав. лабораторией магнитных полей океана В.М. Никифоров для выбора направлений совместных геолого-геофизических исследований. В 2007 г. переговоры были проведены на уровне руководства – директора ТОИ ДВО РАН академика В.А. Акуличева и директора ИМГГ ВАНТ д-ра Нгуен Те Тиеп (Dr. Nguyen The Tiep). В результате был сформирован первый совместный проект новой фазы сотрудничества, который выполнялся в 2007–2008 гг. в рамках гранта РФФИ–ВАНТ (руководители Р.Г. Кулинич и Dr. Hoang Van Vuong).

В одной из первых береговых экспедиций на новом этапе сотрудничества исследовалось осолонение верхней части дельтовых отложений за счет проникновения в прибрежный разрез морских вод. Работы выполнялись методом электрической томографии в районе дельты р. Красная. В результате был построен обобщенный геоэлектрический разрез западной части дельты р. Красная на глубину до 50–80 м. Геофизические исследования показали, что геологическая структура реки представляет собой грабен, который является проводником газофлюидного потока из недр к поверхности. Этот вывод подтверждается обнаруженной в российско-вьетнамских экспедициях аномальной концентрацией метана в придонном слое воды в районе р. Красная, что характеризует наличие в этом регионе залежей углеводородов.

Выполненными работами был установлен важный для сельского хозяйства Вьетнама фактор: зоны осолонения голоценовых песков и илистых глин распространяются фронтом от береговой черты вглубь континента на расстояние до 5 км, а по сети ирригационных каналов на более чем 40 км.

Этот проект стал началом регулярных исследований геоэлектрического строения литосферы Северного Вьетнама методами электроразведки.

Новый этап российско-вьетнамских геолого-геофизических исследований начался в первую очередь благодаря энтузиазму молодых исследователей Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН и Института морской геологии и геофизики ВАНТ с участием Дальневосточного федерального университета (ДФУ), сотрудников Института геологических исследований ВАНТ, Института морских ресурсов и окружающей среды ВАНТ и других вьетнамских организаций-участников.

Для дальнейшего развития российско-вьетнамских исследований и усиления комплексных геолого-геофизических и газогеохимических работ на суше и шельфе Северного Вьетнама было решено создать совместную лабораторию, учредителями которой стали ТОИ ДВО РАН и ИМГГ ВАНТ. В 2010 г. по

поручению академика В.А. Акуличева и под руководством к.г.-м.н. Р.Б. Шакирова было подписано Соглашение о совместных исследованиях, разработано и утверждено Положение о российско-вьетнамской лаборатории по морским наукам и технологиям. Было проведено несколько семинаров и конференций, выбраны актуальные предложения для организации проектов и подачи заявок в научные фонды, опубликовано несколько статей.

Создание такой лаборатории было вызвано необходимостью усиления и дальнейшего развития научного сотрудничества указанных институтов в области геологии, геофизики, газогеохимии, прогнозной оценки углеводородных и минеральных ресурсов, а также состояния окружающей среды морской акватории и береговой зоны Вьетнама. В результате более чем десятилетней работы этой лаборатории



Визит делегации ИМГГ ВАНТ в 2010 г. во Владивосток (Россия).

Слева направо: д-р До Чием Тан (Do Chien Tang), к.г.-м.н. Ренат Шакиров (соруководитель совместной лаборатории), д-р Нгуен Те Тиеп (Nguyen The Tiep), к.г.-м.н. Валериан Никифоров, д-р До Хуи Кыонг (Do Huy Cuong), д-р Нгуен Хонг Лан (Nguyen Hong Lan). Все фото из архива ТОИ ДВО РАН

Visit of the IMGG VAST delegation in 2010 to Vladivostok (Russia).

From left to right: Dr. Do Chien Tang, Ph.D. Renat Shakirov (co-director of the joint laboratory), Dr. Nguyen The Tiep, Ph.D. Valerian Nikiforov, Dr. Do Huy Cuong, Dr. Nguyen Hong Lan. All photo from the archive of POI FEB RAS

было выполнено 12 научных проектов, проведено множество геолого-геофизических и газогеохимических береговых и прибрежных работ. Получены важнейшие результаты в области глубинного строения литосферы в тектонической зоне р. Красная, а газогеохимические методы стали новыми перспективными методами в морских и сухопутных исследованиях во Вьетнаме. Специалисты совместной лаборатории приняли участие в национальных проектах Министерства природных ресурсов и окружающей среды СРВ (Центр морской геологии и природных ресурсов Вьетнамской администрации островов и морей) по оценке потенциала ресурсов углеводородов и твердых полезных ископаемых, в серии локальных проектов по линии ДВО РАН – ВАНТ. Проведены более десяти морских экспедиций в Тонкинском заливе, на акваториях вблизи портов Нячанг и Вунгтау, глубоководные исследования в Южно-Китайском море (юго-западный суббассейн). В результате этих исследований в донных отложениях многих районов были впервые выявлены аномалии углеводород-

ных газов, гелия, водорода и сероводорода. По итогам многолетних комплексных морских и сопровождающих наземных исследований в 2021 г. издана монография сотрудников совместной лаборатории под редакцией д.г.-м.н. Р.Б. Шакирова [1], где объединены результаты российско-вьетнамских научных исследований начиная с 2011 г., когда началось активное их развитие. Монография является существенным вкладом России и Вьетнама в первую фазу Десятилетия ООН, посвященного науке об океане в интересах устойчивого развития (2021–2030 гг.).

В 2011 г. директором ИМГГ ВАНТ стал давний друг и коллега ТОИ ДВО РАН, широко известный специалист в области тектоники д-р Фунг Ван Фать (Phung Van Phach). На базе ИМГГ ВАНТ создан стационар – лабораторный корпус и помещение для проживания российских ученых. С этого момента непрерывно выполняются совместные геолого-геофизические проекты, поддержанные ДВО РАН (программа «Дальний Восток»), РФФИ, ФЦП Минобрнауки РФ, Вьетнамской академией наук



Экспедиция ТОИ ДВО РАН и ИМГГ ВАНТ на туристическом судне в бухте Халонг, 2016 г.
Expedition of POI FEB RAS and IMGG VANT on a tourist ship in Ha Long Bay, 2016.

и технологий, Министерством наук и технологий СРВ, МПР СРВ и другими. В совместную работу вовлечены университеты – ДВФУ, Ханойский университет природных ресурсов и окружающей среды, Ханойский горный университет, Ханойский национальный университет и другие. Благодаря активному содействию Dr. Phung Van Phach, в 2011–2015 гг. во Вьетнаме проведено более 10 рабочих совещаний, опубликованы сборники совместных научных публикаций. В этот период получены существенные результаты в области глубинного строения литосферы в тектонической зоне р. Красная, а перспективные газогеохимические методы используются в морских и сухопутных исследованиях во Вьетнаме.

Следующий, качественно новый период связан с участием специалистов лаборатории в проектах Центра морской геологии и природных ресурсов Вьетнамской администрации островов и морей (Министерства природных ресурсов и окружающей среды СРВ) по оценке потенциала ресурсов углеводородов и твердых полезных ископаемых, а также серии новых локальных проектов по линии ДВО РАН – ВАНТ (проекты по программе «Дальний Восток»). Эти исследования были поддержаны

директорами ТОИ ДВО РАН и ИМГГ ВАНТ В.Б. Лобановым и Do Huy Cuong, которые сами участники и руководители ряда совместных исследований. В то время были проведены несколько морских экспедиций в Тонкинском заливе, на акваториях вблизи портов Нячанг и Вунгтау, глубоководные исследования в Южно-Китайском море. Экспедиции и прибрежные работы проводились на переоборудованных морских буксирах, туристических судах, кораблях ВМФ, судах вспомогательного флота нефтегазовых предприятий, катерах. В результате этих исследований в донных отложениях многих районов были впервые выявлены аномалии углеводородных газов, гелия, водорода и сероводорода, имеющие поисковое значение [2–4].

Основным направлением геофизических исследований с 2011 г. стало изучение глубинного геоэлектрического строения тектоносферы и его связи с нефтяными месторождениями Северного Вьетнама методами магнитотеллурического и магнитовариационного зондирования. Этими работами выделены сверхглубинные разломные системы, пронизывающие всю литосферу, выявлена устойчивая корреляция их расположения с углеводородными месторождениями [5, 6].



НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 88-й рейс, 2019 г.
The RV «Akademik M.A. Lavrentiev», 88th expedition, 2019

Существенные результаты достигнуты в области газогеохимических исследований осадочных бассейнов вьетнамского шельфа и его островов (архипелаг Катба, острова Кото, Бать Лонг Ви, Фукуи и др.). Уникальные результаты получены по газогеохимии и геохимии термальных источников вдоль долины р. Красная на всем ее протяжении по вьетнамской территории [3, 7, 8]. На о. Катба – крупнейшем острове архипелага Катба в Тонкинском заливе в 2019 г. в ходе полевых работ впервые обнаружены прямые признаки наличия вулcano-магматического очага, выделена зона метаморфизма и окварцевания [9]. В ходе прибрежных исследований выявлены индикаторы проявлений турмалинов и других минералов [10].

Главным результатом совместной деятельности лаборатории стала российско-вьетнамская морская экспедиция «Комплексные геолого-геофизические и океанографические исследования в территориальных водах Вьетнама в Южно-Китайском море» на российском научно-исследовательском судне «Академик М.А. Лаврентьев», которая состоялась в конце 2019 г. (88-й рейс).



Участники экспедиции по исследованию газогеохимических особенностей термальных и минеральных проявлений северного Вьетнама, март 2019 г. Аспиранты А.О. Холмогоров (крайний слева) и А.А. Легкодимов (крайний справа).

The participants of the expedition on study the gas geochemical features of thermal and mineral manifestations of northern Vietnam, March 2019. Postgraduate Students A.O. Kholmogorov (far left) and A.A. Legkodimov (far right).

Кроме того, в период работы совместной лаборатории в Тонкинском заливе получены изотопно-газогеохимические данные, на основе которых были сделаны выводы о наличии газа и конденсата в недрах бассейна р. Красная [11–14]. В июле 2020 г. на сайте вьетнамского энергетического журнала опубликована информация об открытии в данном районе крупного газового месторождения Кен Бай (<https://vnexpress.net/doanh-nghiep-dau-khi-nao-huong-loi-tu-mo-ken-bau-4139660.html>).

В результате исследований изучено пространственное распределение гелия и водорода в отложениях осадочных бассейнов Южно-Китайского моря, а также прибрежной части Вьетнама. Выявлены закономерности распределения газогеохимических полей гелия и водорода на привьетнамской части Южно-Китайского моря, уточнен газогеохимический фон, установлен возможный генезис потока газа [7].

На основе обширного материала газо- и водопробования впервые получена картина распределения концентраций водорода и гелия в районе рифта р. Красная (Северный Вьетнам). Интенсивные линейные аномалии приурочены к рифту этой реки, а также к региональному разлому Диен Биен, с которым связаны сейсмические события с эпицентрами в провинции Диен Биен [3].

В настоящее время совместная российско-вьетнамская лаборатория по морским наукам и технологиям является динамично развивающейся творческой формой сотрудничества. Появились молодые лидеры, которые выполняют двусторонние проекты в области газогеохимии, геофизики, гидрогеологии, седиментологии и др. Исследования лаборатории расширяются за счет интеграции с научными организациями Японии [15] и Индии.

Результаты исследований, выполненных в рамках созданной лаборатории ТОИ ДВО РАН – ИМГГ ВАНТ, обусловили рост количества и уровня совместных публикаций коллектива в таких журналах, как *Marine Chemistry*, *Geotectonics*, *Water Resources*, *Marine Pollution Bul-*

letin, Доклады академии наук, Тихоокеанская геология, Литология и полезные ископаемые, Vietnam Journal of Earth Sciences, Vietnam Journal of Marine Science and Technology и др. На сегодняшний день совместная лаборатория ежегодно публикует не менее трех совместных статей в журналах из базы WoS и не менее трех в журналах ВАНТ и российских из базы РИНЦ и Scopus. Молодые вьетнамские специалисты проходят стажировку в ТОИ ДВО РАН, а российские ученые официально руководят аспирантами ВАНТ.

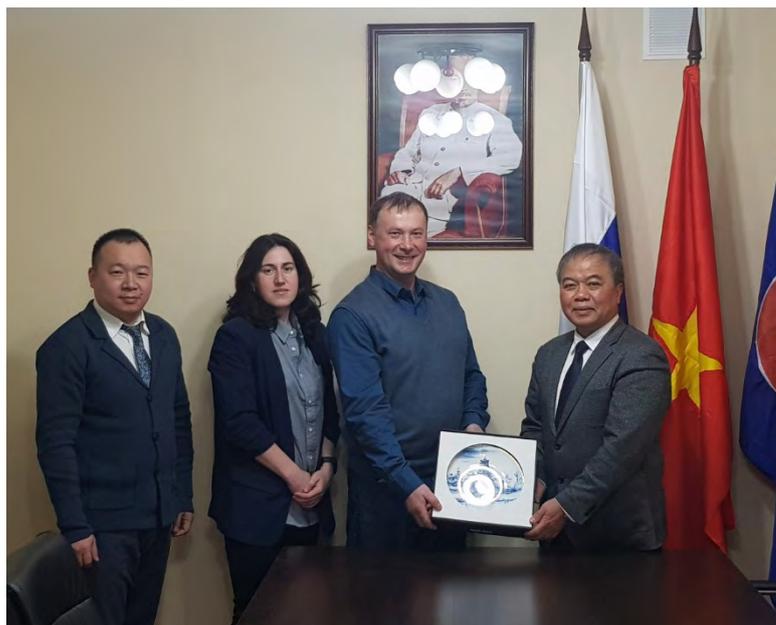
За период деятельности совместной лаборатории основной вклад в геолого-геофизические исследования на территории и акватории Вьетнама внесли сотрудники ТОИ ДВО РАН: Р.Г. Кулинич, Р.Б. Шакиров, В.М. Никифоров, А.И. Обжиров, Г.Н. Шкабарня, Н.С. Сырбу, М.Г. Валитов, Ю.А. Телегин, Е.В. Мальцева, И.Г. Югай.

В последние два года активно работают молодые специалисты – аспиранты А.О. Холмогоров, А.А. Легкодимов, Т.С. Якимов, которые выполняют диссертационные исследования с использованием фактического материала из региона Южно-Китайского моря.

С вьетнамской стороны в составе лаборатории активно участвуют сотрудники ИМГТ ВАНТ: Dr. Phung Van Phach, Dr. Do Huy Cuong, Dr. Duong Quoc Hung, Dr. Nguyen Nhu Trung, Dr. Nguyen Trung Thanh, Dr. Le Duc Anh, Dr. Bui Van Nam, Mai Duc Dong, Nguyen Van Dier, Dr. Trinh Hoai Thu и другие.

В связи с признанными актуальностью и значимостью научных результатов, полученных в рамках совместной Российско-Вьетнамской лаборатории по морским наукам и технологиям, было подписано соглашение и утверждено Положение о следующем этапе ее развития на период 2020–2030 гг. Руководство и проекты лаборатории перешли в руки следующего поколения молодых ученых.

В 2020 г. с российской стороны совместную лабораторию возглавила к.г.-м.н. Н.С. Сырбу, которая вносит значительный вклад в ее развитие и руководит проектами ТОИ ДВО РАН – ИМГТ ВАНТ



Соруководитель совместной лаборатории к.г.-м.н. Надежда Сергеевна Сырбу и заместитель директора ТОИ ДВО РАН д.г.-м.н. Ренат Белалович Шакиров на приеме у Генерального консула СРВ Нгуен Хоанг Вьета во Владивостоке, 2021 г.

Co-director of the joint laboratory Ph.D. Nadezhda Syrbu and Deputy Director of POI FEB RAS, Dr. Renat Shakirov at a reception with the Consul General of Vietnam Nguyen Hoang Viet in Vladivostok, 2021.

В настоящее время активно развиваются перспективные направления геоэкологических исследований в области изучения микропластика и тяжелых металлов Институтом экологических технологий ВАНТ (г. Ханой), которые проводятся с участием сотрудников совместной лаборатории ТОИ ДВО РАН – ИМГТ ВАНТ.

Список литературы

- Шакиров Р.Б. (ред.) **2021**. Геолого-геофизические и океанографические исследования западной части Южно-Китайского моря и прилегающего континента (по результатам 88 рейса НИС «Академик М.А. Лаврентьев» и береговых экспедиций 2010–2020). М.: ГЕОС, 414 с.
- Shakirov R.B., Sorochinskaja A.V., Syrbu N.S., Tsoy I.B., Nguyen Hoang, Le Duc Anh. **2018**. Geochemical features of Sakhalin Island mud volcanoes. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 40(1): 56–69. <https://doi.org/10.15625/0866-7187/40/1/10916>
- Syrbu N.S., Shakirov R.B., Le Duc Anh, Kholmogorov A.O., Iakimov T.S., Kalgin V.Yu. **2020**. Formation of abnormal gas-chemical fields of methane, helium and hydrogen in Northern Vietnam and its coastal and adjacent water areas. *Lithology and Mineral Resources*, 55(6): 512–527. doi:10.1134/S0024490220060097
- Лобанов В.Б. (ред.) **2020**. Российско-Вьетнамские океанологические исследования в Южно-Китайском море. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 334 с.

5. Никифоров В.М., Шкабарня Г.Н., Каплун В.Б., Жуковин А.Ю., Варенцов И.М., Пальшин Н.А., До Хуы Куонг, Нгуен Нху Чунг, Зьонг Куок Хунг. **2018**. Электропроводящие элементы сверхглубинных флюидно-разломных систем как индикаторы сейсмически активных зон восточной окраины Евразийского континента (по данным магнитотеллурических зондирований). *Доклады Академии наук*, 480(6): 730–738.
6. Никифоров В.М., Варенцов И.М., Шкабарня Г.Н., Каплун В.Б., Жуковин А.Ю., Куонг Д.Х. **2020**. Магнитотеллурические исследования Северного Вьетнама в длиннопериодном диапазоне ($10 < T < 20\,000$ с). *Геология и геофизика*, 61(9): 1266–1288. doi:10.15372/GiG2019144; EDN: BVJBCT
7. Syrбу N., Le Duc Luong, Kholmogorov A., Nguyen Hoang. **2021**. Formation of anomalous gas fields of helium and hydrogen in the Cat Ba, Co To and Bach Long Vi islands, northern Vietnam. *Vietnam Journal of Earth Science*, 43(3): 301–315. <https://doi.org/10.15625/2615-9783/16197>
8. Syrбу N.S., Nguyen Hoang, Shakirov R.B., Kholmogorov A.O., Venikova A.L., Le Duc Anh, Legkodimov A.A. **2022**. Gasgeochemical features in the western part of the East Vietnam Sea (Bien Dong Sea). *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, 22(3): 231–256. <https://doi.org/10.15625/1859-3097/17229>
9. Шакиров Р.Б., Ли Н.С., Обжиров А.И., Валитов М.Г., Съедин В.Т., Телегин Ю.А., Прошкина З.Н., Окулов А.К., Стороженко А.В., Иванов М.В., Швалов Д.А., Легкодимов А.А., Еськова А.И., Липинская Н.А., Бовсун М.А., Максеев Д.С., Калгин В.Ю., Якимов Т.С., Нгуен Чун Тхань, Ле Дык Ань. **2020**. Комплексная российско-вьетнамская геолого-геофизическая и океанографическая экспедиция в Южно-Китайское море (НИС «Академик М.А. Лаврентьев», рейс 88, 2019 г.). *Вестник ДВО РАН*, 3: 138–153. doi:10.37102/08697698.2020.211.3.015
10. Сырбу Н.С., Кыонг Д.Х., Якимов Т.С., Холмогоров А.О., Телегин Ю.А., Тсуногай У. **2021**. Геологические условия формирования газогеохимических полей, в том числе гелия и водорода, в воде и осадках привьетнамской части Южно-Китайского моря. *Георесурсы*, 23(3): 132–142. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.1.16>
11. Anh L.D., Trung N.N., Phach Ph.V., Hung D.Q., Thanh N.T., Diep N.V., Nam B.V., Shakirov R., Obzhairov A., Iugai I., Mal'tseva E., Telegin I., Syrбу N. **2014**. Characteristics of helium, methane and hydrogen distribution and their relationship with fault systems in the north of the Gulf of Tonkin. *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, 4: 78–88. doi:10.15625/1859-3097/14/4A/6034
12. Akulichhev V.A., Obzhairov A.I., Shakirov R.B., Van Phach P., Trung N.N., Hung D.Q., Mal'tseva E.V., Syrбу N.S., Polonik N.S., Anh L.D. **2015**. Anomalies of natural gases in the Gulf of Tonkin (South China Sea). *Doklady Earth Sciences*, 461: 203–207. doi:10.1134/S1028334X15030010
13. Le Duc Anh, Nguyen Hoang, Phung Van Phach, Malinovskii A.I., Sang Quang Dinh, Shakirov R. **2019**. Geochemical features of olivines from Northeastern Phu Quy Volcanic Island and their relation to melt variations in the magma source. *Vietnam Journal of Geology. Series B*, 49–50: 1–18.
14. Shakirov R.B., Hung D.Q., Anh L.D., Syrбу N.S., Obzhairov A.I., Borzova O.V., Okulov A.K., Nam B.V., Diep N.V., Dong M.D., Legkodimov A.A., Shakirova M.V., Ponomareva A.L., Bakunina M.S. **2019**. Features of the gasgeochemical abnormal fields distribution in the Red River rift (Tonkin Gulf, South China Sea). *Doklady Earth Sciences*, 484(2): 181–184. doi:10.1134/S1028334X19020065
15. Le Duc Long, Shakirov R., Nguen Hoang, Ryuichi Shinjo, Obzhairov A., Syrбу N., Shakirova M. **2019**. Features in REE and methane anomalies distribution in the East China Sea water column: a comparison with the South China Sea. *Water Resources*, 46(5): 807–816. <https://doi.org/10.1134/S0097807819050142>

References

1. Shakirov R.B. (ed.) **2021**. [*Geological, geophysical and oceanographic investigations of the western part of the South China Sea and adjacent continent (based on the results of the 88th cruise of the R/V "Academician M.A. Lavrent'ev" and coastal expeditions 2010–2020)*]. Moscow: GEOS, 414 p. (In Russ.).
2. Shakirov R.B., Sorochinskaja A.V., Syrбу N.S., Tsoy I.B., Nguyen Hoang, Le Duc Anh. **2018**. Geochemical features of Sakhalin Island mud volcanoes. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 40(1): 56–69. <https://doi.org/10.15625/0866-7187/40/1/10916>
3. Syrбу N.S., Shakirov R.B., Le Duc Anh, Kholmogorov A.O., Iakimov T.S., Kalgin V.Yu. **2020**. Formation of abnormal gas-chemical fields of methane, helium and hydrogen in Northern Vietnam and its coastal and adjacent water areas. *Lithology and Mineral Resources*, 55(6): 512–527. doi:10.1134/S0024490220060097
4. Lobanov V.B. (ed.) **2020**. *Russian-Vietnamese oceanological research in the South China Sea*. Vladivostok: POI FEB RAS, 334 p. (In Russ.).
5. Nikiforov V.M., Shkabarnya G.N., Kaplun V.B., Zhukovin A.Yu., Varentsov I.M., Palshin N.A., Cuong D.H., Trung N.N., Hung D.Q. **2018**. Electroconducting elements of the ultradeep fluid–fault systems as indicators of seismically active zones of the eastern margin of the Eurasian Continent: Evidence from magnetotelluric data. *Doklady Earth Sciences*, 480(2): 831–838. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18060284>
6. Nikiforov V.M., Shkabarnya G.N., Zhukovin A.Y., Varentsov I.M., Kaplun V.B., Cuong D.H. **2020**. Long-period ($10 < T < 20,000$ s) magnetotelluric studies in Northern Vietnam. *Russian Geology and Geophysics*, 61(9): 1036–1055. <https://doi.org/10.15372/rgg2019144>
7. Syrбу N., Le Duc Luong, Kholmogorov A., Nguyen Hoang. **2021**. Formation of anomalous gas fields of helium and hydrogen in the Cat Ba, Co To and Bach

- Long Vi islands, northern Vietnam. *Vietnam Journal of Earth Science*, 43(3): 301–315. <https://doi.org/10.15625/2615-9783/16197>
8. Syrбу N.S., Nguyen Hoang, Shakirov R.B., Kholmogorov A.O., Venikova A.L., Le Duc Anh, Legkodimov A.A. **2022**. Gasgeochemical features in the western part of the East Vietnam Sea (Bien Dong Sea). *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, 22(3): 231–256. <https://doi.org/10.15625/1859-3097/17229>
 9. Shakirov R.B., Lee N.S., Obzhairov A.I., Valitov M.G., S'edin V.T., Telegin Yu.A., Proshkina Z.N., Okulov A.K., Storozhenko A.V., Ivanov M.V., Shvalov D.A., Legkodimov A.A., Eskova A.I., Lipinskaya N.A., Bovsun M.A., Makseev D.S., Kalgin V. Yu., Yakimov T.S., Nguyen Trung Thanh, Le Duc Anh. **2020**. Integrated Russian-Vietnamese geological-geophysical and oceanographic expedition in the South China Sea (R/V “Akademik M.A. Lavrentyev”, cruise 88, 2019). *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 3: 138–153. (In Russ.). <https://doi.org/10.37102/08697698.2020.211.3.015>
 10. Syrбу N.S., Cuong D.H., Iakimov T.S., Kholmogorov A.O., Telegin Yu.A., Tsunogai U. **2021**. Geological features for the formation of gas-geochemical fields, including helium and hydrogen, in the water and sediments at the Vietnamese part of the South-China Sea. *Georesursy = Georesources*, 23(1): 132–142. (In Russ.). <https://doi.org/10.18599/grs.2021.1.16>
 11. Anh L.D., Trung N.N., Phach Ph.V., Hung D.Q., Thanh N.T., Diep N.V., Nam B.V., Shakirov R., Obzhairov A., Iugai I., Mal'tseva E., Telegin I., Syrбу N. **2014**. Characteristics of helium, methane and hydrogen distribution and their relationship with fault systems in the north of the Gulf of Tonkin. *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, 4: 78–88. doi:10.15625/1859-3097/14/4A/6034
 12. Akulichev V.A., Obzhairov A.I., Shakirov R.B., Van Phach P., Trung N.N., Hung D.Q., Mal'tseva E.V., Syrбу N.S., Polonik N.S., Anh L.D. **2015**. Anomalies of natural gases in the Gulf of Tonkin (South China Sea). *Doklady Earth Sciences*, 461: 203–207. doi:10.1134/S1028334X15030010
 13. Le Duc Anh, Nguyen Hoang, Phung Van Phach, Malinovskii A.I., Sang Quang Dinh, Shakirov R. **2019**. Geochemical features of olivines from Northeastern Phu Quy Volcanic Island and their relation to melt variations in the magma source. *Vietnam Journal of Geology. Series B*, 49–50: 1–18.
 14. Shakirov R.B., Hung D.Q., Anh L.D., Syrбу N.S., Obzhairov A.I., Borzova O.V., Okulov A.K., Nam B.V., Diep N.V., Dong M.D., Legkodimov A.A., Shakirova M.V., Ponomareva A.L., Bakunina M.S. **2019**. Features of the gasgeochemical abnormal fields distribution in the Red River rift (Tonkin Gulf, South China Sea). *Doklady Earth Sciences*, 484(2): 181–184. doi:10.1134/S1028334X19020065
 15. Le Duc Long, Shakirov R., Nguen Hoang, Ryuichi Shinjo, Obzhairov A., Syrбу N., Shakirova M. **2019**. Features in REE and methane anomalies distribution in the East China Sea water column: a comparison with the South China Sea. *Water Resources*, 46(5): 807–816. <https://doi.org/10.1134/S0097807819050142>

Р. Б. Шакиров[@], Н. С. Сырбу, М. Г. Валитов,
Г. Н. Шкабарня, А. Л. Веникова[@], Н. Л. Соколова, Е. В. Мальцева
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
ДВО РАН, Владивосток, Россия

Renat B. Shakirov[@], Nadezhda S. Syrбу,
Maksim G. Valitov, Grigory N. Shkabarnya,
Anna L. Venikova[@], Natalia L. Sokolova, Elena V. Maltceva
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute,
FEB RAS, Vladivostok, Russia
^{@E-mail}: ren@poi.dvo.ru; anett@poi.dvo.ru

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



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

МОНИТОРИНГ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 551.21

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.4.448-453>
<https://www.elibrary.ru/douvng>

Сахалинская группа реагирования на вулканические извержения (SVERT): 20 лет мониторинга вулканической активности на Курильских островах*

Sakhalin Volcanic Eruption Response Team (SVERT): 20 years of monitoring of volcanic activity on the Kuril Islands

Сахалинская группа реагирования на вулканические извержения (Sakhalin Volcanic Eruption Response Team, SVERT) была создана на базе лаборатории вулканологии и вулканопасности ИМГиГ ДВО РАН в 2003 г. для организации постоянного наблюдения за действующими вулканами Курильской островной дуги. В течение 20 лет она остается единственной структурой, осуществляющей мониторинг вулканической активности на территории Сахалинской области.

Работа по созданию SVERT 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) и Камчатской группы реагирования на вулканические извержения (Kamchatka Volcanic Eruptions Response Team, KVERT) [1]. По взаимной договоренности, обусловленной географическим положением вулканов, было принято решение о раз-

делении зон ответственности между KVERT и SVERT [1] (см. рисунок). Более подробно информация об истории организации, этапах развития и деятельности группы SVERT приводится в [2], где суммируются результаты работы группы за период с 2003 по 2018 г.

В настоящее время наблюдение за вулканической активностью, осуществляемое SVERT, основывается преимущественно на данных дистанционного зондирования – спутниковых снимков низкого, среднего и высокого разрешения. Для идентификации пепловых облаков и термальных аномалий используются космические снимки NOAA18/19 (AVHRR/POES), Terra/Aqua (MODIS), SuomiNPP/JPSS-1 (VIIRS), Sentinel-2 и Himawari-8/9 по разности инфракрасных каналов 10–12 мкм (4–5 каналы AVHRR, 31–32 каналы MODIS, 14–15 каналы Himawari-8/9, VIIRS). Доступ и обработка космоснимков осуществляется, главным образом, через информационные системы «ВЕГА-Science» [3] и «Дистанционный мониторинг вулканов Камчатки и Курил» VolSat-View [4]. В последнее время активно исполь-

* **Для цитирования:** Сахалинская группа реагирования на вулканические извержения (SVERT): 20 лет мониторинга вулканической активности на Курильских островах. Авт.: Чибисова М.В., Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Романюк Ф.А. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 4, с. 448–453. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.4.448-453>; <https://www.elibrary.ru/douvng>

For citation: Sakhalin Volcanic Eruption Response Team (SVERT): 20 years of monitoring of volcanic activity on the Kuril Islands. Authors: Chibisova M.V., Degterev A.V., Rybin A.V., Romanyuk F.A. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 4, pp. 448–453. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.4.448-453>; <https://www.elibrary.ru/douvng>

зуются также сервисы MIROVA (<https://www.mirovaweb.it/>), MOUNTS (<http://mounts-project.com/home>), NOAA/CIMSS Volcanic Cloud Monitoring (<https://volcano.ssec.wisc.edu/>), Sentinel Hub (<https://www.sentinel-hub.com/>).

Для наблюдения за активностью влк. Эбеко (о. Парамушир), характеризующегося частыми пепловыми выбросами, используется IP-камера AXIS (0526-001), установленная в октябре 2017 г. на территории Северо-Курильска КФ ФИЦ ЕГС РАН совместно с ИМ-ГиГ ДВО РАН (снимки с нее поступают каждые две минуты посредством FTP-сервера). Кроме того, привлекаются результаты визуаль-

ных наблюдений, выполненных очевидцами (туристами, охотниками, местными жителями), устные свидетельства которых, сопровождаемые фото- и видеоматериалами, содержат важные детали, позволяющие дополнить данные, полученные дистанционными методами.

Курильские острова – район современного активного вулканизма: с 2003 по 2023 г. здесь произошло 52 вулканических извержения (~30 % от их общего числа за последние 300 лет), из них 30 – в зоне ответственности SVERT (см. рисунок и таблицу). В условиях относительно небольшой площади и изолированности островов вулканическая активность

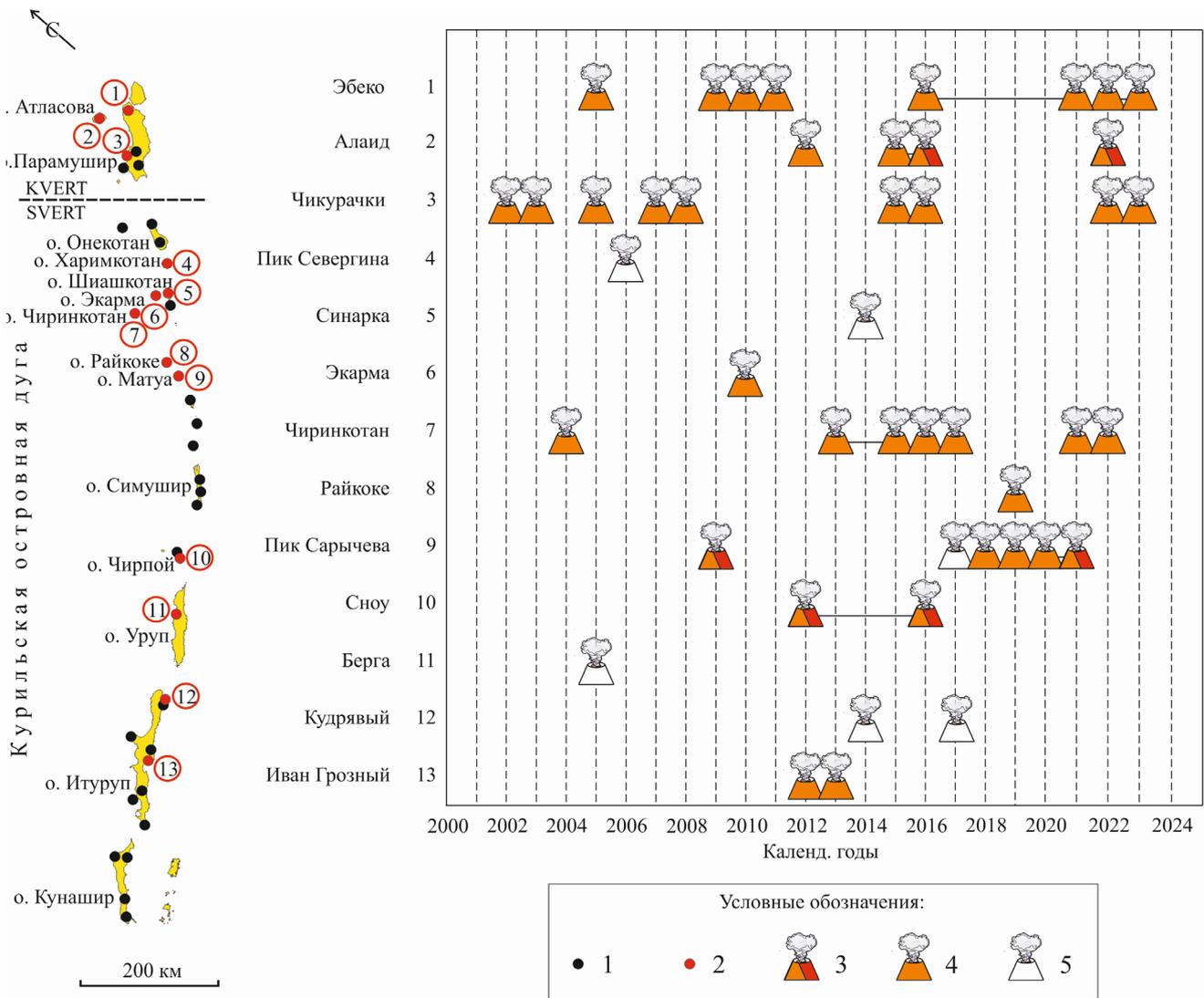


Рис. Географическое положение действующих вулканов Курильских островов и хронология их активности в XXI в. 1 – действующий вулкан, 2 – вулкан, проявлявший активность за период с 2003 по 2023 г.; 3 – извержение, сопровождавшееся излиянием лавы, 4 – эксплозивное извержение, 5 – слабая активизация.

Fig. Geographical location of active volcanoes of the Kuril Islands and the chronology of their activity in the 21st century. 1 – active volcano, 2 – volcano that was active from 2003 to 2023; 3 – eruption accompanied by lava outpouring, 4 – explosive eruption, 5 – weak activation.

Таблица. Вулканическая активность на Курильских островах в 2003–2023 гг.

Table. Volcanic activity on the Kuril Islands in 2003–2023

Вулкан	Остров	Количество событий	Дата, (VEI)
<i>Северные Курильские острова</i>			
Алаид**	Атласова	3	06.10. – 12.12.2012, (2) 01.10.2015 – 18.08.2016, (2) 10.09. – 01.12.2022, (2)
Эбеко**	Парамушир	7	2005, (2) 27.01. – 18.06.2009, (1) Апрель 2010, (1) 02.07.2010, (1) 16–17.07.2011*, 18.10.2016 – 19.12.2021, (2) Июнь 2022 – наст. время, (2)
Чикурачки**	Парамушир	16	25.01. – 31.04.2002, (2) 17.04. – 16.06.2003, (2) 10.03. – 07.04.2005, (1) 19.03. – 20.10.2007, (2) 19.08. – 20.10.2007, (2) 29.07. – 15.08.2008, (2) 15–19.02.2015, (3) 28–31.03.2016, (2) 27–28.07.2016, (2) 18–31.08.2016, (2) 30.01. – 03.02.2022, (2) 23–24.06.2022, (2) 30.06. – 01.07.2022, (2) 21.08. – 02.09.2022, (2) 13–20.10.2022, (2) 28.01. – 08.02.2023, (2).
Чиринкотан	Чиринкотан	10	21.07.2004, (2) 24.05.2013 – декабрь 2015, (2) 28.11.2016, (1) 26.01.2017, (1) 01.03.2017, (1) 21.03.2017, (1) 31.03.2017, (1) 07.04.2017, (1) 08. – 23.08.2021, (2) 22.03.2022, (2)
Экарма	Экарма	1	Июнь 2010, (2)
Синарка	Шиашкотан	1	12.11. – декабрь 2014*
Пик Севергина	Харимкотан	1	28.08.2006*
<i>Средние (Центральные) Курильские острова</i>			
Райкоке	Райкоке	1	22 – 25.06.2019, (4)
Пик Сарычева	Матуа	9	11–19.06. 2009, (4) Октябрь–ноябрь 2017* 16.05.2019* 12.09. – 10.10.2018, (2) 01.12.2020 – февраль 2021, (1)

Вулкан	Остров	Количество событий	Дата, (VEI)
			29.06.2021* 01.07.2021* 06.08.2021* 26.11.2021*
<i>Южные Курильские острова</i>			
Сноу	Чирпой	1	10.11.2012 – август 2016, (1)
Берга	Уруп	1	Июль–август 2005
Кудрявый	Итуруп	3	27–29.11. 2014* 15.02.2017* 31.07. – 02.08.2017*
Иван Грозный	Итуруп	2	15.08. – 30.09.2012, (2) 03–04.04.2013, (2)

*слабая активизация вулкана, **вулканы, находящиеся в зоне ответственности группы KVERT.

Примечание. Использованы данные SVERT [5–8] и KVERT/ИВиС ДВО РАН [9–12].

Значение VEI (Volcanic explosivity index) приведено по данным (<https://volcano.si.edu/>).

и сопряженные с ней процессы (цунами, вулканические сели – лахары и пр.) оказывают негативные воздействия на население: от незначительных, связанных с ухудшением качества жизни из-за пеплопадов и газовых эманацій, до существенных, фатальных, вызванных прохождением палящих туч и вулканогенных цунами. Особому риску, связанному с эксплозивными извержениями, подвержены международные и региональные авиалинии, проложенные вдоль архипелага и характеризующиеся интенсивным грузо- и пассажиропотоком.

В последние десятилетия наиболее активными были вулканы Северных (Эбеко, Чикурачки, Чиринкотан) и Центральных Курил (Пик Сарычева, Райкоке); на них приходится, соответственно, 75 и 19.23 % от общего числа произошедших событий. Вулканы Южных Курильских островов в текущем столетии были малоактивны (см. таблицу). Схожая тенденция в распределении извержений преимущественно в северной части дуги наблюдалась и в предшествующие столетия.

Абсолютный лидер среди вышеперечисленных вулканов – Эбеко: с 2016 г. он находится в состоянии эксплозивного извержения, характеризуемого частыми (600–800 в год) пепловыми выбросами умеренной силы (до 5.5 км н.у.м.). Расположенный в 7 км от вулкана город Северо-Курильск в настоящее время наиболее подверженный вулканической опасности населенный пункт на

Курильских островах. В пределах городской черты регулярно отмечаются пеплопады, до сотни в год (по сведениям С.П. Лакомова, ИМГиГ ДВО РАН), повышенная концентрация сернистых газов, существует реальный риск схода лахаров.

В целом в течение рассматриваемого периода на вулканах Курильских островов преобладали умеренные (53.8 %) и слабые (23.08 %) эксплозивные извержения. Дважды происходили мощные плинианские извержения (VEI 4), которые оба раза имели место на Центральных Курилах – Пик Сарычева в 2009 г. и Райкоке в 2019 г. Излияние лавы наблюдалось при извержении вулкана Пик Сарычева (2009, 2020–2021), Алаид (2015–2016, 2022), Сноу (2012–2016). Из всего спектра вулканических явлений самыми частыми были пеплопады. Формирование пирокластических потоков происходило лишь при наиболее мощных извержениях (Пик Сарычева, 2009; Райкоке, 2019). Лахары, напротив, возникали как при сильных, так и при слабых/умеренных извержениях (Экарма, 2010; Алаид, 2022).

Результаты мониторинга вулканической активности в виде информационных отчетов ежедневно на протяжении 20 лет рассылаются во все заинтересованные организации: областное учреждение «Управление обеспечения мероприятий в области гражданской обороны, защиты от чрезвычайных ситуаций и пожарной безопасности Сахалинской обла-

сти», подразделения МЧС Сахалинской области, в Аляскинскую вулканологическую обсерваторию AVO, метеорологические центры аэропортов Елизово (Камчатский край) и Южно-Сахалинска, консультативные центры по вулканическому пеплам (Volcanic Ash Advisory Center (VAAC)) городов Токио (Япония), Анкоридж, Вашингтон (США), метеоцентры Японии, Канады и другие организации по запросу. Оперативная информация также ежедневно публикуется на странице SVERT сайта ИМГиГ ДВО РАН (<http://www.imgg.ru/ru/svert/reports>). Кроме того, каждый квартал сводки по вулканической активности докладываются на заседании Сахалинского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска. (<http://sakh-res.imgg.ru/>).

Как показывает опыт SVERT, современные возможности спутниковой съемки позволяют обеспечить базовый уровень мониторинга вулканической активности при минимальных финансовых затратах. В условиях Курильских островов, представляющих собой протяженный вулканический архипелаг (1200 км), наблюдение за вулканами на основе спутниковых данных в настоящее время является безальтернативным, единственно возможным способом обеспечения минимального контроля состояния действующих вулканов. Основным лимитирующим фактором, серьезно снижающим результативность мониторинга, остается оперативность получения спутниковой информации, которая определяет своевременность оповещения о произошедших извержениях. С учетом прочих ограничений (погодные условия, разрешающая способность, зависимость от поставщика данных) на Курильских островах необходима организация постоянной сети геофизических наблюдений, включающей пункты радиотелеметрических сейсмо- и TILT/GPS/ГЛОНАС-станций, которые будут в режиме реального времени и независимо от внешних факторов передавать актуальную информацию о состоянии активных вулканов. Вопрос целесообразности размещения подобных пунктов на удаленных и необитаемых островах можно считать дискуссионным, однако создание геофизической сети наблюдений на осво-

енных островах (Парамушир, Итуруп, Кунашир) представляется обязательным: наличие постоянного населения, инфраструктуры и хозяйства требует минимизации рисков, связанных с будущими извержениями.

Авторы выражают искреннюю признательность всем, кто принимал участие и оказывал содействие в деле мониторинга вулканической активности на Курильских островах.

Список литературы

1. Rybin A.V., Karagusev Y.V., Izbekov P.E. et al. **2004**. Monitoring of active volcanoes of the Kurile Islands: Present and future. In: *The 2nd International Conference on Volcanic Ash and Aviation Safety, June 21–24*. Washington, USA, p. 55–61.
2. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В. **2018**. Мониторинг вулканической активности на Курильских островах: 15 лет деятельности группы SVERT. *Геосистемы переходных зон*, 2(3): 259–266. doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.259-266
3. Ефремов В.Ю., Гирина О.А., Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Маневич А.Г., Матвеев А.М., Мельников Д.В., Прошин А.А., Сорокин А.А., Флитман Е.В. **2012**. Создание информационного сервиса «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил». *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 9(5): 155–170. EDN: PVSGBX
4. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. **2015**. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 12(5): 263–284. EDN: UZNDUX
5. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В., Гурьянов В.Б. **2017**. Вулканическая активность на Курильских островах в XXI в. *Вестник ДВО РАН*, 1: 51–62. EDN: ZIFWAT
6. Дегтерев А.В., Чибисова М.В., Романюк Ф.А. **2023**. Эффузивно-эксплозивное извержение вулкана Алай в 2022 г. (о. Атласова, Северные Курильские острова). *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 58(2): 17–28. doi:10.31431/1816-5524-2023-2-58-17-28
7. Дегтерев А.В., Чибисова М.В. **2022**. Активность вулканов Курильских островов в 2020–2021 гг. *Геосистемы переходных зон*, 6(3): 195–205. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.195-205>
8. Дегтерев А.В., Чибисова М.В. **2020**. Вулканическая активность на Курильских островах в 2019 г. *Геосистемы переходных зон*, 4(1): 93–102. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.093-102>

9. Котенко Т.А., Котенко Л.В., Шапарь В.Н. **2007**. Активизация вулкана Эбеко в 2005–2006 гг. *Вулканология и сейсмология*, 5: 3–13.
10. Гирина О.А., Малик Н.А., Котенко Л.В. **2008**. Активность вулкана Чикурачки (о. Парамушир, Северные Курилы) в 2002–2007 гг. по данным KVERT. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(11): 67–73. EDN: IUKFGF
11. Рашидов В.А., Малик Н.А., Фирстов П.П. и др. **2012**. Активизация вулкана Алаид (Курильские острова) в 2012 году. *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*, 2(20): 9–15. EDN: PWRAMD
12. Котенко Т.А., Сандимирова Е.И., Котенко Л.В. **2018**. Извержение вулкана Эбеко (Курильские острова) в 2016–2017 гг. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(37): 32–42. EDN: YUMKHM
1. Rybin A.V., Karagusev Y.V., Izbekov P.E. et al. **2004**. Monitoring of active volcanoes of the Kurile Islands: Present and future. In: *The 2nd International Conference on Volcanic Ash and Aviation Safety, June 21–24*. Washington, USA, p. 55–61.
2. Rybin A.V., Chibisova M.V., Degterev A.V. **2018**. Monitoring of volcanic activity in the Kurile Islands: 15 years of work SVERT group. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(3): 259–266. (In Russ., abstr. in Engl.). doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.259-266
3. Efremov V.Yu., Girina O.A., Kramareva L.S., Lupyay E.A., Manevich A.G., Matveev A.M., Mel'nikov D.V., Proshin A.A., Sorokin A.A., Flitman E.V. **2012**. Creating an Information Service «Monitoring of Active Volcanoes of Kamchatka and the Kuril Islands». *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 9(5): 155–170. (In Russ.). EDN: PVSGBX
4. Loupian E.A., Bourtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskiy A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Suchugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A. **2015**. IKI RAS Center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 12(5): 263–284. (In Russ.). EDN: UZNDUX
5. Rybin A.V., Chibisova M.V., Degterev A.V., Guryanov V.B. **2017**. Volcanic eruptions in the Kuril Islands during XXI century. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 1: 51–62. (In Russ.). EDN: ZIFWAT
6. Degterev A.V., Chibisova M.V., Romanyuk F.A. **2023**. Explosive-effusive eruption of Alaid volcano in 2022 (Atlasova Island, northern Kuril Islands). *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 2(58): 17–28. (In Russ.). https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-2-58-17-28
7. Degterev A.V., Chibisova M.V. **2022**. Volcanic activity of the Kuril Islands in 2020–2021. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 6(3): 195–205. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/grtz.2022.6.3.195-205
8. Degtyarev A.V., Chibisova M.V. **2020**. Volcanic activity on the Kuril Islands in 2019. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 1(4): 93–102. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.093-102
9. Kotenko T.A., Kotenko L.V., Shapar' V.N. **2007**. Increased activity on Ebeko Volcano, Paramushir I., North Kurils, in 2005–2006. *J. of Volcanology and Seismology*, 1(5): 285–295. https://doi.org/10.1134/s0742046307050016
10. Girina O.A., Malik N.A., Kotenko L.V. **2008**. 2002–2007 activity of Chikurachki volcano (Paramushir Island, Northern Kuriles) based on KVERT data. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1(11): 67–73. (In Russ.). EDN: IUKFGF
11. Rashidov V.A., Malik N.A., Firsov P.P. et al. **2012**. [Activation of the Alaid volcano (Kuril Islands) in 2012]. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 2(20): 9–15. (In Russ.). EDN: PWRAMD
12. Kotenko T.A., Sandimirova E.I., Kotenko L.V. **2018**. Eruptions of the Ebeko volcano (Kuril Islands) in 2016–2017. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1(37): 32–42. (In Russ.). EDN: YUMKHM

М. В. Чибисова, А. В. Дегтерев[@], А. В. Рыбин, Ф. А. Романюк
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Artem V. Degterev[@], Marina V. Chibisova,
Alexander V. Rybin, Fedor A. Romanyuk
Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
^{@E-mail: d_a88@mail.ru}

Поступила 01.12.2023
Принята к публикации 04.12.2023

Received 1 December 2023
Accepted 4 December 2023

**Тематический указатель материалов, опубликованных в журнале
«Геосистемы переходных зон» в 2023 г. (том 7)**

Автор(ы). Название	Номер: страницы
Геофизика. Сейсмология	
<i>Устюгов Г.В., Ершов В.В.</i> Влияние космических факторов на грязевулканическую деятельность Земли. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.005-024	1: 5–24
<i>Богомолов Л.М., Сычев В.Н., Сычева Н.А.</i> О сброшенных напряжениях в очагах умеренных и слабых землетрясений: особенности распределения во времени. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.025-036.037-053	1: 25–53
<i>Закупин А.С., Костылева Н.В., Костылев Д.В.</i> От ретроспективы к системе реального времени – прогноз землетрясений методом LURR на Сахалине (2019–2022 гг.). https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.054-064.064-074	1: 54–74
<i>Богомолов Л.М., Костылев Д.В., Костылева Н.В., Гуляков С.А., Дудченко И.П., Каменев П.А., Стовбун Н.С.</i> Наблюдения обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода при электроразведках в районе Центрально-Сахалинского разлома. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.115-131	2: 115–131
<i>Сафонов Д.А., Семёнова Е.П.</i> Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2022 году. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.132-148	2: 132–148
<i>Сычева Н.А.</i> Исследование сейсмоструктурных деформаций земной коры Алтае-Саянской горной области. Часть I. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.223-242	3: 223–242
<i>Сычева Н.А.</i> Исследование сейсмоструктурных деформаций земной коры Алтае-Саянской горной области. Часть II. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.335-356	4: 335–356
Геоинформатика и картография (геофизика, геоэкология, геология)	
<i>Мингалеева Т.А., Шакуро С.В., Сенчина Н.П., Егоров А.С.</i> Применение RGB-синтеза для комплексной интерпретации данных геофизических методов при изучении территорий, загрязненных нефтепродуктами. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.075-085	1: 75–85
<i>Русинович В.В., Русинович Л.Э.</i> Автоматизация трассировки поверхностей разломов с помощью алгоритмов компьютерного зрения. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.086-094	1: 84–94
<i>Воронина Т.А., Воронин В.В.</i> [Метод выбора данных для восстановления формы источника цунами]. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.292-303	3: 292–303
Геоморфология и палеогеография	
<i>Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Мохова Л.М., Арсланов Х.А.</i> Озерные палеоархивы изменений природной среды полуострова Песчаный, Японское море (южное Приморье). https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.375-404	4: 375–404
Механика деформируемого твердого тела. Геомеханика	
<i>Мищенко М.А., Ларионов И.А., Васькин В.А.</i> Оптическая система регистрации прогиба образца в испытаниях на изгиб. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.175-179	2: 175–179
<i>Великанов П.Г., Артюхин Ю.П.</i> Исследование по динамике рамных конструкций. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.180-195	2: 180–195
<i>Великанов П.Г., Артюхин Ю.П.</i> Исследование по динамике многоэтажных зданий. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.304-315	3: 304–315
<i>Пантелеев И.А., Окунев В.И., Новиков В.А.</i> Синхронизация мультифрактальных свойств непрерывной акустической эмиссии при подготовке и реализации подвижки по модельному разлому. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.405-418	4: 405–418
Океанология	
<i>Кайстренко В.М.</i> Проблема оценки точности параметров цунамиактивности. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.149-159	2: 149–159
<i>Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Зарочинцев В.С., Кириллов К.В.</i> Длинные волны на шельфе юго-западного побережья о. Сахалин. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.160-174	2: 160–174
<i>Шакиров Р.Б., Мальцева Е.В., Веникова А.Л., Соколова Н.Л., Гресов А.И.</i> Комплексные геолого-геофизические исследования по обоснованию внешней границы континентального шельфа России в Охотском и Восточно-Сибирском морях (2006–2009 гг.): обзор. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.264-275	3: 264–275
<i>Шевченко Г.В., Ложкин Д.М.</i> Сезонные и межгодовые вариации температуры поверхности моря в Татарском проливе по спутниковым данным. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.276-291	3: 276–291

<i>Разжигаяева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А., Лоскутов А.В., Булгаков Р.Ф.</i> Геологические свидетельства проявлений сильных цунами на побережье острова Итуруп (Курильские острова) за последние 3500 лет. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.357-374	4: 357–374
Общая и региональная геология. Вулканология, петрология	
<i>Дегтерев А.В., Чибисова М.В.</i> Эксплозивная активность вулкана Чикурачки в январе–феврале 2023 г. (о. Парамушир, Северные Курильские острова). https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.212-218	2: 212–218
<i>Крутенко М.Ф., Исаев В.И., Лобова Г.</i> «Палеозойская» нефть Урманского месторождения (юго-восток Западной Сибири). https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.243-263	3: 243–263
<i>Каменев П.А., Лукманов А.Р.</i> О некоторых закономерностях развития трещиноватости в терригенных породах острова Сахалин. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.419-426	4: 419–426
<i>Дегтерев А.В., Чибисова М.В.</i> Вулканическая активность на Курильских островах в 2022 г. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.427-438	4: 427–438
Геоэкология. Экология	
<i>Полтев Ю.Н., Коренева Т.Г., Марыжухин В.Е., Сырбу И.В.</i> Содержание микроэлементов в мышечной ткани некоторых видов гидробионтов из охотоморских вод северо-восточного Сахалина. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.095-102	1: 95–102
<i>Музыченко Т.К.</i> Оценка эколого-хозяйственного баланса в водосборе залива Петра Великого (Японское море). https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.196-205	2: 196–205
<i>Ежкин А.К., Галанина И.А., Романюк Ф.А.</i> Первые сведения о лишайниках с острова Магуа, Дальний Восток России. Семейства <i>Physciaceae</i> и <i>Caliciaceae</i> [На англ. яз.]. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.206-211	2: 206–211
<i>Маслова М.Н.</i> Количественный анализ эколого-хозяйственного баланса и структуры использования земель бассейна р. Туманная. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.316-330	3: 316–330
Хроника научной жизни	
Научное сотрудничество Вьетнамской академии наук и технологий (ВАНТ) и ТОИ ДВО РАН. <i>Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С., Валитов М.Г., Шкабарня Г.Н., Веникова А.Л., Соколова Н.Л., Мальцева Е.В.</i> https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.439-447	4: 439–447
Сахалинская группа реагирования на вулканические извержения (SVERT): 20 лет мониторинга вулканической активности на Курильских островах. <i>Чибисова М.В., Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Романюк Ф.А.</i> https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.448-453	4: 448–453

**Topical index of articles published in the journal
“Geosystems of Transition Zones” in 2023 (Volum 7)**

Author(s). Title	Issue: Pages
Geophysics. Seismology	
<i>Ustyugov G.V., Ershov V.V.</i> Influence of cosmic factors on mud volcanic activity of the Earth. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.005-024	1: 5–24
<i>Bogomolov L.M., Sychev V.N., Sycheva N.A.</i> On stress drops in the sources of moderate and weak earthquakes: features of distribution in time. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.025-036.037-053	1: 25–53
<i>Zakupin A.S., Kostyleva N.V., Kostylev D.V.</i> From retrospective to real-time system – LURR earthquake prediction on Sakhalin (2019–2022). https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.054-064.064-074	1: 54–74
<i>Bogomolov L.M., Kostylev D.V., Kostyleva N.V., Gulyakov S.A., Dudchenko I.P., Kamenev P.A., Stovbun N.S.</i> Observations of the inverse seismoelectric effect of the second kind during electrical sounding in the Central Sakhalin fault zone. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.115-131	2: 115–131
<i>Safonov D.A., Semenova E.P.</i> Seismicity of the South Far East of Russia in 2022. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.132-148	2: 132–148
<i>Sycheva N.A.</i> Study of seismotectonic deformations of the Earth’s crust in the Altai-Sayan Mountain region. Part I. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.223-242	3: 223–242
<i>Sycheva N.A.</i> Study of seismotectonic deformations of the Earth crust in the Altai-Sayan Mountain region. Part II. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.335-356	4: 335–356
Geoinformatics and cartography (Geophysics, Geoecology, Geology)	
<i>Mingaleva T.A., Shakuro S.V., Senchina N.P., Egorov A.S.</i> Application of RGB-synthesis for complex interpretation of geophysical data in the study of areas contaminated by oil products. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.075-085	1: 75–85

Rusinovich V.V., Rusinovich L.E. Fault surface tracing automation using computer vision algorithms. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.086-094	1: 86–94
Voronina T.A., Voronin V.V. Data selection method for restoring a tsunami source form (in English). https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.292-303	3: 292–303
Geomorphology and Paleogeography	
Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Arslanov Kh.A. Lacustrine paleoarchives of environmental changes of Peschany Peninsula, Sea of Japan (South Primorye). https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.375-404	4: 375–404
Mechanics of deformable solids. Geomechanics	
Mishchenko M.A., Larionov I.A., Vas'kin V.A. Optical system for recording specimen deflection in bending tests/ https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.175-179	2: 175–179
Velikanov P.G., Artyukhin Yu.P. Research on the dynamics of frame structures. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.180-195	2: 180–195
Velikanov P.G., Artyukhin Y.P. Research on the dynamics of multi-storey buildings. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.304-315	3: 304–315
Pantelev I.A., Okunev V.I., Novikov V.A. Synchronization of multifractal properties of continuous acoustic emission during the preparation and implementation of dynamic slip in model fault. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.405-418	4: 405–418
Oceanology	
Kaistrenko V.M. The problem of estimating the accuracy of the tsunami activity parameters. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.149-159	2: 148–159
Kovalev D.P., Kovalev P.D., Zarochintsev V.S., Kirillov K.V. Long waves on the shelf of the southwest coast of Sakhalin Island. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.160-174	2: 160–174
Shakirov R.B., Maltseva E.V., Venikova A.L., Sokolova N.L., Gresov A.I. Complex geological and geophysical studies on substantiation of the outer limits of the Russian continental shelf in the Sea of Okhotsk and East Siberian Sea (2006–2009): Review. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.264-275	3: 264–275
Shevchenko G.V., Lozhkin D.M. Seasonal and interannual variations in sea surface temperature in the Tatar Strait according to satellite data. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.276-291	3: 276–291
Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Kharlamov A.A., Loskutov A.V., Bulgakov R.F. Geological evidence of strong tsunami manifestations on the Iturup Island (Kuril Islands) at last 3500 years. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.357-374	4: 357–374
General and regional geology. Volcanology, petrology	
Degterev A.V., Chibisova M.V. Explosive activity of Chikurachki volcano in January–February of 2023 (Paramushir Island, Northern Kuril Islands). https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.212-218	2: 212–218
Krutenko M.F., Isaev V.I., Lobova G. The Paleozoic oil in the Urman field (the southeast of Western Siberia). https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.243-263	3: 243–263
Kamenev P.A., Lukmanov A.R. Patterns of fracturing placement in terrigenous rocks of Sakhalin Island. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.419-426	4: 419–426
Degterev A.V., Chibisova M.V. Volcanic activity on the Kuril Islands in 2022. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.427-438	4: 427–438
Geoecology. Ecology	
Poltev Y.N., Koreneva T.G., Maryzhikhin V.E., Syrbu I.V. The content of trace elements in the muscle tissue of some species of aquatic organisms from the Sea of Okhotsk waters of Northeastern Sakhalin. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.095-102	1: 95–102
Muzychenko T.K. Ecological and economic balance evaluation of Peter the Great Gulf basin (Sea of Japan). https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.196-205	2: 196–205
Ezhkin A.K., Galanina I.A., Romanyuk F.A. First data on lichens from Matua Island, Far East of Russia. Families <i>Physciaceae</i> and <i>Caliciaceae</i> [In English]. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.206-211	2: 206–211
Maslova M.N. Quantitative analysis of the ecological and economic balance and the structure of land use in the basin of the Tumannaya River. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.316-330	3: 316–330
Current scientific events	
Scientific cooperation between the Vietnam Academy of Science and Technology (VAST) and POI FEB RAS. Shakirov R.B., Syrbu N.S., Valitov M.G. Shkabarnya G.N., Venikova A.L., Sokolova N.L., Maltseva E.V. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.439-447	4: 439–447
Sakhalin Volcanic Eruption Response Team (SVERT): 20 years of monitoring of volcanic activity on the Kuril Islands. Chibisova M.V., Degterev A.V., Rybin A.V., Romanyuk F.A. https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.448-453	4: 448–453

Авторский указатель публикаций в журнале «Геосистемы переходных зон» в 2023 г. (том 7)

Автор(ы). Название	Номер: страницы
Арсланов Х.А. см. <i>Разжигаяева Н.Г.</i> 4: 375–404	
Артюхин Ю.П. см. <i>Великанов П.Г.</i> 2: 180–195; 3: 304–315	
<i>Богомолов Л.М., Костылев Д.В., Костылева Н.В., Гуляков С.А., Дудченко И.П., Каменев П.А., Стовбун Н.С.</i> Наблюдения обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода при электротзондированиях в районе Центрально-Сахалинского разлома	2: 115–131
<i>Богомолов Л.М., Сычев В.Н., Сычева Н.А.</i> О сброшенных напряжениях в очагах умеренных и слабых землетрясений: особенности распределения во времени	1: 25–53
Булгаков Р.Ф. см. <i>Разжигаяева Н.Г.</i> 4: 357–374	
Валитов М.Г. см. <i>Шакиров Р.Б.</i> 4: 439–447	
Васькин В.А. см. <i>Мищенко М.А.</i>	
<i>Великанов П.Г., Артюхин Ю.П.</i> Исследование по динамике многоэтажных зданий	3: 304–315
<i>Великанов П.Г., Артюхин Ю.П.</i> Исследование по динамике рамных конструкций	2: 180–195
Веникова А.Л. см. <i>Шакиров Р.Б.</i> 3: 264–275; 4: 439–447	
Воронин В.В. см. <i>Воронина Т.А.</i>	
<i>Воронина Т.А., Воронин В.В.</i> [Метод выбора данных для восстановления формы источника цунами] (На англ. яз.)	3: 292–303
Галанина И.А. см. <i>Ежкин А.К.</i>	
Ганзей Л.А. см. <i>Разжигаяева Н.Г.</i> 4: 357–374; 4: 375–404	4: 357–374
Гребенникова Т.А. см. <i>Разжигаяева Н.Г.</i> 4: 357–374; 4: 375–404	4: 357–374
Гресов А.И. см. <i>Шакиров Р.Б.</i> 3: 264–275	
Гуляков С.А. см. <i>Богомолов Л.М.</i> 2: 115–131	
Дегтерев А.В. см. <i>Чибисова М.В.</i> 4: 448–453	
<i>Дегтерев А.В., Чибисова М.В.</i> Вулканическая активность на Курильских островах в 2022 г.	4: 427–438
<i>Дегтерев А.В., Чибисова М.В.</i> Эксплозивная активность вулкана Чикирачки в январе–феврале 2023 г. (о. Параму- шир, Северные Курильские острова)	2: 212–218
Дудченко И.П. см. <i>Богомолов Л.М.</i> 2: 115–131	
Егоров А.С. см. <i>Мингалева Т.А.</i>	
<i>Ежкин А.К., Галанина И.А., Романюк Ф.А.</i> Первые сведения о лишайниках с острова Матуа, Дальний Восток России. Семейства Physciaceae и Caliciaceae [На англ. яз.]	2: 206–211
Ершов В.В. см. <i>Устюгов Г.В.</i>	
<i>Закупин А.С., Костылева Н.В., Костылев Д.В.</i> От ретроспективы к системе реального времени – прогноз землетрясений методом LURR на Сахалине (2019–2022 гг.)	1: 54–74
Зарочинцев В.С. см. <i>Ковалев Д.П.</i>	
Исаев В.И. см. <i>Крутенко М.Ф.</i>	
<i>Кайстренко В.М.</i> Проблема оценки точности параметров цунамиактивности	2: 149–159
Каменев П.А. см. <i>Богомолов Л.М.</i> 2: 115–131	
<i>Каменев П.А., Лукманов А.Р.</i> О некоторых закономерностях развития трещиноватости в терригенных породах острова Сахалин	4: 419–426
Кириллов К.В. см. <i>Ковалев Д.П.</i>	
<i>Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Зарочинцев В.С., Кириллов К.В.</i> Длинные волны на шельфе юго-западного побережья о. Сахалин	2: 160–174
Ковалев П.Д. см. <i>Ковалев Д.П.</i>	
Коренева Т.Г. см. <i>Полтев Ю.Н.</i>	
Костылев Д.В. см. <i>Богомолов Л.М.</i> 2: 115–131. Он же см. <i>Закупин А.С.</i>	
Костылева Н.В. см. <i>Богомолов Л.М.</i> 2: 115–131. Он же см. <i>Закупин А.С.</i>	
<i>Крутенко М.Ф., Исаев В.И., Лобова Г.</i> «Палеозойская» нефть Урманского месторождения (юго-восток Западной Сибири)	3: 243–263
Ларионов И.А. см. <i>Мищенко М.А.</i>	

Лобова Г. см. Крутенко М.Ф.	
Ложкин Д.М. см. Шевченко Г.В.	
Лоскутов А.В. см. Разжигаева Н.Г. 4: 357–374	
Лукманов А.Р. см. Каменев П.А.	
Мальцева Е.В. см. Шакиров Р.Б. 3: 264–275; 4: 439–447	
Марьжихин В.Е. см. Полтев Ю.Н.	
Маслова М.Н. Количественный анализ эколого-хозяйственного баланса и структуры использования земель бассейна р. Туманная	3: 316–330
Мингалева Т.А., Шакуро С.В., Сенчина Н.П., Егоров А.С. Применение RGB-синтеза для комплексной интерпретации данных геофизических методов при изучении территорий, загрязненных нефтепродуктами	1: 75–85
Мищенко М.А., Ларионов И.А., Васькин В.А. Оптическая система регистрации прогиба образца в испытаниях на изгиб	2: 175–179
Мохова Л.М. см. Разжигаева Н.Г. 4: 375–404	
Музыченко Т.К. Оценка эколого-хозяйственного баланса в водосборе залива Петра Великого (Японское море)	2: 196–205
Новиков В.А. см. Пантелеев И.А.	
Окунев В.И. см. Пантелеев И.А.	
Пантелеев И.А., Окунев В.И., Новиков В.А. Синхронизация мультифрактальных свойств непрерывной акустической эмиссии при подготовке и реализации подвижки по модельному разлому	4: 405–418
Полтев Ю.Н., Коренева Т.Г., Марьжихин В.Е., Сырбу И.В. Содержание микроэлементов в мышечной ткани некоторых видов гидробионтов из охотоморских вод северо-восточного Сахалина	1: 95–102
Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Мохова Л.М., Арсланов Х.А. Озерные палеоархивы изменений природной среды полуострова Песчаный, Японское море (южное Приморье)	4: 375–404
Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А., Лоскутов А.В., Булгаков Р.Ф. Геологические свидетельства проявления сильных цунами на побережье острова Итуруп (Курильские острова) за последние 3500 лет	4: 357–374
Романюк Ф.А. см. Ежкин А.К.	
Романюк Ф.А. см. Чибисова М.В.	
Русинович В.В., Русинович Л.Э. Автоматизация трассировки поверхностей разломов с помощью алгоритмов компьютерного зрения	1: 86–94
Русинович Л.Э. см. Русинович В.В.	
Рыбин А.В. см. Чибисова М.В.	
Сафонов Д.А., Семёнова Е.П. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2022 году	2: 132–148
Семёнова Е.П. см. Сафонов Д.А.	
Сенчина Н.П. см. Мингалева Т.А.	
Соколова Н.Л. см. Шакиров Р.Б. 3: 264–275; 4: 439–447	
Стовбун Н.С. см. Богомолов Л.М. 2: 115–131.	
Сырбу И.В. см. Полтев Ю.Н.	
Сырбу Н.С. см. Шакиров Р.Б. 4: 439–447	
Сычев В.Н. см. Богомолов Л.М. 1: 25–53	
Сычева Н.А. Сейсмоструктурные деформации Алтае-Саянской горной области. Часть I	3: 223–242
Сычева Н.А. Сейсмоструктурные деформации Алтае-Саянской горной области. Часть II	4: 335–356
Сычева Н.А. см. Богомолов Л.М. 1: 25–53	
Устюгов Г.В., Еришов В.В. Влияние космических факторов на грязевулканическую деятельность Земли	1: 5–24
Харламов А.А. см. Разжигаева Н.Г. 4: 357–374	
Чибисова М.В. см. Дегтерев А.В. 2: 212–218; 4: 427–438	
Чибисова М.В., Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Романюк Ф.А. Сахалинская группа реагирования на вулканические извержения (SVERT): 20 лет мониторинга вулканической активности на Курильских островах	4: 448–453
Шакиров Р.Б., Мальцева Е.В., Веникова А.Л., Соколова Н.Л., Гресов А.И. Комплексные геолого-геофизические исследования по обоснованию внешней границы континентального шельфа России в Охотском и Восточно-Сибирском морях (2006–2009 гг.): обзор	3: 264–275
Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С., Валитов М.Г., Шкабарня Г.Н., Веникова А.Л., Соколова Н.Л., Мальцева Е.В. Научное сотрудничество Вьетнамской академии наук и технологий (ВАНТ) и ТОИ ДВО РАН	4: 439–447
Шакуро С.В. см. Мингалева Т.А.	
Шевченко Г.В., Ложкин Д.М. Сезонные и межгодовые вариации температуры поверхности моря в Татарском проливе по спутниковым данным	3: 276–291
Шкабарня Г.Н. см. Шакиров Р.Б. 4: 439–447	