

## Влюбленный в движение

Интервью члена-корреспондента РАН Б.В. Левина

*Это интервью связано с вашим юбилеем, поэтому хочется начать с самого начала.*

*Вы «родились» ученым или судьба вела вас к науке иными путями? Играла ли какую-то роль в этом ваша семья, родители?*

Какие-либо предрасположения к тому, чтобы судьба направила меня по научной линии, у меня отсутствовали. По крайней мере, я такого не ощущал. Среди моих родных и близких не было людей науки. Отец, Левин Вульф Хаимович (1900–1983), приехавший в Москву из Чернигова, был тренером по гимнастике у кремлевских курсантов. Видимо, от него я унаследовал ген тяги к спорту. В 1941 году он выехал в Каунас в командировку, получил там звание лейтенанта, был призван на фронт и прошел всю войну, закончив службу в звании подполковника. Был награжден орденами и медалями. Мать, Елена Самойловна (1902–1974), окончившая гимназию в Чернигове, работала заведующей библиотекой в Краснопресненском районе Москвы, она смогла привить своим детям любовь к чтению и уважение к знаниям.

Интерес к геологии проявился у меня, как у многих ребят того времени, со школьной скамьи, поскольку я попал в кружок геологии и азартные студенты Московского геолого-разведочного института легко завладели душой новообращенного искателя знаний. Однако медкомиссия МГРИ меня отвергла по близорукости, и я направил свои стопы серебряного медалиста в Горный институт. На первом курсе я попал в секцию альпинизма и быстро в ней утвердился. Альплагеря, экспедиции и командный дух этого спорта пришлись по душе, и к 26 годам я уже стал мастером спорта СССР по альпинизму и призером чемпионатов страны. Альпинизм считался спортом интеллектуалов, и среди моих друзей было много ученых, кандидатов и докторов наук. Например, доктор физико-математических наук Юрий Михайлович Широков, заведующий кафедрой физики в Московском горном институте и профессор МГУ, был одновременно мастером спорта СССР по альпинизму и азартным горнолыжником. Это сдружило нас на Кавказе и потом в высоких горах Памира, а затем мы с Юрием Михайловичем, профессором МГУ в 3-м поколении, пришли к совместным поискам интересных задач по физике в Горном институте. Среди моих старших знакомых был Нобелевский лауреат физик Игорь Евгеньевич Тамм, с которым довелось встречаться в альплагере «Алибек», где он бывал неоднократно и охотно общался с молодыми альпинистами.

*Кого вы считаете своим учителем?*

В аспирантуре МГИ моим научным руководителем был заведующий кафедрой физики доктор тех-



Студент МГИ. На лацкане значок «Альпинист СССР I степени». 1959.

нических наук Петр Иосифович Воронов. Но учителем своим считаю профессора Льва Владимировича Альтшулера, одного из отцов-основателей советского атомного проекта, лауреата Ленинской премии и трижды лауреата Государственной премии. В его лабораторию во ВНИИ оптико-физических измерений Госстандарта СССР я перешел работать после защиты кандидатской диссертации в 1972 году. Работать со Львом (так его называли уважительно все сотрудники лаборатории и в Москве, и ранее в Сарове) было очень интересно и напряженно. Понимание того, как работает человеческий мозг, а он работает скачками, я узнал из общения со Львом. При решении физических задач коллективно (командный мозговой штурм) я заметил, что он выбрасывает из рассмотрения те звенья задачи, которые требуют остановки моих мыслительных способностей (и не только моих). Размер скачка мыслительного процесса Льва был во много раз больше, чем у его сотрудников, и даже у его коллег по науке. У него были очень высокие требования к работникам. Невыполнение поставленной задачи к сроку обычно заканчивалось увольнением. Люди у Альтшулера долго не задерживались, увольнялись сами, что в советские времена в науке было нетипично.

Интервью опубликовано в журнале «Геосистемы переходных зон», 2017, № 3. Печатается с незначительными сокращениями.

*Помните ли вы свою первую научную статью?*

Конечно. Я тогда работал в Институте горного дела имени А.А. Скочинского. Статья называлась «Влияние горного давления на эффективность короткозамедленного взрывания в лавах» и была напечатана в сборнике «Взрывное дело» издательства «Недра» в 1966 году.

*После окончания Московского горного института вы работали инженером-взрывником. Инженерная практика дала что-нибудь вашей научной деятельности? Что определило ваш интерес к исследованиям в области физики взрыва?*

Научная деятельность открывает в творческом человеке огромные возможности и беспредельную тягу к знаниям. Узнать причины, двигающие тем или иным процессом, продвинуться в понимании законов природы, научиться предвидеть последствия при изучении и решении больших задач – вот истинное наслаждение для человека, открывшего возможность пользоваться своими мозгами.

Инженерная практика сильно расширяет кругозор ученого, поскольку она нацелена на практическое решение задач, на получение реального запланированного результата. А попросту говоря, возможность приобретения инженерных навыков, необходимость решать технологические задачи переводит ученого в разряд создателя или добытчика знаний, которые уже прошли проверку опытом и становятся нужны как новый полезный инструмент.

*После защиты кандидатской диссертации вы работаете по приглашению профессора Л.В. Альтиулера в его лаборатории в Москве. И вдруг через два года оказываетесь на острове Итуруп, заведующим станцией сейсмоцунами. Что потянуло вас на край земли? Что привело от физики взрыва к физике цунами?*

Зимой 1972 года, во время катания на горных лыжах по склонам горы Чегет в Приэльбрусье, я встретил своего давнего друга и старшего товарища, кандидата технических наук и мастера спорта СССР по альпинизму Андрея Снесарева. Он рассказал мне, что работает заведующим Гидрофизической обсерваторией «Шикотан», изучает волны цунами и другие чудеса океана и предложил приехать к нему на остров Шикотан, чтобы работать в АН СССР. Отец Андрея, русский и советский военачальник, ученый с мировым именем генерал А.Е. Снесарев, был в 1930 году по двум пунктам обвинения приговорен к расстрелу, который был заменен десятью годами лагерей. Но тогда мы только учились восхищаться настоящими людьми. Конечно, я пообещал Андрею приехать к нему и вместе заниматься наукой. Так и оказался на Курилах. Я полностью был захвачен охотой за новыми знаниями. Физика взрывных процессов, физика ударных волн и физика волн цунами – это звенья одной цепи, физики волновых процессов, которые всегда привлекали



Это здание той самой сейсмостанции в Курильске, с которой начались сахалинские пути молодого ученого в далеком 1972 году.

мое внимание. Особенный интерес вызывали высокоэнергетические волновые процессы, которые могли помочь раскрыть секреты глобальных эффектов выделения энергии. Сейсмология и физика цунами здесь открывали большие возможности.

*И далее, где бы вы ни работали, оказывались в тесной связи с сахалинской сейсмологией и цунами. Испытательный полигон на южном Сахалине для взрывного моделирования процессов генерации цунами, неоднократные экспедиции на Курильские острова, проведение инициативных исследований и экспедиций по изучению последствий ряда катастрофических землетрясений – я вычленила далеко не полностью лишь «сейсмологическую» составляющую вашей разнообразной научной деятельности. Что из этого (или другого) кажется вам самым интересным?*

Самым интересным для меня всегда был Поиск Экспериментальной Проверки Новых Загадок Природы. Физика моретрясений, модификация экспериментальной установки для получения ряби Фарадея и регистрация параметрических волн на вибрирующей поверхности, проверка эффектов симметрии для источника волн цунами, явление всплывания тяжелого шара в вибрирующем песке – вот, примерно, круг решаемых физических задач, результаты по которым после публикации привлекли внимание коллег и специалистов.

Курильские острова всегда были для меня уникальным объектом природы и предметом поклонения и заботы. В первый этап своей работы на Сахалине и Курилах (с 1972 по 1980 год) мне посчастливилось подняться на многие вулканы Курильских островов (Тятя-яма, Алайд, Эбеко, Баранского, Иван Грозный, Богдан Хмельницкий, Чирип) и познакомиться с их структурой, геоморфологией, геофизическими особенностями.

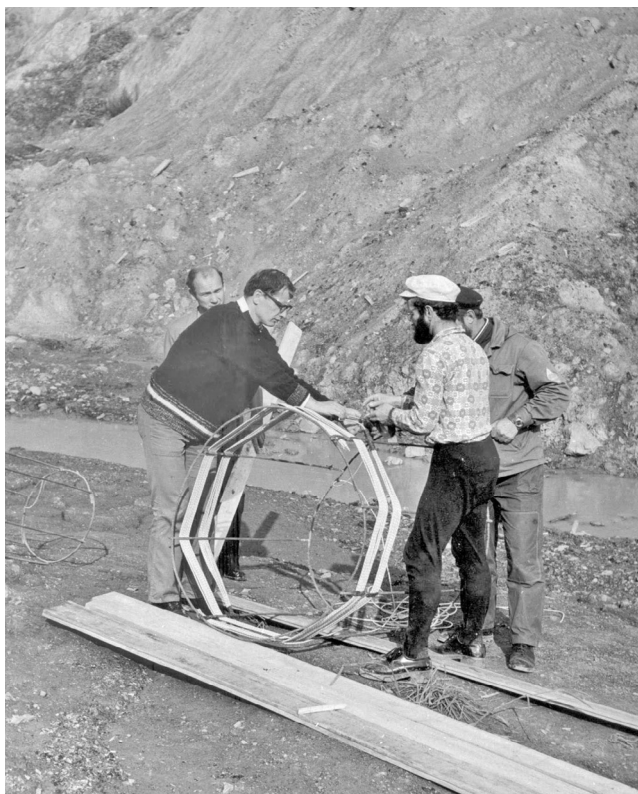


С верным Кучумом. Остров Итуруп.  
Изучение вулкана Баранского. 1973

Вулканические постройки представляли собой удивительные загадки природы, а их расположение на краю гигантской океанической впадины только усиливало притягательность каждого объекта.

*Не буду перечислять многочисленные должности и посты, которые вам пришлось занимать. А что вы сами считаете наиболее важным в своем послужном списке?*

Очень большой и ценный опыт я приобрел во время работы в РФФИ под руководством блестящего ученого и организатора науки академика А.А. Гончара. До этого мне посчастливилось работать с такими высокоталантливыми людьми, как профес-



Подготовка взрывных экспериментов на геофизическом полигоне пос. Новиково (Сахалин).  
С сотрудниками СахКНИИ ДВНЦ АН СССР.

сор Л.В. Альтшулер, академики М.А. Лаврентьев, С.В. Гольдин, А.М. Фридман. Весь накопленный опыт оказался чрезвычайно полезным при моем переходе на должность директора ИМГиГ ДВО РАН.

*Вы возглавляли ИМГиГ ДВО РАН с 2004 по 2015 год. В институте в это время кипела жизнь: международные и российские научные мероприятия, экспедиции, школы-семинары для молодых ученых, по вашей инициативе при институте организован диссертационный совет по защите докторских диссертаций, и т.д. Комплексное изучение последствий катастрофических землетрясений на Средних Курильских островах, структурный анализ экстремальных колебаний уровня океана и следов цунами для оценки цунамиопасности побережий, и т.д. Какими разработками института и своими тех лет вы могли бы гордиться?*

Полагаю, что организация экспедиций на Курильские острова, постановка геодезических наблюдений на труднодоступных островах Курильской гряды, развитие систем спутниковых наблюдений, включение сейсмологических наблюдений на Сахалине и Курильских островах в систему глобальных каталогов и анализ закономерностей этих каталогов, сопоставление сейсмичности Земли и Луны, выявление определенных закономерностей в сейсмичности планетных тел, выделение класса вариаций сейсмичности Земли, связанных с вариациями скорости ее вращения вокруг оси (2017) – вот, по-видимому, основной перечень научных направлений, развиваемых нашей командой в институте. Сюда можно добавить оригинальные разработки конца прошлого века по изучению моретрясений, созданию специального опытного стенда по моделированию моретрясений, использованию и адаптации методики получения ряби Фарадея, открытию фазовых переходов в решетке параметрических волн на модели моретрясения, работы по изучению эффектов вибрации водного слоя.

*Как высказался недавно руководитель Центра исследований идеологических процессов А. Рубцов в газете «Ведомости», «реформа науки осуществляется исключительно в интересах околонулевого менеджмента, но скоро не оставит камня на камне от того, чем еще можно хоть как-то управлять, а главное - предъявлять». У Вас большой опыт управления наукой, согласны ли вы с таким категоричным заявлением? И в свете этого как оцениваете перспективы российской, дальневосточной науки и сахалинской в частности? На что надеетесь?*

Перспективы развития науки в России и в Дальневосточном регионе оцениваю не очень оптимистично. Полагаю, что нужен новый виток развития, нужно возникновение потребностей в науке среди госструктур, нужно появление мыслящих и творческих людей не только в науке и культуре, но и в слое предпринимателей. И ростки этого в стране заметны, это внушает надежду.



Председатель ДВО РАН академик В.И. Сергиенко вручает Б.В. Левину премию имени академика С.Л. Соловьева за серию работ по фундаментальному исследованию природных катастроф – землетрясений и цунами. 2010

*Борис Вульфович, за вами числятся такие два хобби, что одного из них было бы достаточно для биографии человека. Как я понимаю, одно родило другое – горы родили песню. Расскажите, если можно. Почему человек поет?*

Почему человек поет? Это хороший вопрос. Но ответить на него короткой фразой вряд ли кто возьмется. Человек поет, когда находится в гармонии с самим собой. Это чаще всего бывает в горах, в море, в экспедиции, в походе. В таких ситуациях расцветает личность и настраивается на созидательный процесс. Человек выполняет работу, получает удовольствие, труд и состояние свободы – это необходимые



На фоне Эвереста, Гималаи, Гора Кала-Паттар (5644 м). С Еленой Васильевной Сасоровой. 2011

компоненты развития. Человеку комфортно, когда он создает новую форму, новое творение, которое еще никому не удавалось создать. Я считаю, что песня родилась в первобытные времена, когда волчьи, а затем и человеческие стаи выражали свое настроение звуковым или песенным творчеством. А потом уже, следом за песней, появилось СЛОВО. Надо отважиться и развить эту тему, которая, по моему мнению, очень перспективна.

*О чем я не спросила вас, а вы хотели бы рассказать?*

Мне хотелось бы назвать имена людей, которые оставили большой след в моей жизни. Порядок перечисления я буду использовать хронологический, по мере появления людей на моем горизонте. В основном это люди, достигшие значительных результатов в науке и в спорте и оставившие после себя заметный след в своей области. Александр Блещунов, альпинист, физик-инженер, собиратель редкостей, из Одессы; Игорь Солодуев, мастер спорта СССР по альпинизму, первая скрипка Большого театра; Леонид Дмитриев, мастер спорта СССР по альпинизму, член жюри конкурса им. П.И. Чайковского, вокалист и медик; Игорь Тамм, академик, физик, Нобелевский лауреат, альпинист; Михаил Лаврентьев, академик, организатор СО РАН; Евгений Тамм, мастер спорта СССР по альпинизму, физик, член-корреспондент РАН; Михаил Хергиани и Вячеслав Онищенко, заслуженные мастера спорта СССР по альпинизму, скалолазы-виртуозы; горнолыжники Людвиг Фаддеев, академик, математик, Альберт Ширяев, академик, математик, Алексей Фридман, академик, физик, альпинист, Сергей Гольдин, академик, геофизик, Андрей Славнов, академик, математик, турист-водник. Совсем недавно ушел из жизни мой близкий друг, единомышленник, один из создателей РФФИ, член-корреспондент РАН Юрий Авсюк. Это был человек-праздник. Человек, увлеченный наукой, озабоченный сохранением науки в России и верящий в хороших людей.

Я благодарен этим людям и многим другим, встреченным на жизненном пути, не имеющим званий и степеней, но оставившим глубокий след в моей жизни.

Большим жизненным везением считаю то, что моей женой и спутником жизни стала Елена Васильевна Сасорова, мой друг, коллега и сподвижник во всех основных делах и свершениях. Мы нашли друг друга и выбрали свой союз в 1959 году. С тех пор все наши дороги, увлечения, горвосхождения и горнолыжные спуски, научные искания, статьи и монографии, экспедиции, песни и стихи, путешествия по разным странам и постоянная любовь к Сахалину и Курилам стали общим делом и общим действием.

Низкий поклон хорошим людям, делающим свое дело, и огромное спасибо сахалинцам, Курильчанам и Дальневосточникам за освоение земли нашей.

За приятность! (подаренный мне тост безымянного крестьянина из села Богословское Владимирской области).

*Интервью подготовила Г.Ф. Низяева.*

**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:

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

**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:

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

*Адрес учредителя и издателя*

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

© ИМГиГ ДВО РАН, 2022

**Редакционная коллегия***Главный редактор*

**Левин Борис Вульфович**, член-корреспондент РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск; Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

*Заместитель главного редактора*

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

*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
- **Завьялов Петр Олегович**, чл.-корр. РАН, д-р геогр. наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва
- **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
- **Марапулец Юрий Валентинович**, д-р физ.-мат. наук, доцент, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, Паратунка
- **Обжиров Анатолий Иванович**, д-р геол.-минер. наук, профессор, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток
- **Огородов Станислав Анатольевич**, профессор РАН, д-р геогр. наук, чл.-корр. РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
- **Плехов Олег Анатольевич**, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
- **Разжигаяева Надежда Глебовна**, д-р геогр. наук, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток
- **Ребецкий Юрий Леонидович**, д-р физ.-мат. наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва
- **Родкин Михаил Владимирович**, д-р физ.-мат. наук, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва

**Editorial Board***Editor-in-Chief*

**Boris W. Levin**, Corr. Member of the RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk; P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia

*Deputy Editor-in-Chief*

**Leonid M. Bogomolov**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Director, 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
- **Peter O. Zavyalov**, Corr. Member of RAS, Dr. Sci. (Geogr.), P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow
- **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, The 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
- **Anatoly I. Obzhirrov**, Dr. Sci. (Geol. and Miner.), Professor, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the FEB RAS, Vladivostok
- **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

## Редакционная коллегия

- **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
- **Сергеева Ирина Вячеславовна**, д-р биол. наук, профессор, Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, Саратов
- **Такахаша 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
- **Ярмолюк Владимир Викторович**, академик РАН, д-р геол.-минер. наук, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

## Editorial Board

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

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

**Переводчик Качесова Галина Сергеевна**

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

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

Формат 60 × 84 /8. Усл. печ. л. 14,2.  
 Тираж 150 экз. Заказ 8000. Свободная цена.  
 Дата выхода в свет 28.12.2022.

Подписной индекс в Объединенном интернет-каталоге «Пресса России» (www.pressa-ru.ru) – 80882, в электронном каталоге Почты России – ПС539. По вопросам распространения обращаться также в редакцию.

**Translator Galina S. Kachesova**

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

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

Sheet size 60 × 84 /8. Conv. print. sheets 14,2.  
 Number of copies 150. Order no. 8000. Free price.  
 Date of publishing 28.12.2022.

Subscription index in the United web-catalogue "Press of Russia" (www.pressa-ru.ru) – 80882, in the electronic catalogue of the Russian Post – ПС539. Please also contact the Editorial Office for distribution.

## СОДЕРЖАНИЕ

Памяти Бориса Вульфовича Левина ..... I-IV

## Геофизика. Сейсмология

## ОБЗОР

Н.Ф. Василенко, А.С. Прытков, Д.И. Фролов. Геодинамические GNSS наблюдения на Курильских островах ..... 287

Геоинформатика. Геотектоника и геодинамика.  
Палеогеография

Р.Ф. Булгаков. Напряженно-деформированное состояние земной коры о. Сахалин с учетом воздействия вертикальных деформаций, вызванных эффектом гидроизостазии .... 303

## Вулканология

## МОНИТОРИНГ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

А.В. Дегтерев, М.В. Чибисова. Эксплозивная активность вулкана Чикурачки в январе–октябре 2022 г. (о. Парамушир, Северные Курильские острова) ..... 328

## Экология. Геоэкология

Е.О. Вацерионова, А.В. Копанина, И.И. Власова. Кора ассимиляционных побегов кустарника спиреи Бовера (*Spiraea beauverdiana* S.K. Schneid.): структурные изменения в условиях вулканогенного стресса южных Курильских островов и полуострове Камчатка ..... 339А.И. Тальских, А.В. Копанина, И.И. Власова. Особенности структурного отклика коры и древесины березы плосколистной (*Betula platyphylla*, Betulaceae) в ландшафтах морских побережий, магматических и грязевых вулканов Сахалина и Курильских островов ..... 360

А.К. Ежкин. Напочвенные лишайники термальных местообитаний южных Курильских островов ..... 380

С.А. Низяев. Экологические аспекты многолетнего распределения промыслового стада камчатского краба в заливе Анива (о. Сахалин) ..... 388

## От редакции

Тематический и авторский указатели статей, опубликованных в журнале «Геосистемы переходных зон» в 2022 г. (том 6) .... 405

## CONTENT

In memory of Boris Vul'fovich Levin ..... I-IV

## Geophysics. Seismology

## REVIEW

## TRANSLATION

N.F. Vasilenko, A.S. Prytkov, D.I. Frolov. Geodynamic GNSS observations on the Kuril Islands ..... 295

Geoinformatics. Geotectonics and geodynamics.  
Palaeogeography

## TRANSLATION

R.F. Bulgakov. Modeling of the stress-strain condition of the Earth's crust of Sakhalin Island: impact of hydroisostasy ..... 316

## Volcanology

## MONITORING OF GEOLOGICAL HAZARDS

A.V. Degterev, M.V. Chibisova. The explosive activity of Chikurachki volcano in January–October 2022 (Paramushir Island, Northern Kuriles) ..... 328

## Ecology. Geoecology

E.O. Vatsierionova, A.V. Kopanina, I.I. Vlasova. Bark of assimilation shoots of the Beauverd spirea shrub (*Spiraea beauverdiana* S.K. Schneid.): structural changes under the conditions of volcanic stress in the South Kuril Islands and the Kamchatka Peninsula ..... 339A.I. Talskih, A.V. Kopanina, I.I. Vlasova. Features of the structural response of the bark and wood of birch (*Betula platyphylla*, Betulaceae) in the landscapes of sea coasts, magmatic and mud volcanoes of Sakhalin and the Kuril Islands ..... 360

A.K. Ezhkin. Soil lichens in thermal habitats on Southern Kuriles ..... 380

S.A. Nizyaev. Ecological aspects of the interannual dynamics of the distribution of aggregations of the Red King Crab in Aniva Bay (Sakhalin Island) ..... 388

## From the Editorial Board

Topical index of articles published in the journal "Geosystems of Transition Zones" in 2022 (volume 6) ..... 405

© Авторы 2022 г. Открытый доступ.  
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2022. Open access.  
Content is available under Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)

ОБЗОР

УДК 551.242.1:528.344

<https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.287-294.295-302>  
<https://www.elibrary.ru/rlpzkk>

## Геодинамические GNSS наблюдения на Курильских островах

Н. Ф. Василенко<sup>1</sup>, А. С. Прытков<sup>\*1</sup>, Д. И. Фролов<sup>2, 1</sup>

<sup>\*</sup>E-mail: [a.prytkov@imgg.ru](mailto:a.prytkov@imgg.ru)

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

<sup>2</sup>Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

**Реферат.** В 2006 г. на всем протяжении Курильской островной дуги, от Японии до Камчатки, развернута сеть геодинамических GNSS-наблюдений. В состав сети вошли 11 пунктов непрерывной и периодической регистрации. В работе приведены сведения об организации сети и ее состоянии в настоящее время. Создание сети GNSS-наблюдений дало обширный материал для изучения современных геодинамических процессов в Курильском сегменте зоны субдукции Североамериканской (Охотской) и Тихоокеанской литосферных плит. Выполненные наблюдения позволили получить первые сведения о современной геодинамике региона. В работе представлен обзор результатов предшествующих лет, полученных авторами совместно с другими исследователями. На основе инструментальных данных построены модели очагов крупнейших сейсмических событий: дуплета Симуширских землетрясений 2006 г. Mw 8.3 и 2007 г. Mw 8.1 и глубокофокусного Охотоморского землетрясения 2013 г. Mw 8.3. На начальном этапе постсейсмического процесса в эпицентральной зоне Симуширских землетрясений выявлена зависимость вязкости астеносферы от скорости наблюдаемого постсейсмического смещения земной поверхности. Полученные ранее результаты дополнены новыми данными об изменении геодинамической обстановки в зоне субдукции. Исследована динамика переходного затухающего постсейсмического процесса в центральной части островной дуги. Релаксация напряжений в земной коре на различных стадиях этого процесса могла являться триггером мощных вулканических извержений, произошедших в 2009–2019 гг. на центральных Курильских островах. На основе моделирования современного механического сцепления литосферных плит уточнен сейсмический потенциал различных сегментов Курильской зоны субдукции, что в совокупности с другими методами способствует более точной оценке сейсмической опасности региона. Продолжение GNSS-наблюдений на Курильских островах в дальнейшем позволит детально исследовать характерные особенности современной геодинамики региона.

**Ключевые слова:** современная геодинамика, GNSS-наблюдения, землетрясение, моделирование

## Geodynamic GNSS observations on the Kuril Islands

Nikolay F. Vasilenko<sup>1</sup>, Alexander S. Prytkov<sup>\*1</sup>, Dmitry I. Frolov<sup>2, 1</sup>

<sup>\*</sup>E-mail: [a.prytkov@imgg.ru](mailto:a.prytkov@imgg.ru)

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

<sup>2</sup>Ioffe Physical-Technical Institute, RAS, Saint Petersburg, Russia

**Abstract.** The network of geodynamic GNSS observations was deployed in 2006 throughout the Kuril island arc from Japan to Kamchatka. The network includes 11 stations of continuous and periodic registration. The article provides information on the organization of the network and its current status. The creation of the GNSS network provided extensive material for studying the modern geodynamic processes in the Kuril segment of the subduction zone of the North American (Okhotsk) and Pacific lithospheric plates. The performed observations made it possible to obtain the first information on the modern geodynamics of the region. The article presents an overview of the results of the previous years obtained by the authors together with other researchers. The source models of the largest seismic events are constructed on the basis of the instrumental data: the 2006 Mw 8.3 and 2007 Mw 8.1 Simushir earthquake doublet and the 2013 Mw 8.3 deep-focus Okhotsk earthquake. At the initial stage of the post-

seismic process in the epicentral zone of the Simushir earthquakes, the dependence of the asthenosphere viscosity on the observed post-seismic displacement velocity of the Earth's surface was found. The results obtained earlier were supplemented by new data on the changes in the geodynamic setting in the subduction zone. The dynamics of the transient decaying post-seismic process in the central part of the island arc is studied. Stress relaxation in the Earth's crust at various stages of this process could be the trigger of powerful volcanic eruptions occurred in 2009–2019 on the central Kuril Islands. The seismic potential of various segments of the Kuril subduction zone has been clarified on the basis of the modeling of current mechanical coupling of lithospheric plates. It contributes to a more accurate assessment of the seismic hazard of the region together with other methods. The continuation of the GNSS observations on the Kuril Islands in the future will allow us to study in detail the features of the modern geodynamics of the region.

**Keywords:** modern geodynamics, GNSS observations, earthquake, modeling

**Для цитирования:** Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Фролов Д.И. Геодинамические GNSS наблюдения на Курильских островах. *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 4, с. 287–302. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.287-294.295-302>; <https://www.elibrary.ru/rpzkk>

**For citation:** Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I. Geodynamic GNSS observations on the Kuril Islands. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 4, pp. 287–302. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.287-294.295-302>; <https://www.elibrary.ru/rpzkk>

## Введение

Курило-Камчатская зона субдукции является одним из наиболее сейсмоактивных регионов северо-восточной части Евразии, где скорость пододвигания Тихоокеанской литосферной плиты под Североамериканскую (Охотскую) достигает 8 см/год. Взаимодействие литосферных плит сопровождается тектоническими деформациями, которые проявляются как на границе плит, так и в ее окрестностях. Здесь происходят наиболее крупные (с магнитудой более 8), в том числе цунамигенные и глубокие (более 600 км) землетрясения.

В 1970-х годах на о. Шикотан, ближайшем к зоне субдукции, был создан геодинамический полигон для изучения современных движений земной поверхности и поиска предвестников сильных землетрясений. Первые высокоточные светодальномерные измерения сторон плановой сети из 4 пунктов были выполнены в 1973 г. В последующие годы геодезическая сеть дополнялась новыми пунктами наблюдений, контролирующими разрывные нарушения северо-восточной части острова [1]. Для изучения вертикальных движений были созданы два нивелирных профиля II класса (вдоль и поперек острова) протяженностью 11 и 14.5 км соответственно. По результатам повторных наблюдений, которые выполнялись до 1990 г., оценены скорости горизонтальных смещений в зонах разломов, в отдельных случаях установлена связь горизонтальных и вертикальных де-

формаций земной поверхности с региональной сейсмичностью [2].

Для выявления возможных крупномасштабных деформаций северо-восточной части острова в результате Шикотанского землетрясения 4(5).10.1994 г. Mw 8.3 впервые в регионе были использованы современные средства спутниковой GPS-геодезии [2]. GPS (Global Positioning System) измерения, проведенные на геодинамическом полигоне после землетрясения, показали, что катастрофические coseismic смещения блоков земной коры, нарушающие целостность геологических структур острова, отсутствуют. В районе исследований проявились только небольшие горизонтальные деформации, не превышающие величины  $10^{-5}$ .

Создание сети GNSS (Global Navigation Satellite System) наблюдений на всем простирании Курильской островной дуги, от Японии до Камчатки, дало обширный материал для изучения современных геодинамических процессов в зоне конвергенции Североамериканской (Охотской) и Тихоокеанской литосферных плит. В работе представлены сведения об организации сети и ее состоянии в настоящее время. Обзор основных результатов GNSS-исследований, полученных в последние годы, дополнен новыми данными об изменении геодинамической обстановки в Курильской зоне субдукции и ее связи с мощными вулканическими извержениями на центральных Курильских островах.

## Организация и современное состояние сети геодинимических GNSS-наблюдений

Начало организации сети геодинимических наблюдений на Курильских островах можно отнести к 2005 г., когда были проведены первые измерения на пункте периодических наблюдений VDLN на юге о. Уруп (рис. 1).

В 2006 г. региональная сеть GNSS-наблюдений была развернута вдоль всей Курильской островной дуги от Японии до Камчатки на протяжении около 1200 км. В ее состав вошли станции непрерывной регистрации

KUNH, SHIK, ITRP и PRMH, расположенные на территории сейсмостанций Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН) «Южно-Курильск», «Шикотан», «Курильск» и «Северо-Курильск», а также станция непрерывных наблюдений URUP на севере о. Уруп. В центральной части островной дуги (на необитаемых островах Кетой, Матуа и Харимкотан) и о. Парамушир (мыс Океанский) были оборудованы пункты периодической регистрации KETO, MATC, KHAR и PRM1 соответственно.

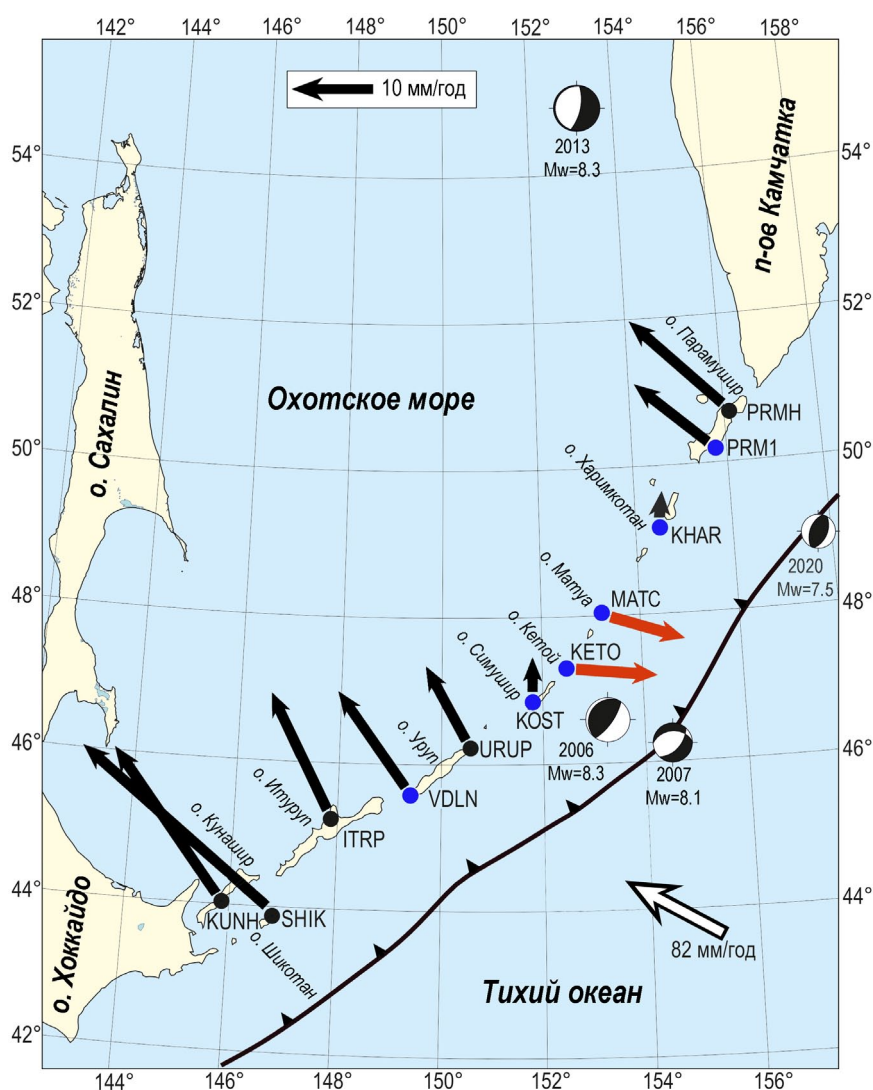


Рис. 1. Схема расположения GNSS-пунктов Курильской геодинимической сети.

Черным цветом обозначены пункты непрерывной, синим – пункты периодической регистрации. Стрелками изображены межсейсмические скорости пунктов относительно Североамериканской плиты. Красные стрелки отображают скорости постсейсмической релаксации в результате Симуширских землетрясений 2006–2007 гг. за период 2015–2016 гг. Среднеквадратические ошибки определения скоростей не превышают 2 мм. Масштаб скоростей показан в верхней части рисунка. Скорость схождения литосферных плит показана белой стрелкой. Механизмы очагов сильнейших сейсмических событий региона приведены по данным USGS (USGS: The United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov>).



**Рис. 2.** Пункт автономной регистрации МАТС (о. Матуа) (а) и пункт непрерывной регистрации ШИК (о. Шикотан) (б).

В 2007 г. после дуплета Симуширских землетрясений 15.11.2006 г.  $M_w$  8.3 и 13.01.2007 г.  $M_w$  8.1 [3] на о. Симушир (перешеек Косточко) дополнительно оборудован пункт периодической регистрации KOST. Наблюдения на пунктах КЕТО, МАТС (рис. 2а) и КНАР, ближайших к эпицентральной зоне, с 2007 г. осуществлялись в режиме автономной непрерывной регистрации, которая продолжалась до сентября–декабря 2016 г. В 2017 г. эти станции переведены в режим периодической регистрации.

Непрерывная регистрация на станциях юга Курильской островной дуги KUNH, SHIK и ITRP в 2013 г. была по техническим причинам прекращена и возобновлена на станциях KUNH (о. Кунашир) и ITRP (о. Итуруп) в 2017 г. в рамках Целевой комплексной программы научных исследований ДВО РАН «Современная геодинамика, активные геоструктуры и природные опасности Дальнего Востока России» [4]. Станция SHIK (о. Шикотан) восстановлена только в 2022 г. (рис. 2б). Современное состояние геодинамической GNSS-сети приведено на рис. 1.

Станции непрерывной регистрации оборудованы GNSS-приемниками Trimble NetRS с антеннами Zephyr Geodetic или Trimble NetR5 с антеннами Zephyr Geodetic model 2 (рис. 2). Наблюдения осуществляются с 1–30-секундной дискретностью данных и маской возвышения спутников от  $5^\circ$ . Периодические измерения выполняются теми же типами GNSS-приемников и антенн. Продолжительность таких измерений обычно составляет не менее 3 сут на каждом пункте наблюдений. Для минимизации сезонного влияния на точность позиционирования все полевые работы проводятся в летне-осенний период.

Обработка данных осуществляется с использованием программного обеспечения Bernese [5] и GAMIT/GLOBK [6]. Для связи сетей с общеземной системой координат ITRF (International Terrestrial Reference Frame) [7] в ежедневные решения включаются станции международной IGS-сети (International GNSS Service), имеющие длительную временную стабильность. При этом используются финальные орбиты спутников, представленные IERS (International Earth Rotation and

Reference Systems Service), таблицы зависимостей фазовых центров антенн, параметров Солнца и Луны и другие материалы, рекомендованные Международной GNSS-службой (IGS: International GNSS Service. URL: <https://igs.org/>).

## Результаты исследований

### *Модели механизмов очагов сильнейших землетрясений региона*

В последние годы в Курило-Камчатском регионе произошел ряд сильнейших сейсмических событий. На основе зафиксированных инструментальных данных о косейсмических смещениях земной поверхности выполнено моделирование их очагов.

*Симуширские землетрясения 15.11.2006 г. Mw 8.3 и 13.01.2007 г. Mw 8.1* – крупнейшие сейсмические события последнего времени в Курильской сейсмогенной зоне. Они произошли восточнее о. Симушир вблизи глубоководного желоба на глубине около 12 км (рис. 1). В долгосрочном сейсмологическом прогнозе С.А. Федотова [8] этот район был обозначен как одно из мест возможных землетрясений с  $M \geq 7.7$ . Заплеск цунами на центральных Курильских островах от этих землетрясений достигал 20 м [9].

Кусочно-однородные дислокационные модели Симуширских землетрясений построены на основе инверсии горизонтальных косейсмических смещений GNSS-станций Курильской геодинамической сети и станций Международной GNSS-службы, расположенных в Южно-Сахалинске и Петропавловске-Камчатском [3]. Землетрясение 2006 г. (по типу сейсмодислокаций – пологий надвиг под углом  $\sim 16^\circ$ ) произошло в зоне контакта литосферных плит. Общий размер сейсморазрыва составил 230 км по простиранию и 150 км по падению. Максимальные модельные смещения достигают 6–12 м в южных приповерхностных субразрывах, близких к гипоцентру.

Землетрясение 2007 г. (сброс по плоскости, круто падающей на юго-восток под углом  $59^\circ$ ) произошло в районе изгиба Тихоокеанской литосферной плиты. Величины модельных смещений максимальны (до 8 м) вблизи гипоцентра в южном фрагменте плоскости

сейсморазрыва. Участки наибольшего скольжения обоих землетрясений примыкают друг к другу и позволяют предполагать, что событие 2007 г. связано с перераспределением напряжений после землетрясения 2006 г.

*Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г. Mw 8.3* – редкое сильное глубокофокусное сейсмическое событие, зарегистрированное в Охотском море вблизи западного побережья п-ова Камчатка на глубине 610 км (рис. 1). Землетрясение сопровождалось серией афтершоков, что нетипично для таких событий. Косейсмические смещения земной поверхности зарегистрированы GNSS-станциями непрерывных наблюдений всего региона на расстояниях до 1000 км от эпицентра. Впервые в мировой практике на основе косейсмических смещений построена дислокационная модель глубокофокусного землетрясения в упругом полупространстве с учетом сферичности и слоистости Земли [10]. Тип подвижки в очаге – пологий сброс западного падения под углом  $11^\circ$ , максимальная подвижка – 7 м. Погружающаяся Тихоокеанская плита по толщине была разорвана на 50 км.

*Парамуширское землетрясение 25.03.2020 г. Mw 7.5* произошло в 200 км к юго-востоку от одноименного острова в погружающейся океанической плите под внешним склоном глубоководного желоба на глубине  $\sim 60$  км (рис. 1). Оно явилось сильнейшим с 1900 г. сейсмическим событием как для внешнего склона протяженностью около 800 км, так и для прилегающей к эпицентру трехсоткилометровой Курило-Камчатской зоны субдукции. Пространственное распределение афтершоков и модели конечных прямоугольных дислокаций (finite fault) не позволили сделать выбор в пользу приоритетной плоскости сейсморазрыва. Сравнение модельных и измеренных косейсмических горизонтальных смещений на ближайшей к эпицентру GNSS-станции PRMH позволило однозначно установить действующую плоскость сейсморазрыва [11]. В очаге землетрясения реализовались напряжения субгоризонтального сжатия, ориентированные вкрест тектонических структур сейсмофокальной зоны, тип подвижки – взброс по плоскости юго-западного простирания с падением на северо-запад.

### Постсейсмическая релаксация в эпицентральной зоне дуплета Симуширских землетрясений

В центральной части Курильской островной дуги после дуплета Симуширских землетрясений 2006 г. Mw 8.3 и 2007 г. Mw 8.1 наблюдалась обширная зона затухающих постсейсмических смещений земной поверхности. Непрерывные GNSS-измерения позволили изучить динамику переходного процесса, обусловленного вязкоупругой релаксацией напряжений в астеносфере и оценить его длительность периодом  $\sim 10$  лет [12]. На начальном этапе постсейсмические горизонтальные смещения, направленные в сторону глубоководного желоба, и постсейсмический подъем проявлялись на простирании 450 км (от севера о. Уруп до о. Харимкотан). Горизонтальные скорости в ближайших окрестностях эпицентральной зоны достигали 90 мм/год, ежегодно уменьшаясь на  $\sim 30\%$  (рис. 3). К 2012 г. постсейсмические смещения земной поверхности практически закончились на пункте URUP (о. Уруп), а к 2014 г. – на пунктах

KNAR (о. Харимкотан) и KOST (о. Симушир). В 2015–2016 гг. затухающий постсейсмический процесс со скоростью  $\sim 10$  мм/год наблюдался только на пунктах КЕТО (о. Кетой) и МАТС (о. Матуа) (рис. 1).

Вязкость астеносферы – фундаментальное, но мало изученное свойство Земли. Моделирование переходного процесса в эпицентральной зоне дуплета Симуширских землетрясений позволило выявить зависимость максвелловской вязкости астеносферы от скорости наблюдаемого постсейсмического движения земной поверхности: вязкость астеносферы увеличилась в  $\sim 5$  раз от  $2 \cdot 10^{17}$  Па·с в первый год наблюдений (2008) до  $1 \cdot 10^{18}$  Па·с в 2011 г. [12].

Астеносферная вязкость, достигающая величины  $\sim 1 \cdot 10^{19}$  Па·с, проявлялась в течение нескольких десятилетий после сильнейших (Mw  $\sim 9$ ) межплитовых землетрясений XX в.: Чилийского землетрясения 1960 г. и Аляскинского землетрясения 1964 г. [13, 14]. Однако на юге Камчатки и северных Курильских островах постсейсмические смещения после Камчатского землетрясения 1952 г. спустя 50 лет не зафиксированы [3, 15], что может свидетельствовать о более низкой долговременной вязкости астеносферы в Курило-Камчатской зоне субдукции по сравнению с другими регионами. Конкретно оценить ее величину можно будет проведением последующих GNSS-наблюдений в эпицентральной зоне Симуширских землетрясений.

К зоне проявления постсейсмического процесса приурочены сильнейшие (с 1990 г.) вулканические извержения на Курильских островах. В июне 2009 г. (после 33 лет покоя и спустя 2.5 года после Симуширских землетрясений в период интенсивного процесса релаксации напряжений) произошло мощное эксплозивно-эффузивное извержение влк. Пик Сарычева на о. Матуа (Volcanic Explosivity Index (VEI) = 4) [16]. Автономной станцией непрерывных наблюдений МАТС, расположенной на острове в 7 км к юго-востоку от вулкана, зафиксировано смещение земной поверхности в течение активной фазы извержения. Станция сместилась на  $\sim 30$  мм в сторону кратера вулкана и опустилась на  $\sim 40$  мм.

В ноябре 2012 г., после 30-летнего периода покоя, на влк. Сноу (о. Чирпой – юг центральных Курил) началось побочное эффузивное из-

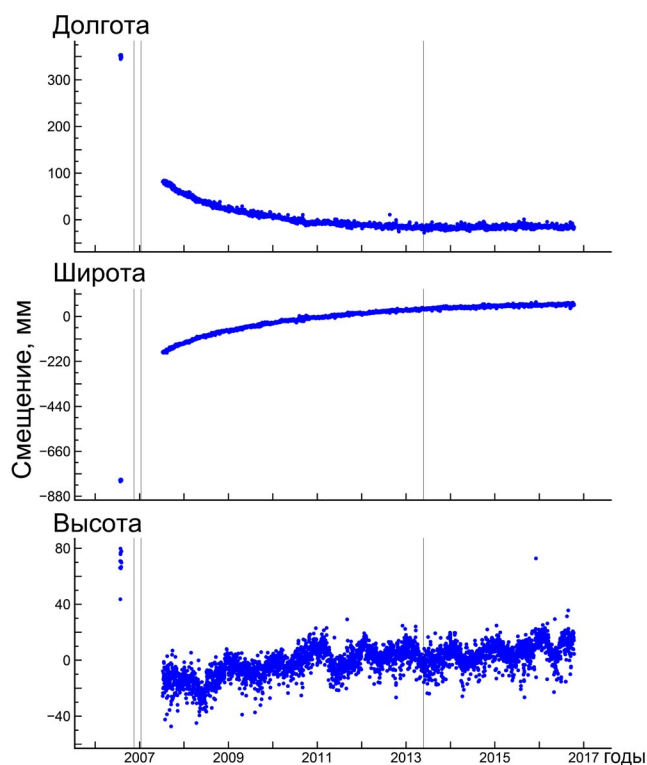


Рис. 3. Временные серии координат GNSS-станции КЕТО (о. Кетой). Вертикальными линиями обозначены даты Симуширских 2006–2007 гг. и Охотоморского 2013 г. землетрясений.

вержение. Активная фаза извержения продолжалась в течение четырех лет ( $VEI = 3$ ) [16] в период завершения релаксации напряжений в этом районе.

Мощное ( $VEI = 4$ ) и внезапное эксплозивное извержение вулкана на о. Райкоке (центральные Курилы) началось в июне 2019 г. после 95 лет покоя [17]. Оно произошло на стадии полного затухания постсейсмического процесса в этой части Курильской островной дуги. Можно полагать, что релаксация напряжений в земной коре на различных стадиях постсейсмического процесса в эпицентральной зоне Симуширских землетрясений оказалась триггером мощных вулканических извержений на центральных Курильских островах.

### Современный сейсмический дефицит в зоне субдукции

Анализ межсейсмических (очищенных от влияния землетрясений) скоростей GNSS-станций севера и юга Курильской островной дуги позволил выполнить моделирование современного сцепления Тихоокеанской и Североамериканской (Охотской) литосферных плит в условиях механически сомкнутой зоны их контакта и оценить динамику накопления напряжений в зоне субдукции. В настоящее время интенсивное накопление деформационных напряжений происходит в южной и северной частях Курильской зоны субдукции (рис. 4). В районе о. Шикотан ширина зоны контакта литосферных плит (по падению) достигает 183 км, на пункте PRMH (о. Парамушир) – 104 км [18]. Значимого накопления упругих напряжений в центральном сегменте зоны субдукции (от севера о. Уруп до о. Харимкотан) после Симуширских землетрясений не отмечено.

На основе кумулятивного смещения межплитовых землетрясений с  $M_w \geq 7.0$  за период с 1990 г. выявлены области современного сейсмического дефицита в Курильской зоне субдукции [18]. Дефицит сейсмического смещения величиной от 3 до 8.8 м (относительно скорости схождения литосферных плит) наблюдается на двух протяженных участках: от восточной части о. Хоккайдо до севера о. Кунашир (~200 км), и от о. Онекотан до юга п-ова Камчатка (~250 км). В долго-

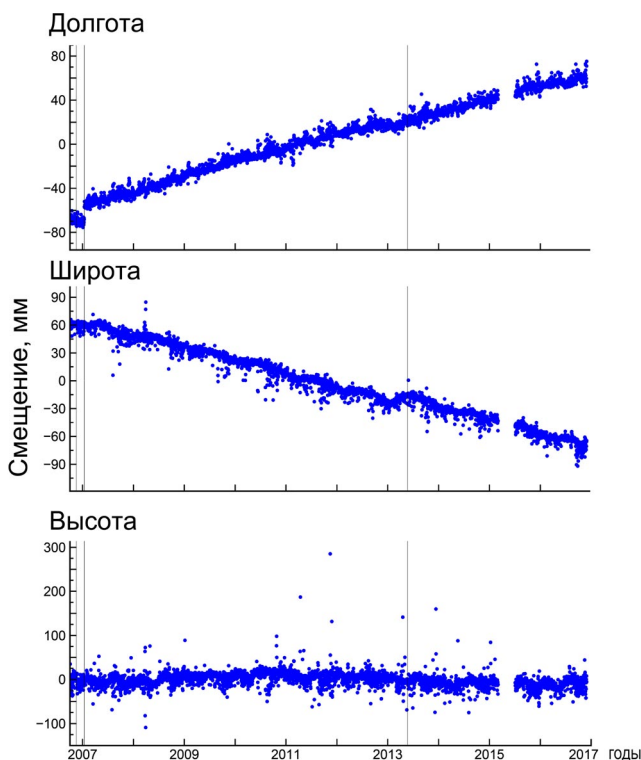


Рис. 4. Временные серии координат GNSS-станции PRMH (о. Парамушир). Вертикальными линиями обозначены даты Симуширских 2006–2007 гг. и Охотоморского 2013 г. землетрясений.

срочном сейсмическом прогнозе на период 2019–2024 гг. суммарная вероятность возникновения сейсмических событий с магнитудой  $M \geq 7.7$  в этих сегментах, соответственно, составляет 8.9 и 12.5 % [19]. При этом следует отметить, что Парамуширское землетрясение 25.03.2020 г.  $M_w 7.5$ , произошедшее под внешним склоном глубоководного желоба, увеличивает вероятность будущего сильного землетрясения в северном сегменте [11].

### Заключение

Организация сети непрерывных и периодических GNSS-наблюдений на Курильских островах дала обширный материал для изучения современных геодинамических процессов в Курильской зоне субдукции. Выполненные наблюдения позволили получить ряд новых сведений о современной геодинамике региона:

- построены модели крупнейших сейсмических событий, которые легли в основу исследования механизмов и тектонической природы их очагов, а также оценки геометрических параметров сейсморазрывов;

- изучена динамика переходного затухающего процесса, обусловленного вязкоупругой релаксацией напряжений в эпицентральной зоне Симуширских землетрясений 2006–2007 гг., и выявлена зависимость вязкости астеносферы от скорости наблюдаемого постсейсмического движения земной поверхности;
- релаксация напряжений в земной коре на различных стадиях длительного постсейсмического процесса после Симуширских землетрясений может являться триггером мощных вулканических извержений на центральных Курильских островах;
- оценка сейсмического потенциала различных участков Курильской зоны субдукции на основе моделирования современного механического контакта литосферных плит, в совокупности с другими методами, способствует более точной оценке сейсмической опасности региона.

GNSS-наблюдения на Курильских островах в дальнейшем позволят детально исследовать характерные особенности современной геодинимики региона.

## Список литературы

- Захаров В.К., Василенко Н.Ф., Наумов Н.В. **1982**. Горизонтальные деформации земной поверхности на островах Сахалин и Шикотан. *Тихоокеанская геология*, (1): 119–122.
- Лаверов Н.П. (ред.) **1995**. *Шикотанское землетрясение 1994 г.: Эпицентральные наблюдения и очаг землетрясения*. Информационно-аналитический бюллетень ФССН. М.: ОИФЗ РАН, 136 с.
- Steblov G.M., Kogan M.G., Levin B.V., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I. **2008**. Spatially linked asperities of the 2006–2007 great Kuril earthquakes revealed by GPS. *Geophysical Research Letters*, 35(22): L22306. <http://dx.doi.org/10.1029/2008GL035572>
- Быков В.Г., Шестаков Н.В., Герасименко М.Д., Сорокин А.А., Коновалов А.В., Прытков А.С., Василенко Н.Ф., Сафонов Д.А., Коломиец А.Г., Серов М.А., Пупатенко В.В., Королев С.П., Михайлов К.В., Жижерин В.С., Рябинкин К.С. **2020**. Единая сеть геодинимических наблюдений ДВО РАН: становление, 10 лет развития, основные достижения. *Вестник ДВО РАН*, 3(211): 5–24. <https://doi.org/10.37102/08697698.2020.211.3.001>
- Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P. **2015**. *Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual*. Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publ., 862 p. <https://doi.org/10.7892/boris.72297>
- King R.W., Bock Y. **2006**. *Documentation for the GAMIT GPS software analysis version 10.3*. Massachusetts Institute of Technology (MIT), 182 p.
- Altamimi Z., Collilieux X., Métivier L. **2011**. ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *J. of Geodesy*, 85(8): 457–473. <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0444-4>.
- Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. **2007**. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 2006–2011 гг. и успешный прогноз Средне-Курильского землетрясения 15 XI 2006 г.,  $M = 8.2$ . *Вулканология и сейсмология*, 3: 3–25.
- Bourgeois J., Pinegina T., Razhegava N., Kaistrenko V., Levin B.V., MacInnes B., Kravchunovskaya E. **2007**. Tsunami run up in the middle Kuril Islands from the great earthquake of 15 Nov 2006. In: *Eos Trans. American Geophysical Union, Fall. Meet. Suppl.*, 88(52): Abstract S51C–02.
- Steblov G.M., Ekström G., Kogan M.G., Freymueller J.T., Titkov N.N., Vasilenko N.F., Nettles M., Gabsatarov Yu.V., Prytkov A.S., Frolov D.I., Kondratyev M.N. **2014**. First geodetic observations of a deep earthquake: the 2013 Sea of Okhotsk Mw 8.3 event. *Geophysical Research Letters*, 41(11): 3826–3832. <https://doi.org/10.1002/2014GL060003>.
- Прытков А.С., Василенко Н.Ф. **2022**. Парамуширское землетрясение 25.03.2020 г.,  $M_w=7.5$ , и его влияние на современную геодинимику прилегающего участка Курило-Камчатской зоны субдукции. *Геодинимика и тектонофизика*, 13(3): 0641. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-3-0641>
- Kogan M.G., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Freymueller J.T., Steblov G.M., Prytkov A.S., Ekström G. **2013**. Rapid postseismic relaxation after the great 2006–2007 Kuril earthquakes from GPS observations in 2007–2011. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(7): 3691–3706. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50245>
- Hu, Y., Wang K., He J., Klotz J., Khazaradze G. **2004**. Three-dimensional viscoelastic finite element model for post-seismic deformation of the great 1960 Chile earthquake. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B12): B12403. <https://doi.org/10.1029/2004JB003163>
- Suito, H., Freymueller J. T. **2009**. A viscoelastic and after-slip postseismic deformation model for the 1964 Alaska earthquake. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B11): B11404, <https://doi.org/10.1029/2008JB005954>.
- Bürgmann R., Kogan M.G., Steblov G.M., Hilley G., Levin V.E., Apel E. **2005**. Interseismic coupling and asperity distribution along the Kamchatka subduction zone. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B07): B07405. <https://doi.org/10.1029/2005JB003648>
- 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. <http://dx.doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.259-266>
- Дегтерев А.В., Чибисова М.В. **2019**. Извержение вулкана Райкоке в июне 2019 г. (о. Райкоке, центральные Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 3(3): 304–309. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.304-309>
- Левин Б.В., Прытков А.С., Василенко Н.Ф., Фролов Д.И. **2020**. Современный сейсмический дефицит в Курило-Камчатской зоне субдукции. *Доклады Академии наук. Науки о земле*, 491(2): 103–107.
- Федотов С.А., Соломатин А.В. **2019**. Долгосрочный сейсмический прогноз (ДССП) для Курило-Камчатской дуги на VI 2019–V 2024 гг.; свойства предшествующей сейсмичности в I 2017–V 2019 гг.: Развитие и практическое применение метода ДССП. *Вулканология и сейсмология*, 6: 6–22. <https://doi.org/10.31857/S0203-0306201966-22>

## Geodynamic GNSS observations on the Kuril Islands

Nikolay F. Vasilenko<sup>1</sup>, Alexander S. Prytkov<sup>\*1</sup>, Dmitry I. Frolov<sup>2, 1</sup>

<sup>\*</sup>E-mail: [a.prytkov@imgg.ru](mailto:a.prytkov@imgg.ru)

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

<sup>2</sup>Ioffe Physical-Technical Institute, RAS, Saint Petersburg, Russia

**Abstract.** The network of geodynamic GNSS observations was deployed in 2006 throughout the Kuril island arc from Japan to Kamchatka. The network includes 11 stations of continuous and periodic registration. The article provides information on the organization of the network and its current status. The creation of the GNSS network provided extensive material for studying the modern geodynamic processes in the Kuril segment of the subduction zone of the North American (Okhotsk) and Pacific lithospheric plates. The performed observations made it possible to obtain the first information on the modern geodynamics of the region. The article presents an overview of the results of the previous years obtained by the authors together with other researchers. The source models of the largest seismic events are constructed on the basis of the instrumental data: the 2006 Mw 8.3 and 2007 Mw 8.1 Simushir earthquake doublet and the 2013 Mw 8.3 deep-focus Okhotsk earthquake. At the initial stage of the post-seismic process in the epicentral zone of the Simushir earthquakes, the dependence of the asthenosphere viscosity on the observed post-seismic displacement velocity of the Earth's surface was found. The results obtained earlier were supplemented by new data on the changes in the geodynamic setting in the subduction zone. The dynamics of the transient decaying post-seismic process in the central part of the island arc is studied. Stress relaxation in the Earth's crust at various stages of this process could be the trigger of powerful volcanic eruptions occurred in 2009–2019 on the central Kuril Islands. The seismic potential of various segments of the Kuril subduction zone has been clarified on the basis of the modeling of current mechanical coupling of lithospheric plates. It contributes to a more accurate assessment of the seismic hazard of the region together with other methods. The continuation of the GNSS observations on the Kuril Islands in the future will allow us to study in detail the features of the modern geodynamics of the region.

**Keywords:** modern geodynamics, GNSS observations, earthquake, modeling

**For citation:** Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I. Geodynamic GNSS observations on the Kuril Islands. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 4, pp. 287–302. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.287-294.295-302>; <https://www.elibrary.ru/rfpzkk>

### Introduction

The Kuril-Kamchatka subduction zone is one of the most seismically active regions in the northeastern part of Eurasia, where the rate of subduction of the Pacific lithospheric plate beneath the North American (Okhotsk) plate reaches 8 cm/year. The interaction of lithospheric plates is accompanied by tectonic strains, which manifest themselves both at the plate boundary and in its surroundings. The largest earthquakes (with a magnitude of more than 8), including tsunamigenic and deep (more than 600 km) ones, occur here.

In the 1970s, a geodynamic testing site was created on Shikotan Island, which is closest to

the subduction zone, in order to study recent movements of the Earth's surface and search for precursors of strong earthquakes. The first high-accuracy optical distance measurements of the sides of the horizontal network of 4 points were made in 1973. In subsequent years, the geodetic network was supplemented by new observation points that control discontinuities in the northeastern part of the island [1]. Two leveling profiles of II class (along and across the island) with a length of 11 and 14.5 km, respectively, were created for studying the vertical movements. According to the results of repeat observations, which were carried out before 1990, the velocities of horizontal

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Фролов Д.И. Геодинамические GNSS наблюдения на Курильских островах. Translation by G.S. Kachesova.

displacements in fault zones were estimated, and, in some cases, the relation between horizontal and vertical strains of the Earth's surface and regional seismicity was established [2].

Modern GPS geodesy tools were used for the first time in the region [2] to reveal possible large-scale strains of the northeastern part of the island as a result of the October 4 (5), 1994 Mw 8.3 Shikotan earthquake. GPS (Global Positioning System) measurements, which was carried out at the geodynamic site after the earthquake, showed that there were no catastrophic coseismic displacements of the crustal blocks breaking the integrity of the geological structures of the island. Only small horizontal strains not exceeding  $10^{-5}$  have manifested in the study area.

The creation of a GNSS (Global Navigation Satellite System) observation network along the entire Kuril island arc, from Japan to Kamchatka, provided extensive material for studying modern geodynamic processes in the zone of convergence of the North American (Okhotsk) and Pacific lithospheric plates. The paper presents information on the organization of the network and its current status. The review of the main results of GNSS studies obtained in recent years is supplemented with new data on changes in the geodynamic setting in the Kuril subduction zone and its relationship with powerful volcanic eruptions in the central Kuril Islands.

### Organization and current state of the geodynamic GNSS observation network

The beginning of organization of the geodynamic observation network on the Kuril Islands can be attributed to 2005, when the first measurements were carried out at the VDLN point of periodic observations in the south of Iturup Island (Fig. 1).

In 2006, a regional GNSS observation network was deployed along the entire Kuril island arc from Japan to Kamchatka for about 1200 km. It includes continuous recording stations KUNH, SHIK, ITRP and PRMH, located on the territory of the seismic stations of the Sakhalin Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences"

(SB FRC UGS RAS) "Yuzhno-Kurilsk", "Shikotan", "Kurilsk" and "Severo-Kurilsk", as well as the URUP station of continuous observations in the north of Urup Island. The periodic registration points KETO, MATC, KHAR and PRM1 were equipped in the central part of the island arc (on the uninhabited islands of Ketoi, Matua and Kharimkotan) and Paramushir Island (Cape Oceansky), respectively.

In 2007, KOST periodic registration point was additionally equipped after the doublet of the Simushir earthquakes on November 15, 2006, Mw 8.3 and January 13, 2007, Mw 8.1 [3] on Simushir Island (Kostochko isthmus). Since 2007, observations at the KETO, MATC (Fig. 2a) and KHAR points closest to the epicentral zone have been carried out in the mode of autonomous continuous recording, which continued until September–December, 2016. In 2017, these stations were switched to the periodic recording mode.

The continuous recording at the KUNH, SHIK, and ITRP stations in the south of the Kuril island arc in 2013 was terminated for technical reasons and resumed at the KUNH (Kunashir Island) and ITRP (Iturup Island) stations in 2017 as a part of the Targeted Comprehensive Research Program of FEB RAS "Modern geodynamics, active geological structures and natural hazards of the Russian Far East" [4]. The SHIK station (Shikotan Island) was restored only in 2022 (Fig. 2b). The current state of the geodynamic GNSS network is shown in Fig. 1.

Continuous recording stations are equipped with Trimble NetRS GNSS receivers with Zephyr Geodetic antennas or Trimble NetR5 ones with Zephyr Geodetic model 2 antennas (Fig. 2). Observations are carried out with 1–30 s data discreteness and satellite elevation mask from  $5^\circ$ . Periodic measurements are made by the GNSS receivers and antennas of the same types. Such measurement duration is usually at least three days at each observation point. All field works are carried out in the summer-autumn period in order to minimize the seasonal impact on the positioning accuracy.

Data processing is carried out using the Bernese [5] and GAMIT/GLOBK [6] software. The stations of the international IGS network (Inter-

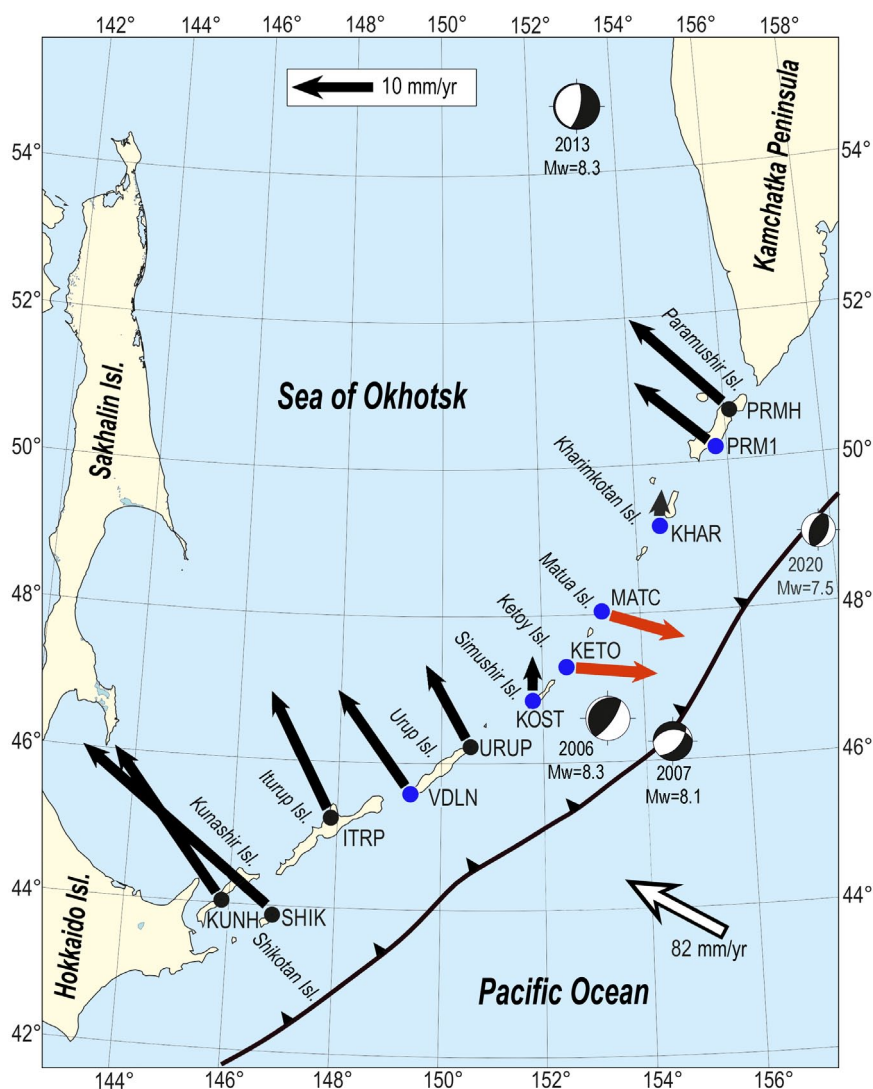
national GNSS Service) with long-term temporal stability are included in daily solutions to connect the networks with the ITRF (International Terrestrial Reference Frame) global reference system [7]. In this case, the final satellite orbits provided by IGS, IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) orientation parameters of the Earth rotation, tables of dependences of antenna phase centers, Sun and Moon parameters and other materials recommended by the International GNSS Service (IGS: International GNSS Service. URL: <https://igs.org/>) are used.

## Study results

### *Models of the focal mechanisms of strongest earthquakes in the region*

A number of strong seismic events have occurred in the Kuril-Kamchatka region in recent years. The modeling of their sources was performed on the basis of the recorded instrumental data on coseismic displacements of the Earth's surface.

The November 15, 2006  $M_w$  8.3 and January 13, 2007  $M_w$  8.1 Simushir earthquakes are the largest recent seismic events in the Kuril seismogenic zone. They occurred the east of



**Fig. 1.** Layout of the GNSS points of the Kuril geodynamic network.

Continuous points are highlighted in black, and periodic points are highlighted in blue. The arrows represent the interseismic velocities of the points relative to the North American Plate. The red arrows show the velocities of post-seismic relaxation as a result of the 2006–2007 Simushir earthquakes for the period of 2015–2016. The RMS errors of the velocities do not exceed 2 mm. The velocity scale is shown in the upper part of the figure. The convergence velocity of the lithospheric plates is shown with a white arrow. The focal mechanisms of the strongest seismic events in the region are taken from the USGS (USGS: The United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov/>).



**Fig. 2.** The MATC point (Matua Island) of autonomous registration (a) and the SHIK point (Shikotan Island) of continuous registration (b).

Simushir Island near a deep-water trench at a depth of about 12 km (Fig. 1). In the long-term seismological forecast by S.A. Fedotov [8], this area was marked as one of the places of possible earthquakes with  $M \geq 7.7$ . The tsunami runup on the central Kuril Islands caused by these earthquakes reached 20 m [9].

Piecewise homogeneous dislocation models of the Simushir earthquakes are built on the basis of the inversion of horizontal coseismic displacements of the GNSS stations of the Kuril geodynamic network and the stations of the International GNSS service located in Yuzhno-Sakhalinsk and Petropavlovsk-Kamchatsky [3]. The earthquake of 2006 (low-angle overthrust at an angle of  $\sim 16^\circ$  by the type of seismodislocations) occurred in the contact zone of the lithospheric plates. The total size of the seismic rupture was 230 km along the strike and 150 km along the dip. The maximum model displacements reached 6–12 m in the southern near-surface subfaults close to the hypocenter.

The earthquake of 2007 (a fault along the plane dipping steeply to the southeast at an angle of  $59^\circ$ ) occurred in the area of the bend of the Pacific lithospheric plate. The values of the model displacements are maximum (up to 8 m) near the hypocenter in the southern fragment of the plane of seismic rupture. The areas of maximum slip of both earthquakes are adjacent to each other and allow us to suggest that the event of 2007 is associated with the stress redistribution after the 2006 earthquake.

*The May 24, 2013 Mw 8.3 Okhotsk earthquake* is a strong deep-focus seismic event recorded near the western coast of the Kamchatka Peninsula at a depth of 610 km (Fig. 1). The earthquake was accompanied by the aftershock sequence, that is not character for such events. Coseismic displacements of the Earth's surface were recorded by the continuous observation GNSS stations of the entire region at distances up to 1000 km from the epicenter. For the first time in the world practice, a dislocation model of a deep-focus earthquake in an elastic half-space was constructed on the basis of coseismic displacements, taking into account the sphericity and layering of the Earth [10]. The type of movement in the source is a low-angle westward dipping fault at an angle of  $11^\circ$ , the maximum

movement is 7 m. The subducting Pacific Plate was ruptured in thickness by 50 km.

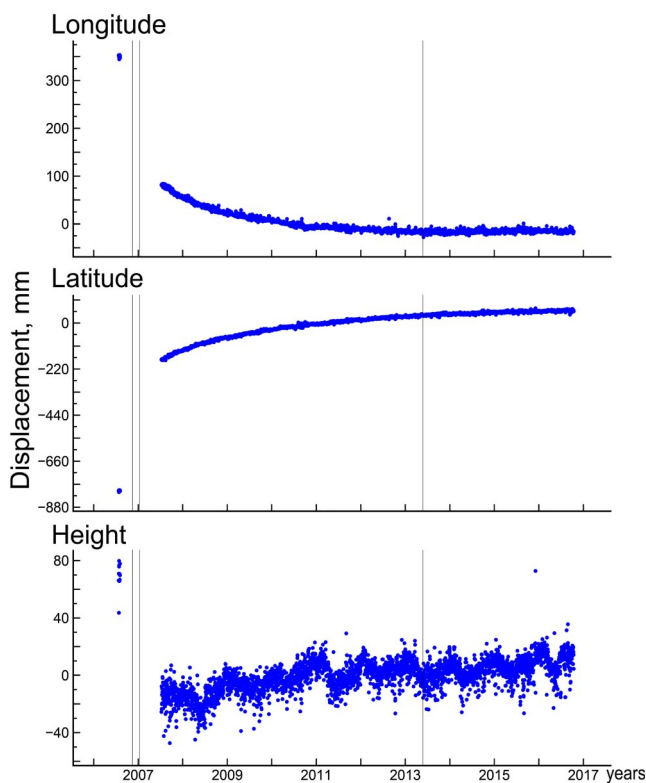
The March 25, 2020  $M_w$  7.5 Paramushir earthquake has occurred 200 km southeast of the island of the same name in a subducting oceanic plate beneath the outer slope of a deep-water trench at a depth of  $\sim 60$  km (Fig. 1). It was the strongest seismic event since 1900 both for the outer slope with a length of about 800 km and for the 300 km Kuril-Kamchatka subduction zone adjacent to the epicenter. The spatial distribution of aftershocks and finite fault models did not allow us to make a choice in favor of the priority plane of the seismic rupture. A comparison of the model and measured coseismic horizontal displacements at the PRMH GNSS station closest to the epicenter made it possible to uniquely identify the active plane of the seismic rupture [11]. Subhorizontal compression stresses, oriented transverse to the tectonic structures of the seismic focal zone, were realized in the earthquake source, the type of movement was a reverse fault along the plane, that has a southwest strike with a northwest dip.

### *Post-seismic relaxation in the epicentral zone of the Simushir earthquake doublet*

A wide zone of damped post-seismic displacements of the Earth's surface was observed in the central part of the Kuril island arc, after the 2006  $M_w$  8.3 and 2007  $M_w$  8.1 Simushir earthquake doublet. Continuous GNSS measurements made it possible to study the dynamics of the transient process caused by viscoelastic stress relaxation in the asthenosphere and estimate its duration by a period of  $\sim 10$  years [12]. At the initial stage, post-seismic horizontal displacements directed towards the deep-sea trench and post-seismic uplift were manifested along a strike of 450 km (from the north of Urup Island to Kharimkotan Island). Horizontal velocities in the immediate surroundings of the epicentral zone reached 90 mm/yr, decreasing annually by  $\sim 30\%$  (Fig. 3). Post-seismic displacements of the Earth's surface had almost ended at the URUP point (Urup Island) by 2012, and at the KHAR (Kharimkotan Island) and KOST (Simushir Island) points by 2014. A decaying post-seismic process with a velocity of  $\sim 10$  mm/yr was observed in 2015–2016 only at the KETO (Keto Island) and MATC (Matua Island) points (Fig. 1).

The viscosity of the asthenosphere is a fundamental but understudied property of the Earth. Modeling of the transient process in the epicentral zone of the Simushir earthquake doublet made it possible to reveal the dependence of the Maxwell's viscosity of the asthenosphere on the velocity of the observed post-seismic movement of the Earth's surface: the viscosity of the asthenosphere increased by  $\sim 5$  times from  $2 \cdot 10^{17}$  Pa·s in the first year of observations (2008) to  $1 \cdot 10^{18}$  Pa·s in 2011 [12].

The asthenosphere viscosity, reaching  $\sim 1 \cdot 10^{19}$  Pa·s, manifested itself over several decades after the strongest ( $M_w \sim 9$ ) interplate earthquakes of the 20th century: the 1960 Chilean earthquake and the 1964 Alaskan earthquake [13, 14]. However, in the south of Kamchatka and the northern Kuril Islands, post-seismic displacements after the 1952 Kamchatka earthquake were not recorded 50 years later [3, 15], which may indicate a lower long-term viscosity of the asthenosphere in the Kuril–Kamchatka subduction zone compared to other regions. It will be possible to clearly estimate its value by carrying out the future GNSS observations in the epicentral zone of the Simushir earthquakes.



**Fig. 3.** Time series of coordinates of the KETO GNSS station (Keto Island). Vertical lines indicate the dates of the 2006–2007 Simushir and 2013 Okhotsk earthquakes.

The strongest (since 1990) volcanic eruptions on the Kuril islands arc confined to the zone of manifestation of the post-seismic process. A powerful explosive-effusive eruption of Sarychev Peak volcano has occurred on Matua Island (Volcanic Explosivity Index (VEI) = 4) [16] in June 2009 (after 33 years of dormancy and 2.5 years after the Simushir earthquakes during the period of intense stress relaxation process). The MATC autonomous station of continuous observations, located on the island 7 km southeast of the volcano, has recorded the displacement of the Earth's surface during the active phase of the eruption. The station shifted by ~30 mm towards the volcano crater and sank by ~40 mm.

An incidental effusive eruption began in November 2012, after a 30-year dormancy period, on Snow volcano (Chirpoi Island – the south of the central Kurils). The active phase of the eruption continued for four years (VEI = 3) [16] during the completion of stress relaxation in this area.

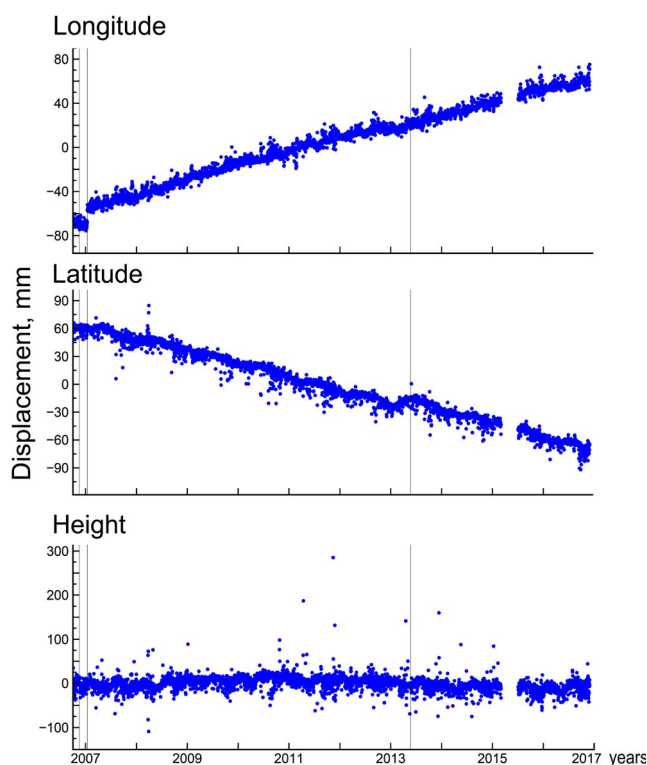
A powerful (VEI = 4) and sudden explosive volcanic eruption on Raikoke Island (the central

Kurils) began in June 2019 after 95 years of dormancy [17]. It occurred at the stage of complete decay of the post-seismic process in this part of the Kuril island arc. Stress relaxation in the Earth's crust at various stages of the post-seismic process in the epicentral zone of the Simushir earthquakes can be assumed to be the trigger for powerful volcanic eruptions in the central Kuril Islands.

### *Current seismic deficit in the subduction zone*

Analysis of the interseismic (free from earthquake influence) velocities of the GNSS stations in the north and south of the Kuril island arc allowed simulating the current coupling of the Pacific and North American (Okhotsk) lithospheric plates under the conditions of a mechanically joint zone of their contact and assessing the dynamics of stress accumulation in the subduction zone. At present, an intense accumulation of deformational stresses occurs in the southern and northern parts of the Kuril subduction zone (Fig. 4). The width of the contact zone of the lithospheric plates (along the dip) reaches 183 km in the area of Shikotan, and it is 104 km at the PRMH point (Paramushir Island) [18]. Significant accumulation of elastic stresses in the central segment of the subduction zone (from the north of Urup Island to Kharimkotan Island) was not observed after the Simushir earthquakes.

The areas of current seismic deficit in the Kuril subduction zone have been identified based on the cumulative displacement of interplate earthquakes with  $M_w \geq 7.0$  for the period since 1990 [18]. The deficit of seismic displacement ranging from 3 to 8.8 m (relative to the velocity of the lithospheric plate convergence) is observed in two extended areas: from the eastern part of Hokkaido Island to the north of Kunashir Island (~200 km), and from Onkotan Island to the south of the Kamchatka Peninsula (~250 km). In the long-term seismic prediction for the period from 2019 to 2024, the total probability of occurrence of seismic events with magnitude  $M \geq 7.7$  in these segments is 8.9 and 12.5%, respectively [19]. At the same time, it should be noted that the March 25, 2020  $M_w$  7.5 Paramushir earthquake, which has occurred beneath the outer slope of the deep-water trench, increases the probability of a future strong earthquake in the northern segment [11].



**Fig. 4.** Time series of coordinates of the PRMH (Paramushir Island) GNSS station. Vertical lines indicate the dates of the 2006–2007 Simushir and 2013 Okhotsk earthquakes.

## Conclusion

The organization of a network of continuous and periodic GNSS observations on the Kuril Islands provided extensive material for studying modern geodynamic processes in the Kuril subduction zone. The performed observations made it possible to obtain some new information about the modern geodynamics of the region:

- models of the strongest seismic events, which formed the basis for studying the mechanisms and tectonic nature of their sources, were built, as well as the geometric parameters of seismic ruptures were estimated;
- the dynamics of the transient decaying process caused by viscoelastic stress relaxation in the epicentral zone of the 2006–2007 Simushir earthquakes was studied, and the dependence of the asthenosphere viscosity on the velocity of the observed post-seismic movement of the Earth's surface was found;
- stress relaxation in the Earth's crust at various stages of a long-term post-seismic process after the Simushir earthquakes can be a trigger for powerful volcanic eruptions in the central Kuril Islands;
- estimate of the seismic potential of various sections of the Kuril subduction zone based on the modeling of modern mechanical contact of the lithospheric plates, together with other methods, contributes to a more accurate assessment of the seismic hazard of the region.

In the future, the GNSS observations on the Kuril Islands will make it possible to study in detail the features of the modern geodynamics of the region.

## References

1. Zakharov V.K., Vasilenko N.F., Naumov N.V. **1982**. Horizontal deformation of the earth surface on Sakhalin and Shikotan islands. *Tikhookeanskaya geologiya*, (1): 119–122. (In Russ.).
2. Laverov N.P. (ed.) **1995**. [*The 1994 Shikotan earthquake: epicentral observations and earthquake source*]: Informatsionno-analiticheskiy byulleten' FSSN. Moscow: JIPE RAS, 136 p. (In Russ.).
3. Steblov G.M., Kogan M.G., Levin B.V., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I. **2008**. Spatially linked asperities of the 2006–2007 great Kuril earthquakes revealed by GPS. *Geophysical Research Letters*, 35(22): L22306. <http://dx.doi.org/10.1029/2008GL035572>
4. Bykov V.G., Shestakov N.V., Gerasimenko M.D., Sorokin A.A., Kononov A.V., Prytkov A.S., Vasilenko N.F., Safonov D.A., Kolomiets A.G., Serov M.A., Pupatenco V.V., Korolev S.P., Verkhuturov A.L., Zhizherin V.S., Ryabinkin K.S. **2020**. Unified observation network for geodynamic monitoring in FEB RAS: formation, 10 years of development and major achievements. *Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*, 211(3): 5–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.37102/08697698.2020.211.3.001>
5. Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P. **2015**. *Bernese GNSS Software Version 5.2: User manual*. Astronomical Inst., University of Bern: Bern Open Publ., 862 p. <https://doi.org/10.7892/boris.72297>
6. King R.W., Bock Y. **2006**. *Documentation for the GAMIT GPS software analysis version 10.3*. Massachusetts Inst. of Technology (MIT), 182 p.
7. Altamimi Z., Collilieux X., Métivier L. **2011**. ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *J. of Geodesy*, 85(8): 457–473. <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0444-4>.
8. Fedotov S.A., Solomatin A.V., Chernyshev S.D. **2007**. A long-term earthquake forecast for the Kuril-Kamchatka island arc for the period 2006–2011 and a successful forecast of the  $M_s = 8.2$  Middle Kuril earthquake of November 15, 2006. *J. of Volcanology and Seismology*, 1(3): 143–163.
9. Bourgeois J., Pinegina T., Razhigaeva N., Kaistrenko V., Levin B.V., MacInnes B., Kravchunovskaya E. **2007**. Tsunami run up in the middle Kuril Islands from the great earthquake of 15 Nov 2006. In: *EosTrans. American Geophysical Union, Fall. Meet. Suppl.*, 88(52): Abstract S51C–02.
10. Steblov G.M., Ekström G., Kogan M.G., Freymueller J.T., Titkov N.N., Vasilenko N.F., Nettles M., Gabsatarov Yu.V., Prytkov A.S., Frolov D.I., Kondratyev M.N. **2014**. First geodetic observations of a deep earthquake: the 2013 Sea of Okhotsk  $M_w$  8.3 event. *Geophysical Research Letters*, 41(11): 3826–3832. <https://doi.org/10.1002/2014GL060003>
11. Prytkov A.S., Vasilenko N.F. **2022**. The March 25, 2020  $M_w$  7.5 Paramushir earthquake and its impact on recent geodynamics of the adjacent section of the Kuril-Kamchatka subduction zone. *Geodynamics & Tectonophysics*, 13(3): 0641. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-3-0641>
12. Kogan M.G., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Freymueller J.T., Steblov G.M., Prytkov A.S., Ekström G. **2013**. Rapid post-seismic relaxation after the great 2006–2007 Kuril earthquakes from GPS observations in 2007–2011. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(7): 3691–3706. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50245>
13. Hu Y., Wang K., He J., Klotz J., Khazaradze G. **2004**. Three-dimensional viscoelastic finite element model for post-seismic deformation of the great 1960 Chile earthquake. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B12): B12403. <https://doi.org/10.1029/2004JB003163>
14. Suito H., Freymueller J.T. **2009**. A viscoelastic and afterslip postseismic deformation model for the 1964 Alaska earthquake. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B11): B11404. <https://doi.org/10.1029/2008JB005954>.
15. Bürgmann R., Kogan M.G., Steblov G.M., Hilley G., Levin V.E., Apel E. **2005**. Interseismic coupling and asperity distribution along the Kamchatka subduction zone. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B07): B07405. <https://doi.org/10.1029/2005JB003648>
16. 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 perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(3): 259–266. (In Russ.).
17. Degterev A.V., Chibisova M.V. **2019**. The eruption of Raikoke volcano in June of 2019 (Raikoke Island, Central Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(3): 304–309. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.304-309>
  18. Levin B.W., Prytkov A.S., Vasilenko N.F., Frolov D.I. **2020**. The contemporary seismic deficit in the Kuril-Kamchatka subduction zone. *Doklady Earth Sciences*, 491(2): 277–281. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20040108>
  19. Fedotov S.A., Solomatin A.V. **2019**. Long-term earthquake prediction (LTEP) for the Kuril–Kamchatka island arc, June 2019 to May 2024; properties of preceding seismicity from January 2017 to May 2019: The development and practical application of the LTEP method. *J. of Volcanology and Seismology*, 13(6): 349–362. <https://doi.org/10.1134/S0742046319060022>

## Об авторах

**Василенко Николай Федорович** (<https://orcid.org/0000-0003-1591-9071>), кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, [n.vasilenko@imgg.ru](mailto:n.vasilenko@imgg.ru)

**Прытков Александр Сергеевич** (<https://orcid.org/0000-0003-4488-1682>), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, [a.prytkov@imgg.ru](mailto:a.prytkov@imgg.ru)

**Фролов Дмитрий Игоревич** (<https://orcid.org/0000-0002-7262-0386>), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург; с 01.06.2022 по 30.11.2022 старший научный сотрудник Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, [dm.frolov@mail.ioffe.ru](mailto:dm.frolov@mail.ioffe.ru)

## About Authors

**Vasilenko, Nikolay F.** (<https://orcid.org/0000-0003-1591-9071>), Cand. Sci. (Engineering), Lead Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, [n.vasilenko@imgg.ru](mailto:n.vasilenko@imgg.ru)

**Prytkov, Alexander S.** (<https://orcid.org/0000-0003-4488-1682>), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Lead Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, [a.prytkov@imgg.ru](mailto:a.prytkov@imgg.ru)

**Frolov, Dmitry I.** (<https://orcid.org/0000-0002-7262-0386>), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Ioffe Physical-Technical Institute, RAS, Saint Petersburg; from 01.06.2022 to 30.11.2022 Senior Researcher of the Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, [dm.frolov@mail.ioffe.ru](mailto:dm.frolov@mail.ioffe.ru)

Поступила в редакцию 16.11.2022

После рецензирования 25.11.2022

Принята к публикации 01.12.2022

Received 16 November 2022

Revised 25 November 2022

Accepted 1 December 2022

© Автор 2022 г. Открытый доступ.  
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author 2022. Open access.  
Content is available under Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.248.2,551.89

<https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.303-315.316-327>  
<https://www.elibrary.ru/pylmpf>

## Моделирование напряженно-деформированного состояния земной коры о. Сахалин: влияние гидроизостазии

Р. Ф. Булгаков

E-mail: [r.bulgakov@imgg.ru](mailto:r.bulgakov@imgg.ru)

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

**Реферат.** В работе предпринята попытка ответить на вопрос о роли вклада гидроизостазии в напряженно-деформированное состояние земной коры о. Сахалин. Оценка вклада гидроизостазии выполнялась путем моделирования методом конечных элементов. Сетка-меш для расчета была построена с использованием реальных значений глубины поверхности границы Мохо и топографии земной поверхности о. Сахалин с прилегающими шельфовыми участками. При расчете учитывалась Центрально-Сахалинская разломная зона. Моделировались отдельно горизонтальные смещения в результате деформации и горизонтальные смещения совместно с вертикальными. Сравнение результатов моделирования напряженно-деформированного состояния с учетом горизонтальных смещений и в комбинации с вертикальными смещениями со всей очевидностью демонстрирует заметный вклад гидроизостазии в напряженно-деформированное состояние земной коры района о. Сахалин.

**Ключевые слова:** гидроизостазия, напряжение, деформации, вертикальные движения, разлом, Elmer, метод конечных элементов

## Modeling of the stress-strain condition of the Earth's crust of Sakhalin Island: impact of hydroisostasy

Rustam F. Bulgakov

E-mail: [r.bulgakov@imgg.ru](mailto:r.bulgakov@imgg.ru)

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

**Abstract.** The paper attempts to answer the question about the role of contribution of the hydroisostasy to the stress-strain state of the Earth's crust on the Island of Sakhalin. The hydroisostasy contribution was estimated by simulation by means of finite element method. The mesh grid for the calculation was constructed using the real values of the depth of the Moho discontinuity surface and the topography of Sakhalin Island with adjacent shelf areas. The calculation took into account the Central Sakhalin fault zone. Lateral displacements as a result of strain and lateral displacements combined with vertical ones were simulated separately. Comparison of the results of the stress-strain state simulation, taking lateral displacements and their combination with vertical ones into account, clearly demonstrates the significance of the hydroisostasy contribution to the stress-strain state of the Earth's crust in the Sakhalin region.

**Keywords:** hydroisostasy, stress, strains, vertical movements, fault, Elmer, finite element method

**Для цитирования:** Булгаков Р.Ф. Моделирование напряженно-деформированного состояния земной коры о. Сахалин: влияние гидроизостазии. *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 4, с. 303–327. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.303-315.316-327>; <https://www.elibrary.ru/pylmpf>

**For citation:** Bulgakov R.F. Modeling of the stress-strain condition of the Earth's crust of Sakhalin Island: impact of hydroisostasy. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 4, pp. 303–327. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.303-315.316-327>; <https://www.elibrary.ru/pylmpf>

### Благодарности

Автор благодарит рецензентов за конструктивные предложения и замечания по существу рукописи статьи.

### Acknowledgements

Author thanks the Reviewers for the constructive suggestions and comments on the substance of the manuscript.

## Введение

В середине XX в. было установлено, что послеледниковая трансгрессия, особенно на завершающем этапе, начиная с 6 тыс. лет назад, имела неодинаковый сценарий и неравномерную скорость наступления моря в различных районах Мирового океана. Базовыми рассматривались сценарии Ф. Шепарда и Р. Фейрбриджа. Шепард [1] предполагал плавное повышение уровня моря, которое, по асимптоте, достигло современного уровня, но никогда не превышало его. Его оппонент Фейрбридж [2] предложил альтернативное представление о ходе трансгрессии – с осцилляциями. По Фейрбриджу, уровень Мирового океана 5.0 и 3.7 тыс. л.н. превысил современный на 3–4 м, а далее после ряда мелких осцилляций 2.3 и 1.2 тыс. л.н. амплитудой +1.5 м вернулся к уровню близкому современному.

Решение для обсуждаемого противоречия предложил коллектив исследователей J. Clark et al. [3]. Они разработали модель с учетом изменений гравитационного поля в результате перераспределения масс льда и воды на поверхности Земли при упругих и вязко-упругих реологических свойствах земной коры и мантийных слоев. При расчете в модели вычислялась разница между водной поверхностью моря и твердой поверхностью морского дна для заданного момента времени. В дальнейшем расчет получил название «решение уравнения моря».

Эти авторы также выделили на поверхности Земли зоны со схожими сценариями хода послеледниковой трансгрессии, т.е. зоны, в которых уровень моря превышал современный, зоны, в которых уровень моря понизился, и др. Всего было выделено 6 зон. В дальнейшем, на основе этой работы, численное моделирование хода послеледниковой трансгрессии совершенствовалось. Появился термин гидроизостазия, были открыты такие явления, как ocean siphoning («перекачка» океана), continental levering (поднятие континента) [4].

Сахалин, являясь островом и располагаясь вне зон гравитационного воздействия масс покровных ледников (far field zone), не подвергался влиянию гляциоизостазии, но не мог избежать гидроизостатических воздействий.

Наиболее изученный интервал времени, на котором произошло изменение уровня Мирового океана амплитудой в 120 м, – это последние 20 тыс. лет. В этот период после последнего максимума покровного оледенения (Валдайское на Русской платформе, Вюрм в западноевропейском регионе, Висконсин в Сев. Америке, Сарганское в Сибири), при котором в ледниках замерз объем воды, эквивалентный понижению уровня моря на 100–120 м, началось таяние покровных ледников и пополнение Мирового океана водой с повышением уровня морей и океанов до современного.

Явление гидроизостазии изучается методами численного моделирования [4–7].

В данной работе предпринята попытка исследовать влияние эффекта гидроизостазии на современные деформации земной коры и поля напряжений на территории Сахалина и прилегающих акваторий при наличии глубинного разлома. Поля напряжений иллюстрируются коэффициентом Лоде–Надаи.

В настоящее время продолжают исследования по уточнению объема поступления воды в Мировой океан за время послеледниковой трансгрессии. Например, последняя эвстатическая кривая *ICE-7G\_NA (VM7)*, совместно с параметрами вязкостной модели мантии, уточнена и предложена в работе [8]. Эта детализированная кривая хода трансгрессии характеризует нагружение поверхности дна Мирового океана, но для оценки реагирования на это земной коры и мантийного слоя необходимо проанализировать полный цикл нагружения–разгружения. Чтобы получить полный цикл, нами моделировалось сначала нагружение прилегающих акваторий слоем воды с увеличением глубины до 120 м на протяжении 20 тыс. лет, затем на протяжении следующих 20 тыс. лет разгружение до глубины 0 м. Так как детальный ход изменений уровня Мирового океана для предыдущих эпох в такой же степени детальности, как для эвстатической кривой *ICE-7G\_NA (VM7)*, не установлен, то нагружение и разгружение выполняли по линейному закону. Т.е. моделировалась ситуация, близкая к межледниковой трансгрессии, переходящей в регрессию моря – забор воды из океана в покровные ледники. «Уравнение моря» при этом не решалось.

Остров Сахалин, располагаясь на стыке Амурской и Охотоморской тектонических плит, в субмеридиональном направлении пересекается разломной зоной [9–15], которая генерирует основную сейсмическую активность.

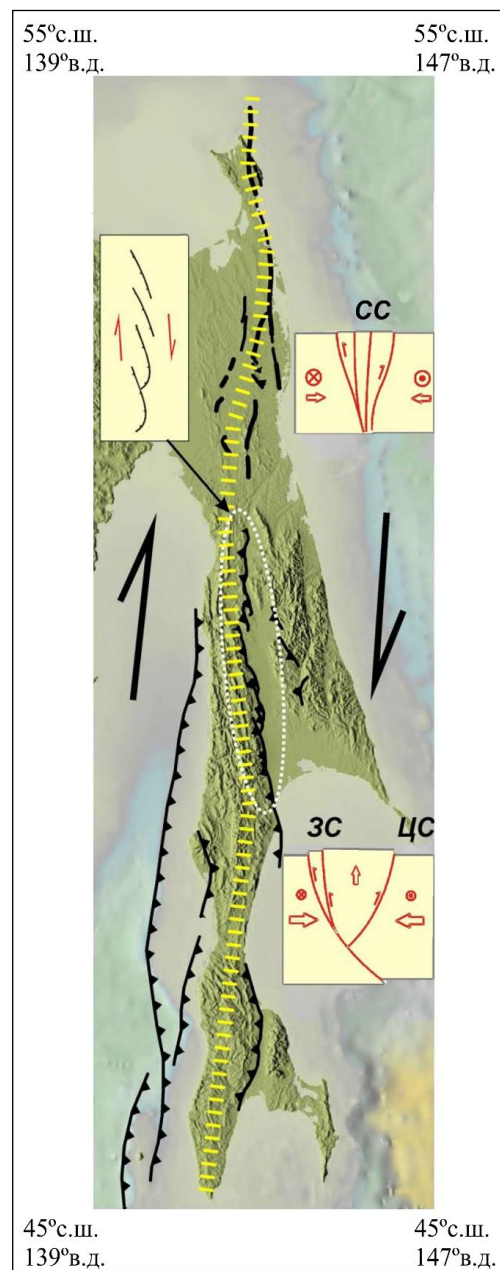
На всем протяжении разломной зоны обнаружены активные разломы [9, 11, 16].

### Построение модели

На основе данных батиметрии Topex ([https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get\\_data.cgi](https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi)) и границы Мохо из базы данных Crust 2.0 (<https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>), адаптированных для Охотоморского региона [17], была построена 3D-сетка (mesh) для расчета методом конечных элементов (МКЭ). Для моделирования был выбран участок Охотоморского региона в пределах координат 139–147° в.д. и 45–55° с.ш. (рис. 1). Построение сетки (рис. 2) выполнялось в программных пакетах с открытым кодом и открытым доступом Salome (<https://salome-platform.org/>) и FreeCad (<https://www.freecadweb.org/>). Батиметрия и граница Мохо были взяты в проекции UTM-54 на WGS-84. Сетка представляет собой параллелепипед со сторонами 5 000 и 10 500 км, глубиной 430 км. В центральной части сетки – поверхности, построенные на основе данных о батиметрии и поверхности границы Мохо. Верхний слой в этой части, мощностью от 10 до 40 км, – земная кора, нижний слой до глубины 430 км – слой верхней мантии. Разрешение грида цифровой модели поверхностей, по которой строилась сетка-меш, взято 50 км. Избыточный объем построен по сторонам параллелепипеда центральной части для устранения влияния взаимодействия с боковыми границами модели. Центральная часть параллелепипеда представляет собой прямоугольный участок со сторонами 500×1050 км (рис. 2). Моделирование в данном случае имеет некоторую аналогию с работами [18, 19], в которых моделировались поля напряжений в земной коре Австралийского континента, создаваемые давлением со стороны окружающих литосферных плит.

При моделировании изменений уровня моря в эпохи смены ледниковых межледниковьями обычно рассчитывается изменение нагрузки в результате перераспределения ледовых

покровов и воды Мирового океана на земную кору и мантию до ядра. Учет всей мантийной толщи необходим в случае описания мантийных слоев в виде вязко-упругого материала, тогда в деформации вовлекается мантия на всю глубину до нижнего мантийного слоя.



**Рис. 1.** Система разломов Сахалина в интерпретации А.И. Кожурина [11]. Горизонтальными штрихами показано положение региональной правосторонней зоны. На врезках справа – принципиальные модели поперечного сечения зоны в разных частях поднятия острова: СС – Северо-Сахалинский, ЗС – Западно-Сахалинский, ЦС – Центрально-Сахалинский сегменты зоны. На врезке слева сверху – схема кулисного расположения сегментов взбросовой Центрально-Сахалинской зоны. Рисунок заимствован из автореферата диссертации А.И. Кожурина [11].

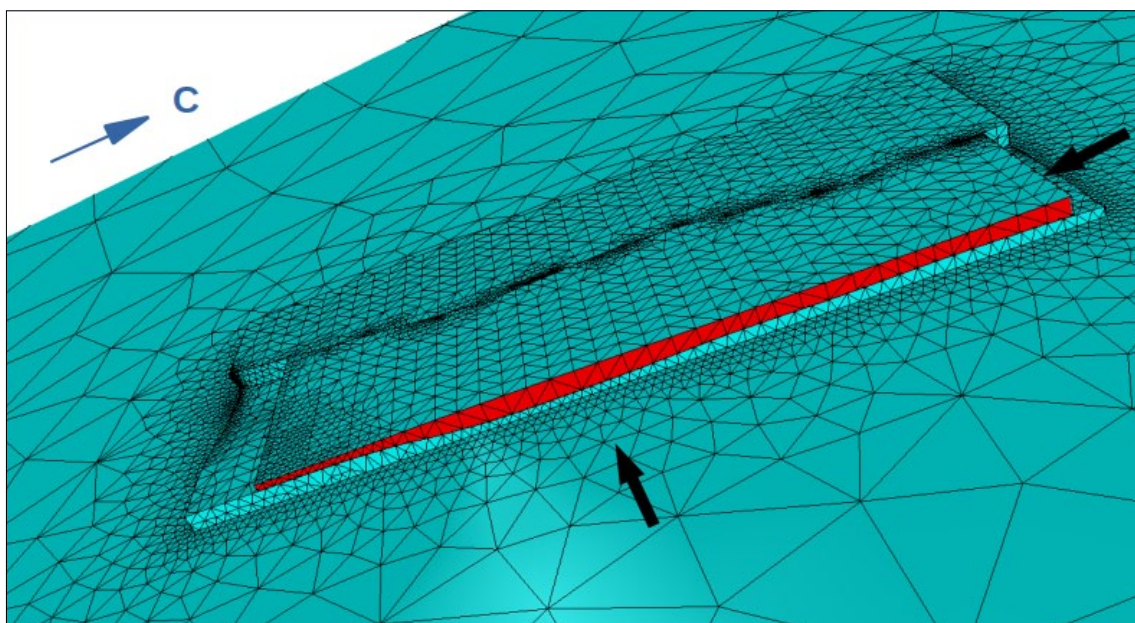
В нашем случае, когда целью моделирования является влияние разлома на эволюцию упругой земной коры, мантия тоже описывается как упругий материал, так что нет необходимости учитывать деформации на всю глубину и удорожать численный расчет. Поэтому модель для расчета построена только на глубину верхней мантии, которая, по данным [20], находится на глубине около 400 км. Так что была принята глубина 430 км.

В Salome для генерирования сетки использовался алгоритм NETGEN 1D-2D-3D генератора сеток-меш NETGEN (<https://github.com/NGSolve/netgen>). Элементы для сетки были составлены из квадратичных тетраэдров (quadratic tetrahedrals). Сетка со-

держит 2504 узла и 13 743 элемента. Для сокращения машинного времени счета размеры элементов сетки увеличены от центра к краям и в глубину.

Модель сетки включает 2 слоя (см. таблицу).

Слой «Земная кора» составлен из двух отдельных тел, которые разделяются плоскостями «разломной зоны». Конфигурация разломной зоны, представленная на рис. 1, взята из работы [11, рис. 17]. Угол наклона плоскости «разлома»  $80^\circ$  с падением на запад. Угол наклона в  $80^\circ$  был выбран согласно оценкам, сделанным А.И. Суворовым для углов наклона глубинных разломов [23]. Он выделяет два типа глубинных разломов, первые – это



**Рис. 2.** Сетка-меш, построенная для расчета напряженно-деформированного состояния при наличии разломной зоны на о. Сахалин под воздействием движения земной коры Охотоморской плиты. Стрелками черного цвета указаны направления движения поверхностей (с восточной стороны красного цвета, с северной стороны скрыта). По условиям моделирования движения вдоль стрелок продолжались 40 тыс. лет с амплитудой 80 м с востока и севера. Для имитации влияния эффекта гидроизостазии на поверхности крыльев разлома на участках ниже 0 м моделировались смещения по вертикали вниз 20 тыс. лет с амплитудой 10 м и затем вверх 20 тыс. лет с амплитудой 10 м.

**Таблица.** Характеристики земной коры и мантии, принятые в работе для построения модели

| Слой           | Мощность слоя, км | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Коэффициент Пуассона | Модуль сдвига, $\times 10^{11}$ Па | Гравитация (ускорение свободного падения), м/с <sup>2</sup> |
|----------------|-------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Земная кора    | 30–38             | 3233.6                       | 0.49                 | 0.45                               | 9.987630567                                                 |
| Верхняя мантия | 430               | 3367.12                      | 0.49                 | 1.9941                             | 9.939356456                                                 |

*Примечание.* Значения взяты осредненно из работ [21, 22].

дугообразные, характерные, например, для мезокайнозойских разломов крупных структур, таких как Памир и Гималаи, имеющие углы наклона  $40\text{--}60^\circ$ , и вторые – это разломы меньшего масштаба и более прямолинейные, с углом наклона  $80\text{--}90^\circ$ , например глубинный разлом соседствующего с Охотоморской плитой Сихотэ-Алиня. В более поздних работах [24] нет конкретной оценки угла наклона Хоккайдо-Сахалинской системы нарушений, но и нет указаний на более пологий угол наклона системы. Оценка наклона в  $75\text{--}85^\circ$  Апреловского разлома, в южной части Центрально-Сахалинской разломной зоны, использована также при построении геомеханической модели активного разлома южного Сахалина [25].

Следует оговориться, что модель построена как упругое тело, без учета вязкостных характеристик мантийного слоя.

### Расчет

Расчет проведен в программном пакете с открытым кодом и в свободном доступе Elmer (<https://www.csc.fi/web/elmer>). Моделирование выполнялось в режиме течения времени (transient), временной шаг – 1000 лет. Плоскость, ограничивающая правое, восточное крыло слоя «земной коры» с восточной стороны, обозначенная на рис. 2 красным цветом, смещалась на расстояние 80 м за промежуток времени 40 тыс. лет в направлении, указанном стрелкой, на запад. Синхронно с движением плоскости в направлении с востока на запад плоскость, ограничивающая восточное крыло разлома с северной стороны, двигалась на юг с такой же скоростью (рис. 2). Так как объект модели представляет собой не абсолютно жесткое тело, а имеет реологические свойства, сходные с земной корой, а также деформируется не на гладкой поверхности, а на поверхности, повторяющей границу Мохо, то нет возможности описывать процесс как смещение жесткого, недеформируемого восточного крыла и приходится говорить о некотором суммарном векторе перемещений в восточном крыле. Суммарный вектор перемещений получился под углом  $45^\circ$  и скоростью около 2.8 мм/год, что совпадает с оценкой современных скоростей горизонтальных

смещений земной поверхности на Сахалине по результатам геодезических измерений [26, 27].

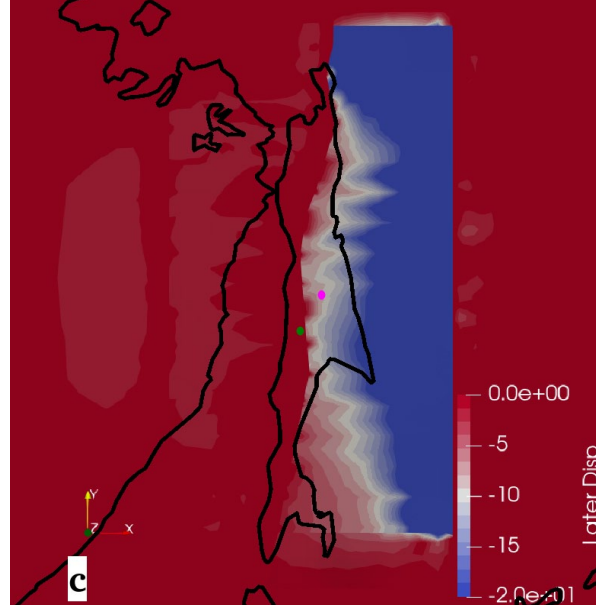
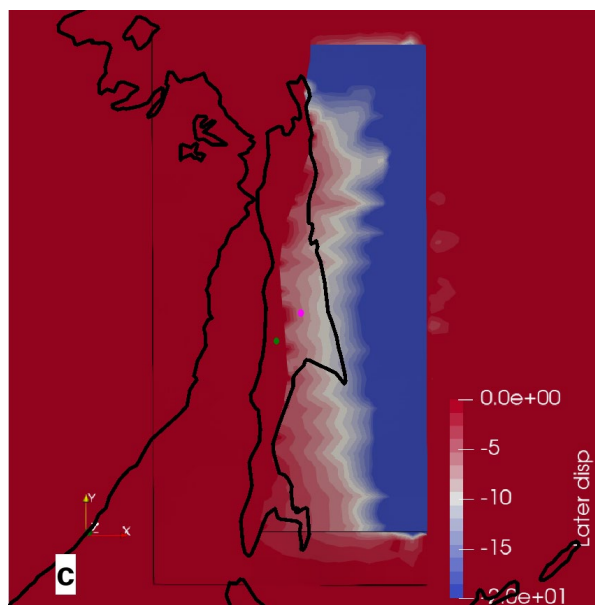
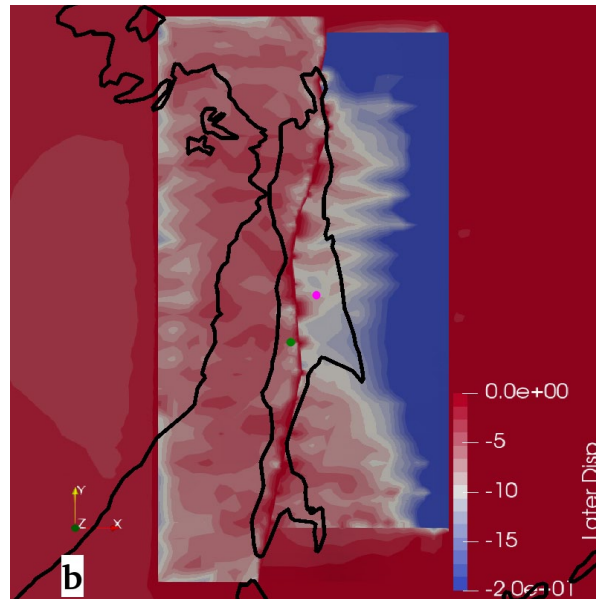
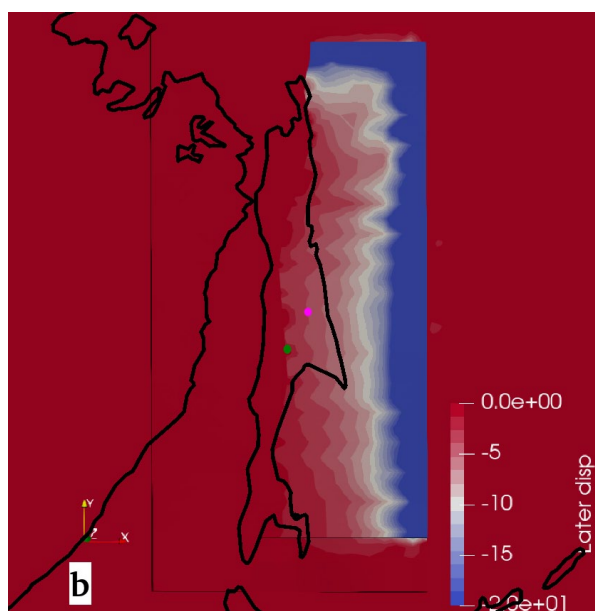
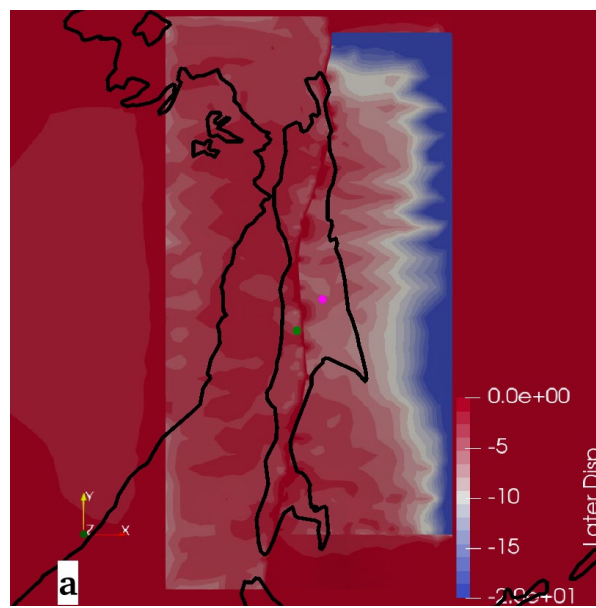
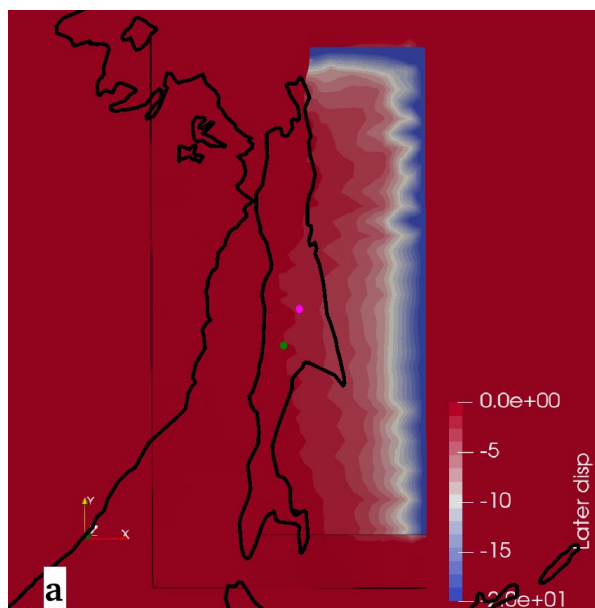
Учитывая, что амплитуды вертикальных движений, оцененные по палеогеографическим реконструкциям следов древних береговых линий на побережьях о. Сахалин в период послеледниковой трансгрессии и голоцене, не превышают 10 м [28], для имитации нагружения в результате ледниковых–межледниковых регрессивных и трансгрессивных изменений уровня Мирового океана было принято, что «земная поверхность», расположенная ниже современного уровня моря (т.е. морское дно при отсутствии воздействия на сухопутную часть острова), претерпевала максимальные смещения с амплитудой 10 м в направлении сверху вниз на протяжении 20 тыс. лет и в направлении снизу вверх в последующие 20 тыс. лет.

Амплитуда «сухопутной» поверхности о. Сахалин могла претерпевать вертикальные деформации за счет реологических свойств земной коры, которая изгибалась, следуя смещениям поверхности дна прилегающих акваторий, и воздействия за счет «перетекания» мантийного вещества из-под акваторий, испытывающих вертикальное нагружение, под сушу. При этом по амплитуде движений общая деформация суши Сахалина, по ожиданиям, не превысит 10 м.

Аналогичная оценка погружения поверхности дна в  $-10$  м была получена при 3D-моделировании эффекта гидроизостазии с вязко-упругой реологией материала мантии для Охотского моря при нагружении 120-метровым слоем воды [29].

При моделировании использовался предусмотренный в программном пакете математический инструментарий.

Решение системы линейных уравнений деформации выполнялось итерациями обобщенного метода сопряженных невязок (GCR) после применения предобуславливателей неполной факторизации Крылова (ILU2) в модуле Finite Elasticity (конечная деформация). Для дискретизации во времени использовался метод BDF (формула обратной дифференциации) второго порядка, обобщенный метод минимальных невязок



(<http://www.nic.funet.fi/pub/sci/physics/elmer/doc/ElmerSolverManual.pdf>).

Все стороны модели в нижнем слое, включая стороны нижнего слоя, составляющие границу верхнего слоя «земной коры», были закреплены как неподвижные. Предел сходимости итераций был установлен  $10^{-7}$ .

Контактное взаимодействие плоскостей в «разломной зоне» моделировалось с помощью mortar-метода. Mortar-метод – численный метод дискретизации непрерывных функций для решения дифференциальных уравнений с частными производными. Метод используется для дискретизации непересекающихся подчастей общего тела модели сетки-меш для стыковки несогласованных сеток, в данном случае представляющих собой крылья разлома (<https://www.nic.funet.fi/pub/sci/physics/elmer/doc/ElmerModelsManual.pdf>).

## Результаты

Иллюстрации на рис. 3 наглядно демонстрируют различия в значениях деформаций при воздействии вертикальных смещений и при их отсутствии. Рисунок иллюстрирует расчетные горизонтальные смещения в интервалы времени 10, 20 и 40 тыс. лет при отсутствии воздействия вертикальных смещений «морского дна» прилегающих акваторий и горизонтальные смещения за те же временные интервалы, но в комбинации с воздействием вертикальных смещений «морского дна», с амплитудой 10 м в направлении вниз, ниже отметки 0 м, на протяжении 20 тыс. лет и затем с амплитудой 10 м в направлении вверх еще 20 тыс. лет.

Тенденции в деформировании иллюстрируются на графиках рис. 4 – изменения значений амплитуд перемещений, снятых на конкретных поверхностях о. Сахалин по обе стороны разломной зоны. Местоположения точек указаны точками розового и зеленого цвета на рис. 3 и 5. Расстояние между точ-

ками 100 км. На рис. 4 а показаны смещения точки относительно системы координат модели в результате поступательного горизонтального движения (XY) боковых поверхностей слоя «земной коры» в суммарном юго-западном направлении и неподвижного положения боковых поверхностей с западной и южной стороны слоя «земной коры». График демонстрирует смещения в месте, указанном зеленой точкой на рис. 3. Максимальные горизонтальные смещения в результате деформации за 40 тыс. лет достигли  $-0.43$  м, максимальные вертикальные смещения составили  $-0.27$  м.

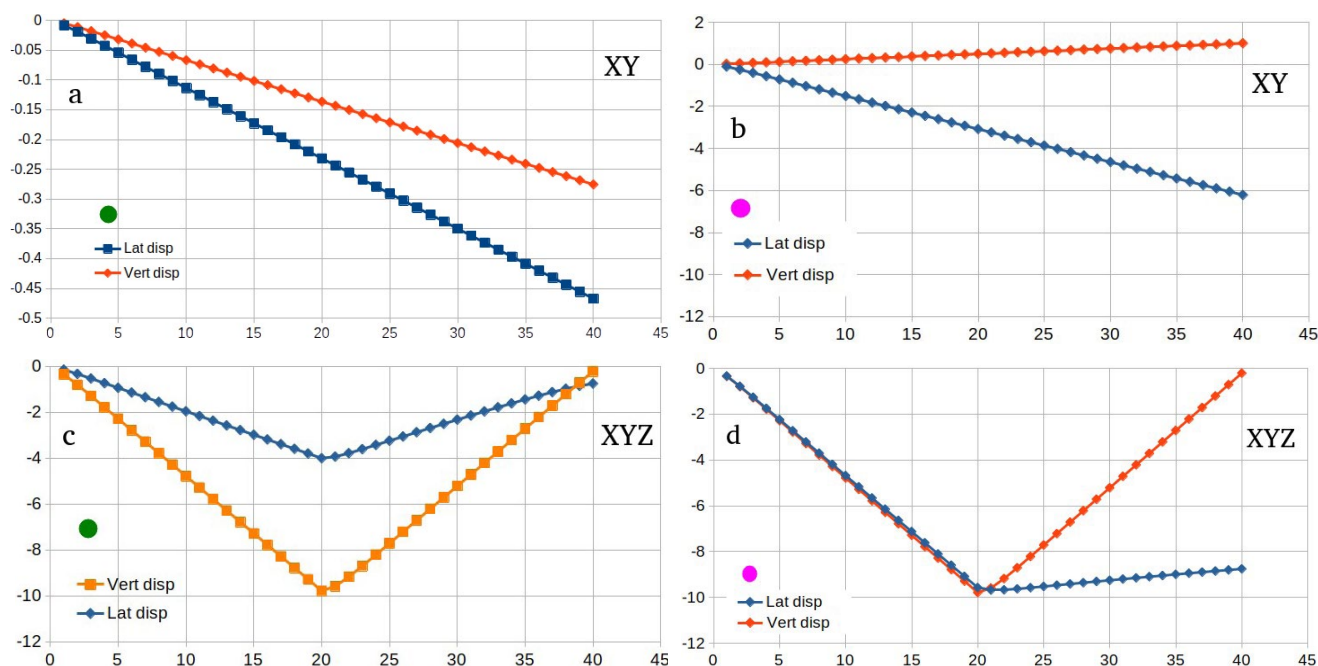
График 4 б показывает смещения в месте, указанном розовой точкой на рис. 3. Максимальные горизонтальные смещения в результате деформации за 40 тыс. лет достигли  $-6.0$  м, а максимальные вертикальные смещения  $+1.0$  м.

Заметно отличный от описанного характер смещений того же места демонстрирует график на рис. 4 в, где к горизонтально-поступательным деформациям добавлены вертикальные деформации – половину времени в направлении вниз и вторую половину в направлении вверх (XYZ). График показывает горизонтальные смещения в результате деформации до  $-4$  м на протяжении 20 тыс. лет и затем на протяжении еще 20 тыс. лет – возврат точки, но не до начальной отметки в 0 м, а только до отметки около  $-1$  м. Вертикальные смещения достигают  $-10$  м и возвращаются на нулевые отметки.

На рис. 4 д видно, что на восточном крыле разломной зоны в условиях комбинированного воздействия горизонтальных и вертикальных смещений (XYZ) в месте, указанном точкой розового цвета, горизонтальные перемещения достигают  $-10$  м и возвращаются на  $-9$  м амплитуды смещений. Вертикальные смещения достигают  $-10$  м, после чего возвращаются на 0 м.

**Рис. 3.** Рассчитанные горизонтальные смещения: слева – без учета влияния вертикальных смещений, справа – с учетом влияния вертикальных смещений.

(а) значения горизонтального вектора смещения (шкала Later disp, в метрах) в результате движения боковых поверхностей с восточной и северной стороны за 10 тыс. лет; (б) то же, но за 20 тыс. лет; (в) то же, но за 40 тыс. лет. Шкала смещений для всех временных интервалов указана единая для удобства сравнения.



**Рис. 4.** Смещения горизонтальные (Lat disp) и вертикальные (Vert disp) (в метрах) на протяжении 40 тыс. лет:

(а) и (б) – при воздействии горизонтальных смещений, на западном крыле разломной зоны в месте, обозначенном зеленой точкой (а), и на восточном крыле разломной зоны в месте, обозначенном розовой точкой (б).

(с) и (д) – при воздействии горизонтальных смещений в комбинации с вертикальными на западном крыле разломной зоны в месте, обозначенном зеленой точкой (с), и на восточном крыле разломной зоны в месте, обозначенном розовой точкой (д).

Местоположения точек, на которых сняты значения, указаны точками зеленого и розового цвета на рисунках 3 и 5.

Анализ напряженного состояния земной коры о. Сахалин ряд авторов иллюстрируют распределением коэффициента Лодэ–Надаи [13, 14, 30].

По результатам анализа полей напряжений, развивающихся во времени при моделировании деформаций, нами также выполнен расчет коэффициента Лодэ–Надаи (рис. 5 и 6).

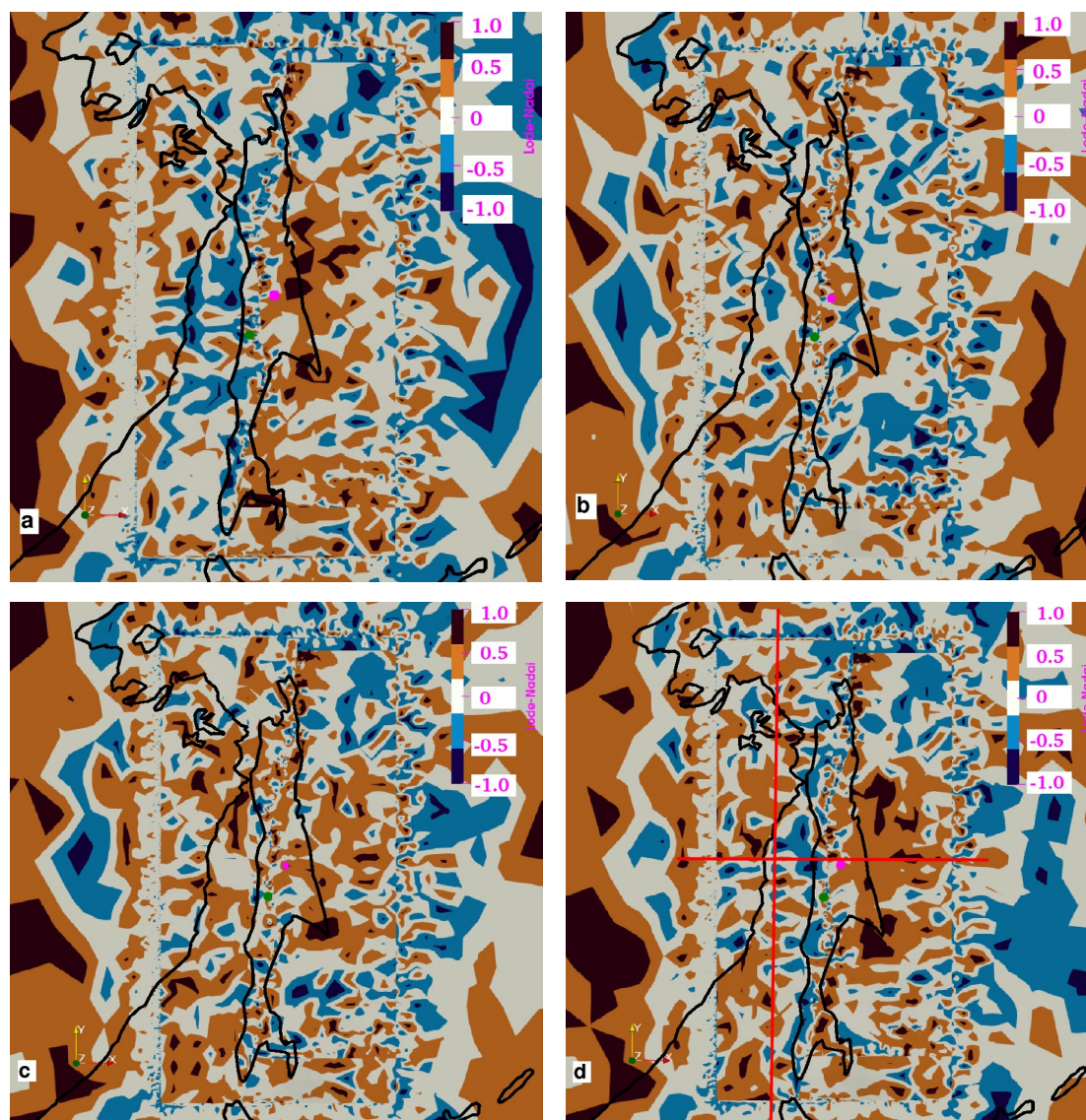
На рис. 5 а показано распределение коэффициента Лодэ–Надаи для случая только поступательных горизонтальных деформаций, без комбинирования с вертикальными. Результат, в общем, интуитивно ожидаем – на протяжении всего расчетного отрезка времени значения коэффициента Лодэ–Надаи сохранялись постоянными. Это видно и на графиках рис. 6 а, б, которые иллюстрируют значения коэффициента Лодэ–Надаи в точках на протяжении 40 тыс. лет.

На рис. 5 б, с, д демонстрируются изменения в распределении коэффициента Лодэ–Надаи для временных отрезков 20, 33 и 40 тыс. лет при условии воздействия вертикальных смещений.

График на рис. 6 с показывает сложное поведение поля напряжения на западном крыле разломной зоны (зеленая точка на рис. 3 и 5). При нагружении – обстановка близка к сдвигу, после запуска разгрузки в вертикальном направлении значения коэффициента варьируют от сжатия к растяжению.

График на рис. 6 д иллюстрирует неизменность коэффициента Лодэ–Надаи для отрезка времени 20 тыс. лет на восточном крыле разломной зоны (розовая точка на рис. 3 и 5), а затем, когда вертикальные деформации меняют знак на противоположный, значения коэффициента начинают меняться от сжатия к растяжению.

Следует оговориться, что графики на рис. 6 иллюстрируют эволюцию коэффициента исключительно в двух точках, тогда как на всем пространстве модели представлены все возможные геодинамические варианты: сжатия, чистого сдвига, растяжения, а на некоторых участках они даже сменяют друг друга. Поэтому графики значений на рис. 6 не характеризуют все поле напряжений по модели, но свидетельствуют о зависимости напряженного



**Рис. 5.** Значения коэффициента Лоде–Надаи: (а) при горизонтальном смещении, без воздействия вертикальных движений; (b) то же, с учетом воздействия вертикального движения с амплитудой 10 м в течение 20 тыс. лет; (с) то же, что и на рис. b, после 33 тыс. лет вертикального движения, из них с амплитудой 10 м в направлении вниз в продолжение 20 тыс. лет и с амплитудой 10 м в направлении вверх оставшееся время; (d) то же, что и на рис. b, после 40 тыс. лет вертикального воздействия, из них с амплитудой 10 м в направлении вниз в продолжение 20 тыс. лет и с амплитудой 10 м в направлении вверх оставшееся время. Красные линии на рисунке – плоскости разрезов, показанных на рис. 7.

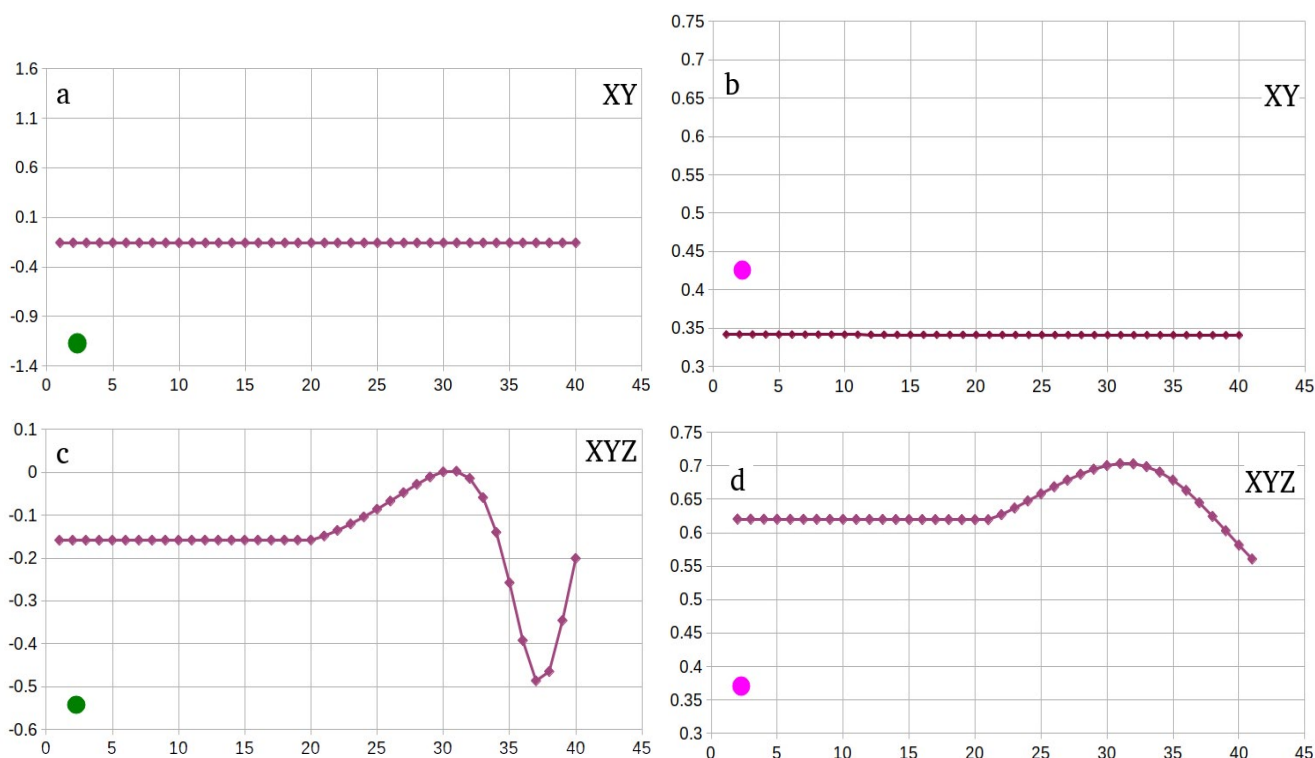
состояния среды от вертикальных деформаций, вызванных эффектом гидроизостазии.

### Обсуждение

По оценкам, полученным в высокосейсмичных регионах, таких как Японские острова, п-ов Камчатка, интервал повторяемости сильных землетрясений может достигать 9–20 тыс. лет [31–33]. Для о. Сахалин имеются предварительные оценки возраста сильных палеосейсмических событий. На разломе Центрально-Сахалинской зоны возраст последних подвижек

оценивается в 3.7 тыс. л.н., в Северо-Сахалинской зоне – в 4–5 тыс. л.н. [9, 11, 34]. Учитывая, что наиболее изученный интервал времени, на котором происходило повышение уровня Мирового океана на 100–120 м, а следовательно, и изменение нагрузки водного столба на морское дно, – это 20 тыс. лет, можно видеть, что повторяемость землетрясений вполне соразмерна длительности послеледниковой трансгрессии.

Другим показателем сейсмической активности разломов является slip rate – средняя ско-



**Рис. 6.** Изменения коэффициента Лодэ–Надаи (вертикальная ось):

(а) и (б) – при горизонтальных движениях поверхности без воздействия вертикальных движений на западном крыле разломной зоны в месте, указанном точкой зеленого цвета (а), и на восточном крыле разломной зоны в месте, указанном точкой розового цвета (б).

(с) и (д) – при воздействии вертикальных движений поверхности в результате имитации гидроизостазии на западном крыле разломной зоны в месте, указанном точкой зеленого цвета (с), и на восточном крыле разломной зоны в месте, указанном точкой розового цвета (д).

Местоположения точек, на которых сняты значения, указаны точками зеленого и розового цвета на рисунках 3 и 5.

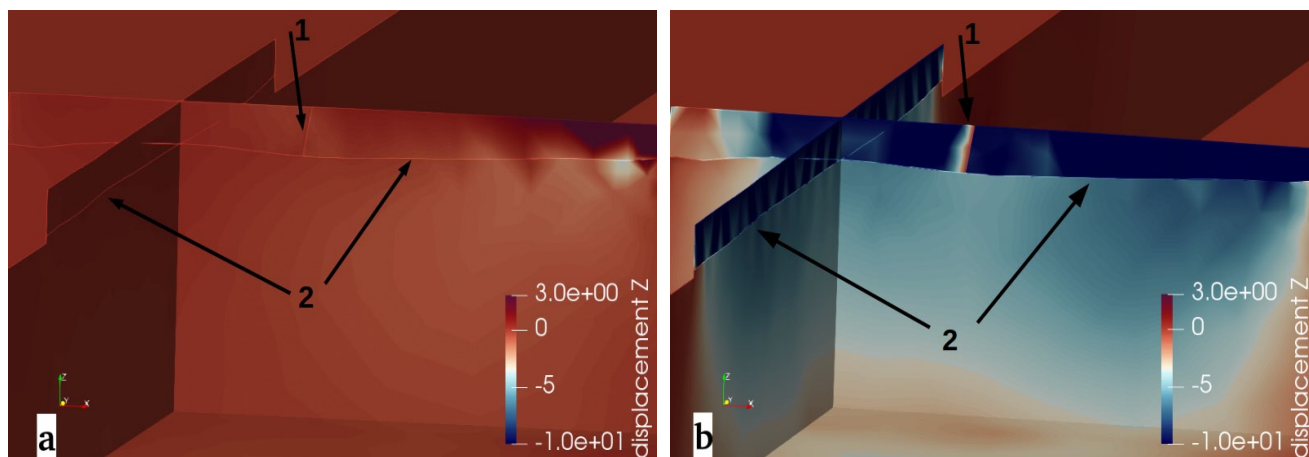
рость смещения по разлому [35, 36]. Slip rate рассчитывается как суммарная амплитуда смещений по разлому за время, в которое смещения происходили по палеосейсмологическим данным, и в результате получается средняя скорость смещения по разлому за несколько тысяч или даже десятков тысяч лет. Механика движений по разломам детально рассмотрена в монографиях [37, 38].

Очевидно, что сейсмическая активность разломов, имеющих разные средние скорости смещений, различна, что выражается в различиях магнитуд землетрясений и интервалов повторяемости. В данном случае численное моделирование для реологических и геометрических условий, схожих с земной корой и верхним слоем мантии сахалинского блока, показывает очевидную разницу в смещениях на крыльях Центрально-Сахалинской разломной зоны (рис. 3 и 4) при сравнении горизонтальных воздействий с горизонтальными в

комбинации с вертикальными, имитирующими вклад гидроизостазии.

Полученные в результате численного моделирования деформации на плоскости разлома (рис. 7 а, б), которые, по сути, являются амплитудой смещений по разлому, заметно различаются. Если смещения на разломе при горизонтальных воздействиях (рис. 7 а) в конкретном месте составляют несколько сантиметров, то в случае комбинированного воздействия (рис. 7 б) амплитуда смещений достигает нескольких метров.

Сеймотектоническая активность, в свою очередь, влияет на вертикальные движения в береговой зоне, как это произошло, например, во время Невельского землетрясения 2007 г. [39], через изгибание деформируемой упругой земной коры при сейсмических событиях. Деформации, вызывающие смещения на разломе, не ограничиваются территорией непо-



**Рис. 7.** Вид разрезов модели, демонстрирующих вертикальные смещения (displacement Z), в том числе на плоскости разлома, в результате 20 тыс. лет горизонтальных воздействий (а); комбинации горизонтальных и вертикальных воздействий (б). Местоположение плоскостей разреза показано красными линиями на рис. 5 d. Стрелка 1 указывает на плоскость разлома, стрелка 2 – на границу Мохо.

средственно у разлома, а происходят на большем расстоянии, достигая береговой зоны. Подобные деформации определяют эволюцию рельефа прибрежной зоны, в пределах которой обычно расположены основные хозяйственные инфраструктуры.

Оценки поля напряжений по коэффициенту Лодэ–Надаи для о. Сахалин, выполненные по результатам анализа современных землетрясений [13, 14, 30], иллюстрируют «мгновенную», в геологическом смысле, геодинамическую обстановку в земной коре. Это позволяет оценить характер геодинамической обстановки в настоящий момент. При расчете же коэффициента по результатам моделирования имеется возможность получить целый спектр изменений поля напряжений во времени. В нашем случае получено пространственное распределение значений коэффициента через каждые 1 тыс. лет на протяжении 40 тыс. лет в различных динамических условиях – горизонтального сжатия, горизонтального сжатия в комбинации с вертикальным. Это позволяет сравнивать поля напряженного состояния в зависимости от влияния внешних факторов, например изменений уровня Мирового океана при смене ледниковых периодов межледниковьями, и оценить влияние данных факторов на распределение поля напряжений. Рисунки 5 и 6 наглядно демонстрируют различие в распределении и динамике поля напряжения в зависимости от комбинации воздействия внешних

факторов на блок земной коры и мантийного слоя изучаемой территории.

Значения наибольшего из главных напряжений,  $\sigma_1$ , меняются в интервале от нескольких десятков до нескольких тысяч МПа, что не противоречит значениям, полученным на южной части Центрально-Сахалинского разлома (ЦСР) в работе [25], хотя по южной части ЦСР использовалась более детализированная модель с более низкими реологическими параметрами. Такая сходимость независимых результатов свидетельствует о хорошем подобии моделей реальным условиям.

Коэффициент Лодэ–Надаи иллюстрирует смену геодинамической обстановки при изменении направления воздействия со стороны внешних факторов. Перестройка поля напряжения происходит при смене направления вертикальных воздействий, имитирующих гидроизостазию.

Отдельного изучения требует рассмотрение метастабильного состояния разлома, когда «сам момент динамического срыва во многом случаен и может определяться внешними по отношению к очаговой зоне, порой довольно слабыми воздействиями... Источниками таких кратко- и среднесрочных локальных флуктуаций напряженного состояния могут быть деформационные процессы в соседних областях, воздействие землетрясений, приливы и океаническая нагрузка, магматические интрузии, антропогенная активность

в виде наполнения резервуаров, горных работ, инъекции и откачки флюидов, крупных взрывов, а также сезонные факторы, такие как снеговая нагрузка, изменение уровня водохранилищ и т.д.» [38, с. 260]. В этом смысле гидроизостазия в результате изменения уровня океана на 100–120 м на протяжении 20 тыс. лет является уже не «слабым», а скорее «сильным» воздействием в роли триггера сейсмических событий. Результаты расчета коэффициента Лоде–Надаи (рис. 5 и 6) наглядно демонстрируют резкое изменение геодинамической ситуации при имитации эффекта гидроизостазии, что не может не привести к динамическому срыву по разлому.

К сожалению, в данной работе не удалось применить описание мантийных слоев в виде вязко-эластичного материала, что позволило бы учесть временные задержки релаксации после съема вертикальных сжимающих деформаций. Но представление верхнего мантийного слоя как упругого материала позволило определить тенденции в распределении напряженно-деформированного состояния в земной коре.

В настоящее время нет консенсуса среди исследователей о прохождении межплитовой границы между Амурской и Охотоморской плитами в южной части Сахалина, поэтому в модели была принята компромиссная позиция разломной зоны, в конфигурации как бы между двумя положениями.

## Выводы

Численное моделирование, выполненное для морфологических и реологических условий, схожих с сахалинскими, продемонстрировало следующие различия моделируемых обстановок горизонтального сжатия и комбинирования горизонтального сжатия с меняющимися во времени на противоположные вертикальными воздействиями:

- амплитуды смещений заметно различны для двух моделируемых случаев;
- поля напряжений различаются по амплитуде при горизонтальном сжатии и комбинировании горизонтального и вертикального сжатия, но сохраняются не-

изменными в период обстановки сжатия;

- изменения в направлении вертикального воздействия при сохранении горизонтального приводят к изменениям в динамической обстановке;
- различия в деформациях на крыльях разломной зоны, а также на самой плоскости разлома представляют собой аналоги принятых в палеосейсмологии средних скоростей смещений по разлому (slip rate) и предполагают различие сейсмоактивности на разломе в указанных двух условиях;
- для метастабильного состояния разлома предполагается динамический срыв при изменении поля напряжений. Поскольку в результате выполненного моделирования явным образом получено изменение напряженного состояния, то нельзя исключать для вертикальных деформаций вследствие гидроизостазии роли триггера динамических срывов на разломах.

## Список литературы

1. Шепард Ф.П. 1969. *Морская геология*. Л.: Недра, 462 с.
2. Fairbridge R. 1961. Eustatic changes in sea level. *Physics and Chemistry of the Earth*, 4: 99–185. [https://doi.org/10.1016/0079-1946\(61\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0079-1946(61)90004-0)
3. Clark J., Farrell W., Peltier W. 1978. Global changes in postglacial sea level: Numerical calculations. *Quaternary Research*, 9(3): 265–287 [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(78\)90033-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(78)90033-9)
4. Lambeck K., Purcell A., Johnston P., Nakada M., Yokoyama Y. 2003. Water-load definition in the glacio-hydro-isostatic sea-level equation. *Quaternary Science Reviews*, 22(2-4): 309–318. [https://doi.org/10.1016/s0277-3791\(02\)00142-7](https://doi.org/10.1016/s0277-3791(02)00142-7)
5. Булгаков Р.Ф., Сеначин В.Н. 2019. Морские террасы и влияние эффекта гидроизостазии на вертикальные движения Сахалина. *Геосистемы переходных зон*, 3(3): 277–286. [doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.277-286](https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.277-286)
6. Зверев А.Т. 2020. Эвстатические колебания уровня Мирового океана. *Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка*, 64(2): 157–163. [doi:10.30533/0536-101X-2020-64-2-157-163](https://doi.org/10.30533/0536-101X-2020-64-2-157-163)
7. Yokoyama Y., Purcell A. 2021. On the geophysical processes impacting palaeo-sea-level observations. *Geoscience Letters*, 8(13). <https://doi.org/10.1186/s40562-021-00184-w>
8. Roy K., Peltier W.R. 2015. Glacial isostatic adjustment, relative sea level history and mantle viscosity: reconciling relative sea level model predictions for the U.S. East coast with geological constraints. *Geophysical J. International*, 201(2): 1156–1181. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv066>
9. Булгаков Р.Ф., Иващенко А.И., Ким Ч.У., Сергеев К.Ф., Стрельцов М.И., Кожурин А.И., Бесстрашнов В.М.,

- Стром А.Л., Suzuki Y., Tsutsumi H., Watanabe M., Ueki T., Shimamoto T., Okumura K., Goto H., Kariya Y. **2002**. Активные разломы Сахалина. *Геотектоника*, 36(3): 227–246.
10. Степашко А.А. **2010**. Глубинные основы сейсмотектоники Дальнего Востока: Сахалинская зона. *Тихоокеанская геология*, 29(3): 50–63.
11. Кожурин А.И. **2013**. *Активная геодинамика северо-западного сектора тихоокеанского тектонического пояса (по данным изучения активных разломов)*: автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук. Москва, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.
12. Nicholson U., VanLaningham S., Macdonald D.I.M. **2013**. Quaternary landscape evolution over a strike-slip plate boundary: Drainage network response to incipient orogenesis in Sakhalin, Russian Far East. *Geosphere*, 9(3): 588–601. <https://doi.org/10.1130/ges00883.1>
13. Татаурова А.А. **2015**. Поля напряжений и деформаций по данным механизмов коровых землетрясений о. Сахалин. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 3(27): 93–101.
14. Сим Л.А. Богомолов Л.М., Брянцева Г.В., Саввичев П.А. **2017**. Неотектоника и тектонические напряжения острова Сахалин. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(1): 181–202. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237>
15. Heidbach O., Rajabi M., Fuchs K., Müller B. **2018**. The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744(2018): 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
16. Suzuki Y., Tsutsumi H., Watanabe M., Ueki T., Okumura K., Goto H., Streltsov M.I., Kozhurin A.I., Bulgakov R.F., Terentief N., Ivashchenko A.I. **2000**. Geology and geomorphology of the Sakhalin Island: Preliminary report on active faults in Sakhalin, Russia. *J. of Geography (Chigaku Zasshi)*, 109(2): 311–317. [https://doi.org/10.5026/jgeography.109.2\\_311](https://doi.org/10.5026/jgeography.109.2_311)
17. Сеначин В.Н., Веселов О.В., Семакин В.П., Кочергин Е.В. **2013**. Цифровая модель земной коры Охотоморского региона. *Геоинформатика*, 4: 33–44.
18. Reynolds S.D., Coblenz D.D., Hillis R.R. **2002**. Tectonic forces controlling the regional intraplate stress field in continental Australia: Results from new finite element modeling. *J. of Geophysical Research*, 107(B7). <https://doi.org/10.1029/2001jb000408>
19. Zhao S., Müller R.D. **2003**. Three-dimensional finite-element modelling of the tectonic stress field in continental Australia. In: *Evolution and Dynamics of the Australian Plate*, p. 71–89. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2372-8.71>
20. Dziewonski A.M., Anderson D.L. **1981**. Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25(4): 297–356. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7)
21. Жарков В.Н. **2013**. *Внутреннее строение Земли и планет: Элементарное введение в планетную и спутниковую геофизику*. М.: Наука и образование, 414 с.
22. Сакулина Т.С., Каленич А.П., Атаков А.И., Тихонова И.М., Крупнова Н.А., Пыжянова Т.М. **2011**. Геологическая модель Охотоморского региона по данным опорных профилей 1-ОМ и 2-ДВ. *Разведка и охрана недр*, 10: 11–17.
23. Суворов А.И. **1968**. Глубинные разломы Земли. *Природа*, 9: 30–41.
24. Иволга Е.Г., Манилов Ю.Ф. **2019**. Структура литосферы зоны перехода континент–океан южной части Дальнего Востока России по результатам плотностного моделирования. *Тихоокеанская геология*, 38(6): 3–20.
25. Каменев П.А., Заболотин А.Е., Дегтярев В.А., Жердева О.А. **2019**. Разработка геомеханической модели активного разлома южного Сахалина. *Геосистемы переходных зон*, 3(3): 287–295. [doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.287-295](https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.287-295)
26. Прытков А.С., Василенко Н.Ф. **2016**. Геодинамика Северного Сахалина после Нейтегорского землетрясения 1995 г. Mw=7.1 по данным GPS наблюдений. *Мониторинг. Наука и техника*, 3(28): 9–12.
27. Прытков А.С., Василенко Н.Ф. **2018**. Деформации земной поверхности острова Сахалин по данным GPS-наблюдений. *Геодинамика и тектонофизика*, 9(2): 503–514. [doi:10.5800/GT-2018-9-2-0358](https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0358)
28. Короткий А.М., Пушкар В.С., Гребенникова Т.А. **1997**. *Морские террасы и четвертичная история шельфа Сахалина*. Владивосток: Дальнаука, 229 с.
29. Булгаков Р.Ф. **2021**. 3D-моделирование эффекта гидроизоляции с близкой к реальной конфигурацией поверхности Мохо для Охотского моря. *Геосистемы переходных зон*, 5(4): 339–345. <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.4.339-345>
30. Polets Y. **2019**. The stress state of the Sakhalin Island and adjacent territories. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 324(1): 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012010>
31. Tsukuda T. **1985**. Long-term seismic activity and present microseismicity on active faults in Southwest Japan. In: Kisslinger C., Rikitake T. (eds) *Practical approaches to earthquake prediction and warning*. Dordrecht: Springer, ch. 3: 253–284. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-2738-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-017-2738-9_4)
32. Okada A., Takemura K., Katon S. **1998**. Characteristics of the Nojima fault, a major surface rupture associated with the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, in the northern part of Awaji Island, Western Japan. *Humans and Nature*, 9: 33–56. [https://doi.org/10.24713/hitotoshizen.9.0\\_33](https://doi.org/10.24713/hitotoshizen.9.0_33)
33. Кожурин А.И., Пономарева В.В., Пинегина Т.К. **2008**. Активная разломная тектоника юга Центральной Камчатки. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 2: 10–27.
34. Tsutsumi H., Suzuki Y., Kozhurin A.I., Strel'tsov M.I., Ueki T., Goto H., Okumura K., Bulgakov R.F., Kitagawa H. **2005**. Late Quaternary faulting along the western margin of the Poronaysk Lowland in Central Sakhalin, Russia. *Tectonophysics*, 407: 257–268.
35. McCalpin J.P. (ed.) **1996**. *Paleoseismology*. 1<sup>st</sup> ed. USA, Academic Press. (International Geophysics Series; 62). 2nd ed. 2009. URL: [https://www.irsrm.cas.cz/ext/ethiopia/materials/papers/tectonic\\_geomorphology/Paleoseismology\\_McCalpin.pdf](https://www.irsrm.cas.cz/ext/ethiopia/materials/papers/tectonic_geomorphology/Paleoseismology_McCalpin.pdf)
36. Anderson J.G., Wesnousky S.G., Stirling M.W. **1996**. Earthquake size as a function of fault slip rate. *Bull. of the Seismological Society of America*, 86(3): 683–690.
37. Касахара К. **1985**. *Механика землетрясений*. М.: Мир, 264 с.
38. Кочарян Г.Г. **2016**. *Геомеханика разломов*. М.: ГЕОС, 424 с.
39. Ломтев В.Л., Гуринов М.Г. **2009**. Тектонические условия Невельского (02.08.2007, M ~ 6.1) землетрясения. *Тихоокеанская геология*, 28(5): 44–53.

## Modeling of the stress-strain condition of the Earth's crust of Sakhalin Island: impact of hydroisostasy

Rustam F. Bulgakov

E-mail: [r.bulgakov@imgg.ru](mailto:r.bulgakov@imgg.ru)

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

**Abstract.** The paper attempts to answer the question about the role of contribution of the hydroisostasy to the stress-strain state of the Earth's crust on the Island of Sakhalin. The hydroisostasy contribution was estimated by simulation by means of finite element method. The mesh grid for the calculation was constructed using the real values of the depth of the Moho discontinuity surface and the topography of Sakhalin Island with adjacent shelf areas. The calculation took into account the Central Sakhalin fault zone. Lateral displacements as a result of strain and lateral displacements combined with vertical ones were simulated separately. Comparison of the results of the stress-strain state simulation, taking lateral displacements and their combination with vertical ones into account, clearly demonstrates the significance of the hydroisostasy contribution to the stress-strain state of the Earth's crust in the Sakhalin region.

**Keywords:** hydroisostasy, stress, strains, vertical movements, fault, Elmer, finite element method

**For citation:** Bulgakov R.F. Modeling of the stress-strain condition of the Earth's crust of Sakhalin Island: impact of hydroisostasy. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 4, pp. 303–327. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.4.303-315.316-327>; <https://www.elibrary.ru/pylmpf>

### Acknowledgements and Funding

Author thanks the Reviewers for the constructive suggestions and comments on the substance of the manuscript.

### Introduction

In the middle of the XX century, it was founded, that the postglacial transgression, especially at the ending stage, later than 6 ka ago, had different scenarios and uneven rate of sea advance in various areas of the World Ocean. F. Shepard and R. Fairbridge scenarios were considered as basic. Shepard [1] assumed a gradual rise of sea level to reach the present meaning by the asymptote, but never exceeded it. His opponent, Fairbridge [2] proposed an alternative conception of oscillations presence in the transgression course. According to Fairbridge, the World Ocean level has exceeded the present one by 3–4 m 5.0 and 3.7 ka ago, and then returned to the meaning close to the present after a series of small oscillations with an amplitude of +1.5 m 2.3 and 1.2 ka ago.

The solution for the discussed contradiction was offered by the J. Clark et al. [3]. They developed a model taking into account the changes in gravity

field resulting from redistribution of ice and water masses on the Earth's surface at elastic and viscous-elastic rheological properties of the Earth's crust and mantle layers. The model calculated the difference between the sea surface and solid seabed for a given time moment. Later, this calculation was called “solution of the sea level equation”.

These authors also identified six zones with similar scenarios of the postglacial transgression on the Earth's surface, i.e. the zones where the sea level had exceeded the present one, the zones, in which it had decreased, etc. Six zones were identified in total. Further, the numerical simulation of the postglacial transgression was improved on the base of this work. The term hydroisostasy was introduced, such phenomena as ocean siphoning (“transfer” of the ocean), continental levering (rise of the continent) [4] were discovered.

Sakhalin, which is an island and situates outside the zones of gravity impact of ice sheet masses (far

field zone), was not affected by the glacioisostasy, but could not avoid the hydroisostasy impacts.

The most studied time interval, at which the change in the level of the World Ocean with an amplitude of 120 m occurred, is the last 20 ka. Melting of ice sheet and the World Ocean recharge with water along increase of sea and ocean level up to the present began during this period after the last maximum of glaciation (the Valdai Glaciation on the Russian Platform, the Würm in the West European region, the Wisconsin in the North America, the Sartan in Siberia), when the volume of water, equivalent to a decrease in sea level by 100–120 m, was frozen in glaciers.

The phenomenon of hydroisostasy is studied by the numerical simulation methods [4–7].

This work attempts to study the influence of hydroisostasy effect on modern crustal strains and stress fields in the territory of Sakhalin and adjacent waters in the presence of a deep fault. Stress fields are illustrated by the Lode–Nadai coefficient.

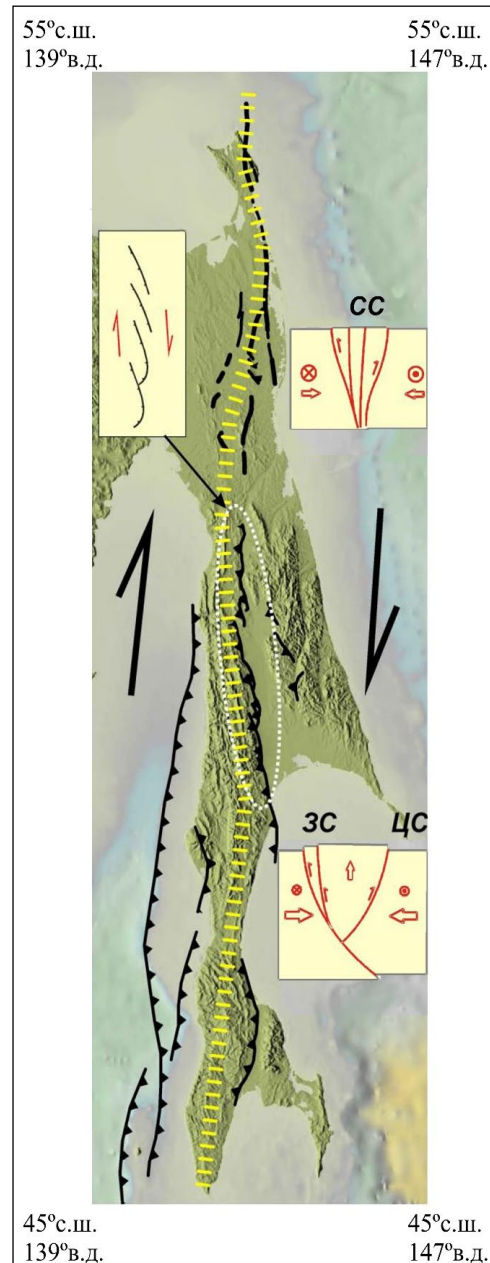
At present, studies are underway to clarify the volume of water contribution to the World Ocean during the postglacial transgression. For example, the last eustatic curve ICE-7G\_NA (VM7) together with the parameters of the model of mantle viscosity, was clarified and proposed in the work [8]. This detailed transgression curve characterizes loading of the surface of the World Ocean floor, but the full cycle of loading and unloading should to be analyzed for assessing the response of the Earth's crust and mantle layer. We first simulated loading of adjacent waters with a layer of water with increase in a depth to 120 m for 20 ka, then unloading to a depth of 0 m over the next 20 ka. Since the detailed course of the changes in the World Ocean level for the previous epochs was not identified in the same degree of detail as for the eustatic curve ICE-7G\_NA (VM7), loading and unloading were performed according to linear law. I.e. the situation similar to the interglacial transgression turning into the sea regression (water intake from ocean to ice sheets) was simulated. “Sea level equation” was not solved in this case.

Sakhalin Island located at the junction of the Amur and Okhotsk Sea tectonic plates is divided in a submeridional direction by a fault zone [9–15], which generates the main seismic activity.

Active faults were found throughout the fault zone [9, 11, 16].

## Model construction

Based on the data of Topex bathymetry ([https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get\\_data.cgi](https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi)) and Moho discontinuity from the Crust 2.0 database (<https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>), adapted for the Sea of Okhotsk region [17], the 3D mesh was constructed for finite element calculation (FEM).



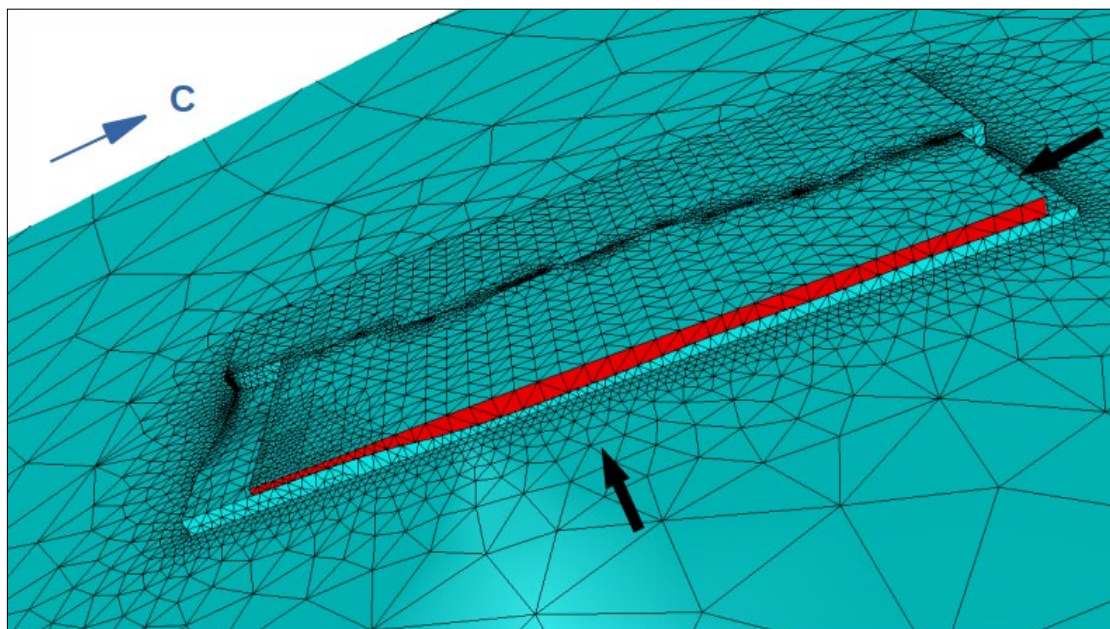
**Fig. 1.** The Sakhalin fault system in interpretation by A. Kozhurin [11]. The horizontal dashes show the position of the regional dextral strike-slip zone. On the right insets there are the principal models of the cross-section of the zone in different parts of the island uplift: CC – North Sakhalin, 3C – West Sakhalin, 4C – Central Sakhalin segments of the zone. The left inset shows a diagram of the echelon arrangement of the segments of the Central Sakhalin reverse fault zone. Figure is borrowed from A.I. Kozhurin's dissertation abstract [11].

An area of the Sea of Okhotsk region within the coordinates of 139–147° E and 45–55° N was chosen for simulation (Fig. 1). Mesh grid construction (Fig. 2) was performed in an open-source and open-access Salome (<https://salome-platform.org/>) and FreeCad (<https://www.freecadweb.org/>) software packages. Bathymetry and Moho discontinuity were taken in a projection of UTM-54 on WFS-84. The mesh grid is a parallelepiped with sides of 5 000 and 10 500 km, and a depth of 430 km. In the central part of the grid, there are surfaces built on the basis of the data of bathymetry and Moho discontinuity surface. The upper layer in this part with a thickness from 10 to 40 km is the Earth's crust, and the lower one down to a depth of 430 km is a layer of the upper mantle. The grid resolution for the surface digital model, on which the mesh grid was constructed was taken 50 km. The excess volume was built on the sides of the parallelepiped of the central part in order to eliminate the influence of interaction with the model's side boundaries. The central part of the parallelepiped is a rectangular area with sides 500×1050 km (Fig. 2). The simulation here is somewhat analogous to the works [18, 19],

in which the stress fields, created by pressure from the surrounding lithospheric plates, were simulated in the Earth's crust of the Australian continent.

The change in loading on the Earth's crust and mantle down to the core resulting from redistribution of ice sheets and waters of the World Ocean is usually calculated when simulating the sea level changes during the epochs of changeover of the glacial periods by the interglacial ones. It is necessary to take into account the entire mantle thickness in the case of describing the mantle layers in the form of viscoelastic material. In our case, when the simulation aims to influence of the fault on the evolution of the elastic Earth's crust, the mantle is also described in the form of elastic material, so there is no need to take into account the strains over the entire depth and increase the cost of calculation. Therefore, the model for calculation was built only for a depth of the upper mantle, which, according to the data [20], is at a depth about of 400 km. Due to this the depth of 430 km was taken.

Salome used the NETGEN 1D-2D-3D algorithm of the NETGEN mesh grid generator (<https://github.com/NGSolve/netgen>) to gene-



**Fig. 2.** Mesh grid built to calculate the stress-strain state with the fault zone on Sakhalin Island under the impact of the movement of the Earth's crust of the Sea of Okhotsk plate. Black arrows indicate the direction of movement of the surfaces (red on the east side, hidden on the north side). According to the simulation conditions, the movements along the arrows have continued for 40 ka with an amplitude of 80 meters from the east and north. Vertical displacements, which occurred with an amplitude of 10 meters in the downward direction for 20 ka and then, 10 meters in the upward direction for 20 ka, were simulated on the surface of the fault wings in the areas below 0 meters in altitude in order to simulate the influence of the hydroisostasy effect.

rate the mesh grid. The mesh grid elements were composed of quadratic tetrahedrals. The mesh grid contains 2504 nodes and 13 743 elements. The dimensions of the mesh grid elements were

increased from the center to the edges and in depth in order to reduce the computation time.

The mesh grid model includes two layers (see the table).

**Table.** Earth's crust and mantle characteristics taken in the work to build a model

| Layer         | Layer thickness, km | Density, kg/m <sup>3</sup> | Poisson's ratio | Shear modulus, $\times 10^{11}$ Pa | Gravity (gravitational acceleration), m/s <sup>2</sup> |
|---------------|---------------------|----------------------------|-----------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Earth's crust | 30–38               | 3233.6                     | 0.49            | 0.45                               | 9.987630567                                            |
| Upper mantle  | 430                 | 3367.12                    | 0.49            | 1.9941                             | 9.939356456                                            |

*Note.* The values were taken on average from the works [21, 22].

The “Earth's crust” layer is composed of two separate bodies, which are separated by the planes of the “fault zone”. Fault zone configuration represented in Fig. 1 is borrowed from the work [11, Fig. 17]. The angle of inclination of the “fault” plane is 80° with a dip towards the west. The angle of inclination of 80° was chosen according to the estimates made by A.I. Suvorov for the angles of inclination of deep faults [23]. He identifies two types of deep faults, the first ones are arcuate, that are typical, for example, for the Meso-Ceinozoic faults of large structures, such as Pamir and Himalayas with the angles of inclination of 40–60°, and the second ones are the faults of a lesser scale and more rectilinear with the angle of inclination of 80–90°, for example, a deep fault of the Sikhote-Alin adjacent to the Okhotsk Sea plate. There is no any certain estimate of the angle of inclination of the Hokkaido-Sakhalin fault system in later works [24], but there is no indication of the flatter inclination angle of the system either. An estimate of the inclination of 75–85° of the Aprelovka fault in the southern part of the Central Sakhalin fault zone was also used in building a geomechanical model of the active fault in southern Sakhalin [25].

It should be noted that the model was built as an elastic solid, without taking into account the viscous characteristics of the mantle layer.

## Calculation

The calculation was performed in open-source and open-access software package Elmer (<https://www.csc.fi/web/elmer>). Simulation was carried out in the transient mode with a timestep size of 1 000 years. The plane bounding the right, eastern wing of the “Earth's crust” layer

from the east side, highlighted in red in Fig. 2, was being shifted westward to a distance of 80 km for a time period of 40 ka in the direction indicated with the arrow. Synchronously with the plane movement from east to west, the plane bounding the eastern wing of the fault on the north side moved south at the same rate (Fig. 2). Since the object of the model is not a rigid body, but has rheological properties similar to the Earth's crust, and also is deformed not on a smooth surface, but on a surface, that repeats the Moho discontinuity, it is not possible to describe the process as a displacement of the rigid, nondeformable eastern wing, and we have to talk about some sum displacement vector in the eastern wing. Sum displacement vector was obtained at an angle of 45° and with a rate of 2.8 mm/year, which coincides with the estimate of the current rates of horizontal displacements of the Earth's surface in Sakhalin according to the results of geodetic measurements [26, 27].

Taking into account that the amplitudes of vertical movements estimated from palaeogeographic reconstructions of traces of the ancient coastlines on the coasts of Sakhalin Island during the period of the postglacial transgression and the Holocene do not exceed 10 m [28], it was assumed that the “Earth's surface” located below modern sea level (i.e. the seabed without impact on the onshore of the island) has undergone maximum displacements with an amplitude of 10 m in a top-down direction for 20 ka and in a bottom-up direction for the next 20 ka in order to simulate the loading resulting from glacial-interglacial regressive and transgressive changes in the level of the World Ocean.

Amplitude of the “onshore” surface of Sakhalin Island could undergo vertical deformations due to rheological properties of the Earth’s crust, which bent following the displacements of the seabed surface of adjacent waters, and impact due to the “flow” of the mantle substance from beneath the water areas subject to the vertical loading under the land. At the same time, the general strain of the land of Sakhalin Island is expected to not exceed 10 m in amplitude of movement.

A similar estimate of the seabed surface downwarping of  $-10$  m was obtained from 3D simulation of the hydroisostasy effect with viscous-elastic rheology of the mantle material for the Sea of Okhotsk at loading of 120 m layer of water [29].

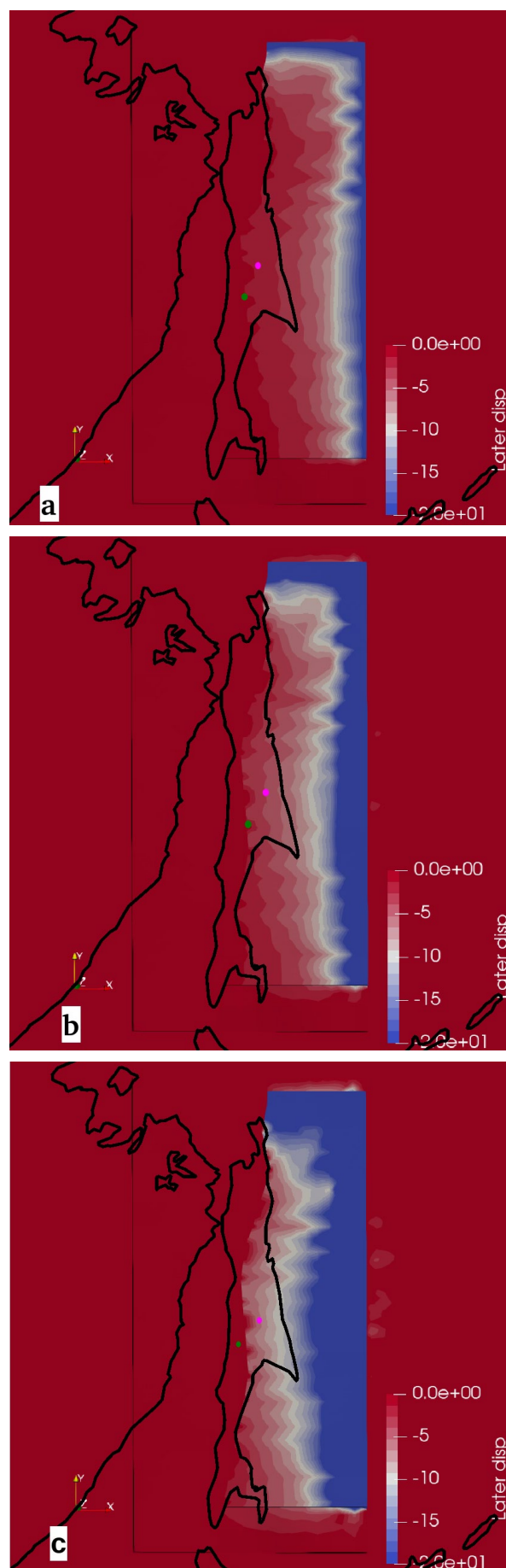
Mathematical tools provided in the software package was used in the simulation.

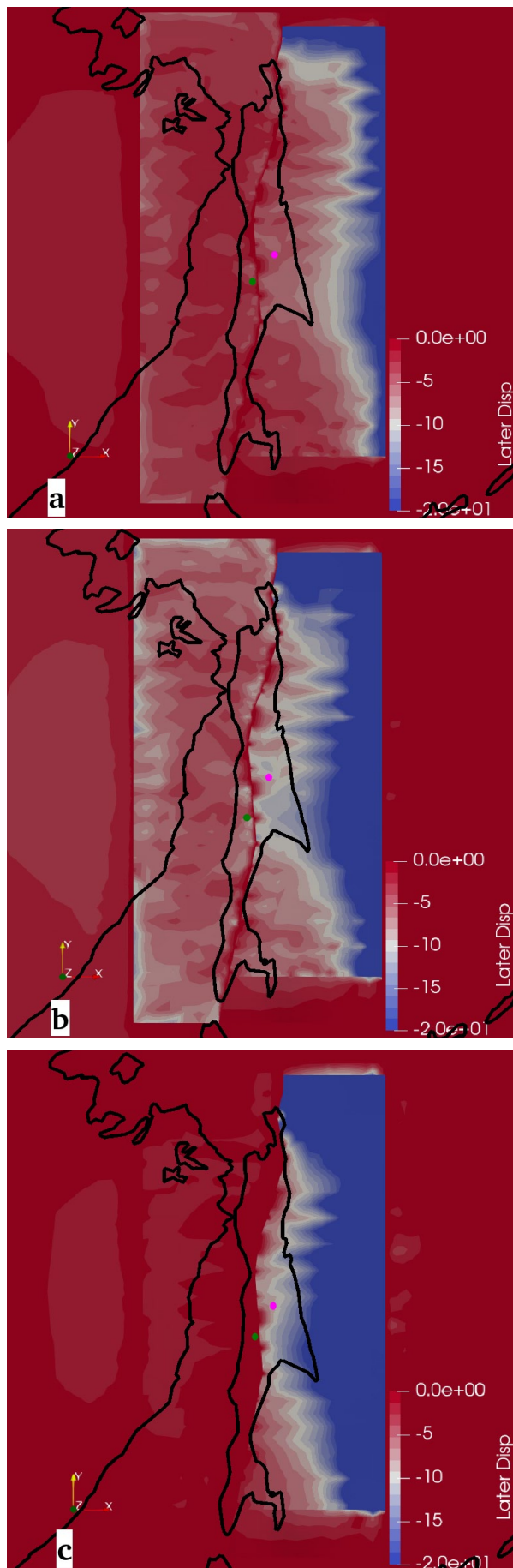
The system of linear equations of strain was solved by iterations of the generalized conjugate residuals method (GCR) after applying the preconditioners for Krylov’s incomplete factorization (ILU2) in the Finite Elasticity module (finite deformation). For discretization in time, the second-order BDF (backward differentiation formula) method, the generalized minimal residuals method were used. (<http://www.nic.funet.fi/pub/sci/physics/elmer/doc/ElmerSolverManual.pdf>).

All sides of the model in the bottom layer including the sides of the bottom layer, that make up the boundary of the top layer of the “Earth’s crust”, were fixed. Iteration convergence limit was set  $10^{-7}$ .

The contact interaction of the planes in the “fault zone” was simulated by means of the mortar method. Mortar method is a numerical method for discretization of continuous functions to solve partial differential equations. The method is used to discretize the disjoint subparts of common body of the model mesh grid in order to join inconsistent grids, which are the fault wings in this case (<https://www.nic.funet.fi/pub/sci/physics/elmer/doc/ElmerModelsManual.pdf>).

**Fig. 3.** Calculated lateral displacements without taking into account the influence of vertical displacements: (a) values of the lateral displacement vector (Later disp. scale, in meters) as a result of the movement of the lateral surfaces from the east and north sides for 10 ka; (b) the same, but for 20 ka; (c) the same, but for 40 ka. The displacement scale for all time intervals is the same for ease of comparison.





## Results

Illustrations in Figures 3 and 4 clearly demonstrate the differences in the values of displacements under the impact of vertical displacements and without them. Fig. 3 illustrates the calculated lateral strains in the time intervals of 10, 20 and 40 ka without the impact of vertical displacements of the “seabed” of the adjacent water areas. Fig. 4 shows the lateral displacements over the same time intervals, but in combination with the impact of vertical displacements of the “seabed” with an amplitude of 10 m downwards, below the mark of 0 m, for 20 ka and then with an amplitude of 10 m upwards for another 20 ka.

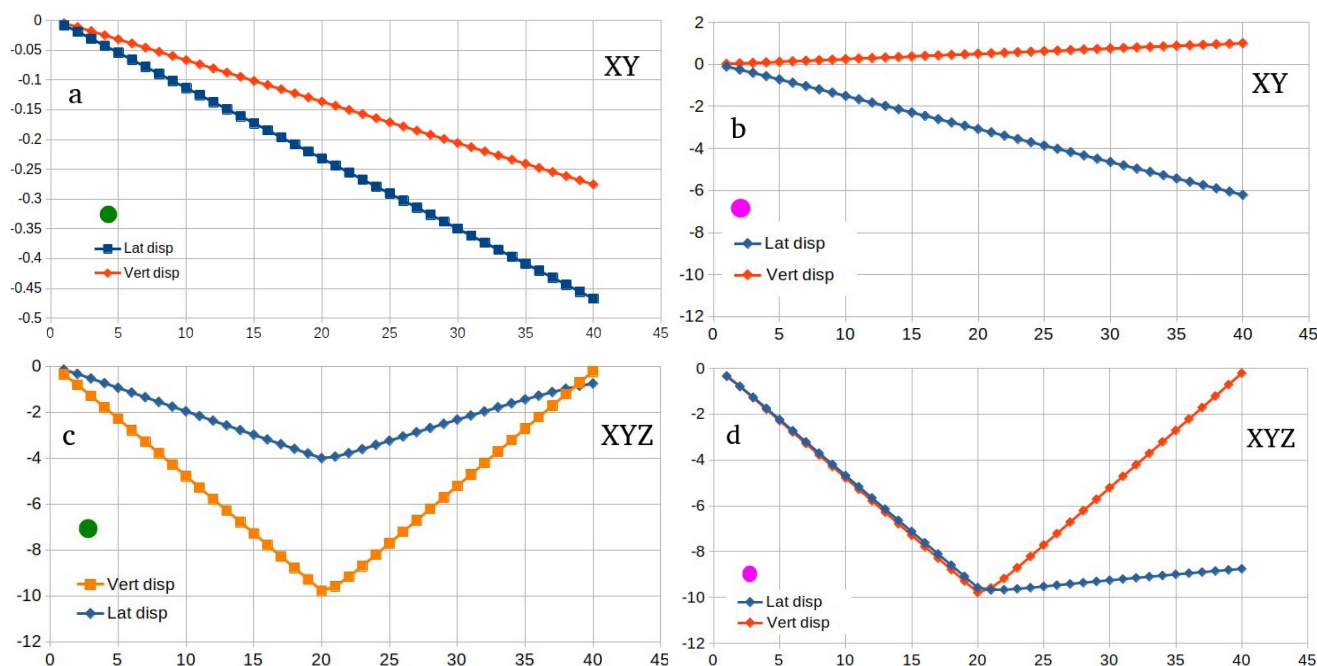
Trends in strain are illustrated in the graphs of Fig. 5 – changes in the values of the displacement amplitudes taken on certain surfaces of Sakhalin Island on both sides of the fault zone. Point locations are indicated with pink and green dots in Fig. 3, 4 and 6. The distance between the points is 100 km.

Fig. 5a shows the displacements of the point relative to the coordinate system of the model resulting from the forward horizontal movement (XY) of the lateral surfaces of the “Earth’s crust” layer in the total southwest direction and the stationary position of the lateral surfaces on the western and southern sides of the “Earth’s crust” layer. The graph shows displacements at the location indicated with the green dot in Figures 3 and 4. The maximum lateral displacements as a result of strain over 40 ka reached  $-0.43$  m, the maximum vertical displacements were  $-0.27$  m.

The graph in Fig. 5 b shows displacements at the location indicated with the pink dot in Figures 3 and 4. The maximum lateral displacements as a result of strain over 40 ka reached  $-6.0$  m, while the maximum vertical displacements reached  $+1.0$  m.

The graph in Fig. 5 c, where the vertical displacements are added to the lateral translational strains for half the time in the downward direction and the second half in the upward direction (XYZ), demonstrates the markedly different displacement character from the described above.

**Fig. 4.** Calculated lateral displacements taking into account the impact of vertical displacements: (a) values of the lateral displacement vector (Later disp. scale, in meters) as a result of the movement of the lateral surfaces from the east and north sides for 10 ka; (b) the same, but for 20 ka; c) the same, but for 40 ka. The displacement scale for all time intervals is the same for ease of comparison.



**Fig. 5.** Horizontal (Lat disp) and vertical (Vert disp) displacements (in meters) over 40 ka:

(a) and (b) – under the impact of lateral displacements, on the western wing of the fault zone at the point indicated with the green dot (a); and on the eastern wing of the fault zone at the point indicated with the pink dot (b).

(c) and (d) – under the impact of lateral displacements combined with the vertical ones on the western wing of the fault zone at the point indicated with a green dot (c); and on the eastern wing of the fault zone at the point indicated with a pink dot (d).

Locations of the points, where the values have been taken are indicated with pink and green dots in Figures 3, 4 and 6.

The graph shows the lateral displacements as a result of strain up to  $-4$  m over 20 ka and then the return of the point over another 20 ka, however not to the initial mark of 0 m, but only to a mark of about  $-1$  m. Vertical displacements reach  $-10$  m and return to zero marks.

Fig. 5 d shows that the lateral displacements reach  $-10$  m and return to  $-9$  m of the displacement amplitude on the eastern wing of the fault zone, under conditions of the combined action of the lateral and vertical displacements (XYZ), in the place indicated with the pink dot. Vertical displacements reach  $-10$  m, after which they return to 0 m.

Analysis of the stress state of the Earth's crust of Sakhalin Island is illustrated by a number of authors with the distribution of the Lode–Nadai coefficient [13, 14, 30].

We also calculated the Lode–Nadai coefficient (Fig. 6 and 7) based on the results of the analysis of the stress fields developing in time during the simulation of strains.

Fig. 6 a shows the distribution of the Lode–Nadai coefficient for the case of only translational lateral strains, without combination with the vertical ones. The result, in general, is intuitively

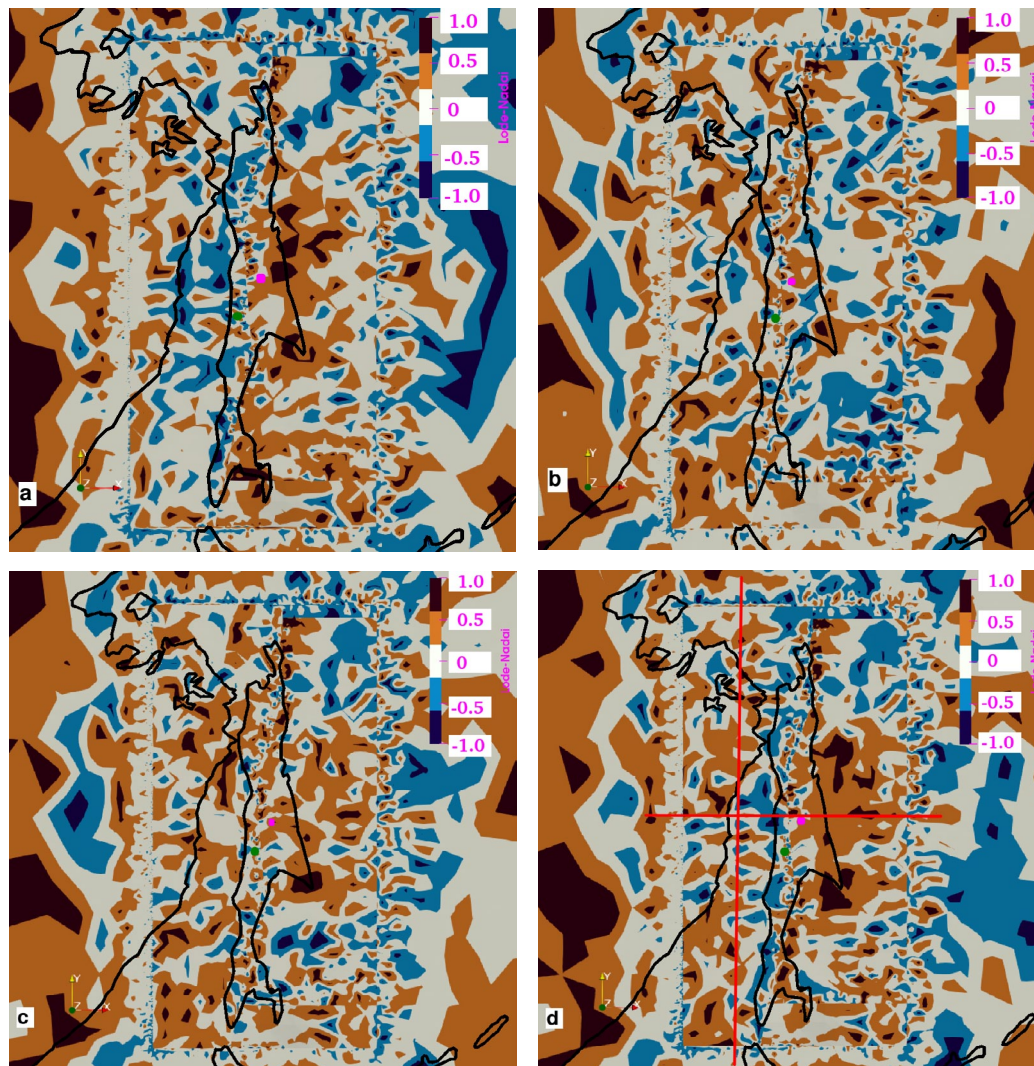
expected – the values of the Lode–Nadai coefficient remained constant throughout the entire period of calculation. One can also see this in the graphs in Fig. 7 a, b, which illustrate the values of the Lode–Nadai coefficient at points over 40 ka.

Fig. 6 b, c, d show changes in the distribution of the Lode–Nadai coefficient for the time intervals of 20, 33, and 40 ka under the influence of vertical displacements.

The graph in Fig. 7 c shows the complicated behavior of the stress field on the western wing of the fault zone (green dot in Figures 3, 4, 6). The setting is close to shear under loading; and the values of the coefficient vary from compression to extension after the start of unloading in the vertical direction.

The graph in Fig. 7 d illustrates the invariance of the Lode–Nadai coefficient for a time interval of 20 ka on the eastern wing of the fault zone (pink dot in Figures 3, 4, 6), and then, when vertical strains change sign to the opposite, the values of the coefficient begin to change from compression to extension.

It should be noted that the graphs in Fig. 7 illustrate the evolution of the coefficient exclusi-



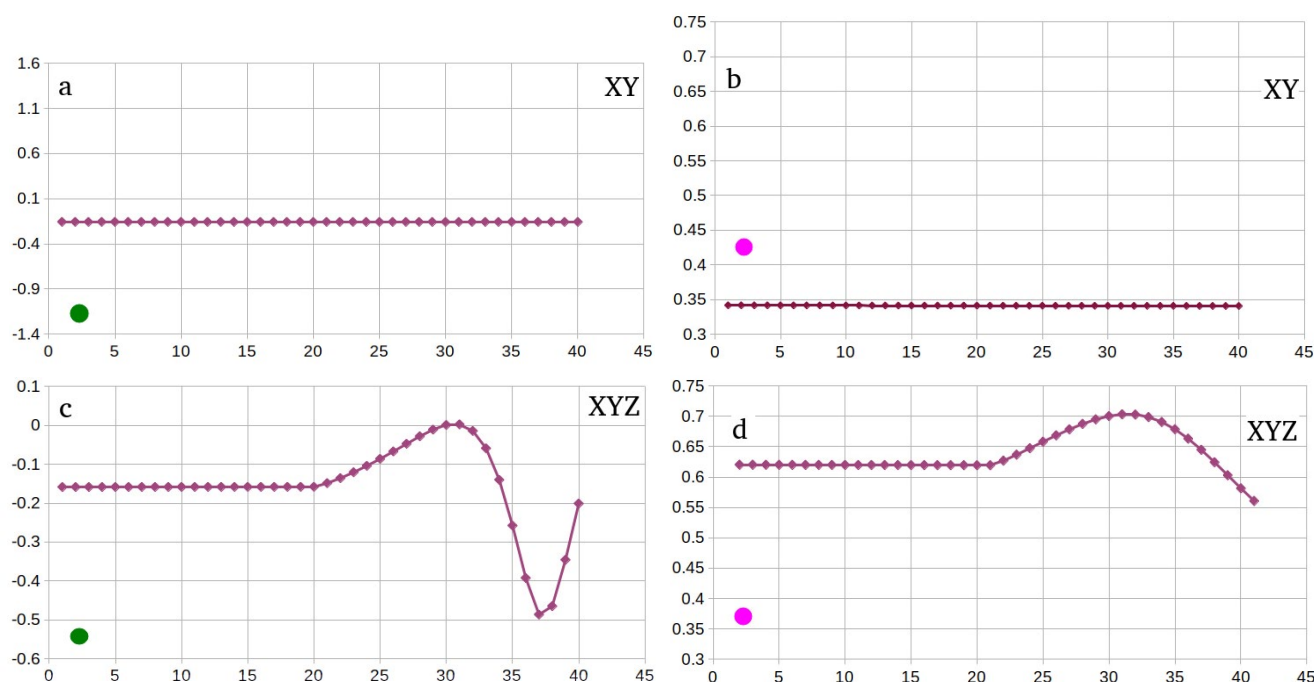
**Fig. 6.** Values of the Lode–Nadai coefficient: (a) for lateral displacement over 40 ka, without the impact of vertical movements; (b) the same, taking into account the impact of vertical movement with an amplitude of 10 meters over a period of 20 ka; (c) the same as in (b), after 33 ka of vertical movement, of which with an amplitude of 10 m in the downward direction for 20 ka and with an amplitude of 10 m in the upward direction for the time remaining; (d) the same as in (b), after 40 ka of vertical movement, of which with an amplitude of 10 m in the downward direction for 20 ka and with an amplitude of 10 m in the upward direction for the time remaining. Red lines are the planes of the cross-sections shown in Fig. 8.

vely at two points, while all possible geodynamic options are presented throughout the model space: compression, pure shear, extension, and they even replace each other in some areas. Therefore, the graphs of values in Fig. 7 do not characterize the entire stress field according to the model, but testify to the dependence of the stress state of the medium on vertical strains caused by the hydroisostasy effect.

## Discussion

According to the estimates obtained in highly seismic regions, such as the Japanese archipelago and the Kamchatka Peninsula, the recurrence in-

terval of strong earthquakes can reach 9–20 ka [31–33]. In the case of Sakhalin Island, there are preliminary estimates of the age of strong palaeoseismic events. The age of the last slips on the fault of the Central Sakhalin zone is estimated at 3.7 ka, and at 4–5 ka in the North Sakhalin zone [9, 11, 34]. Taking into account that the most studied time interval during which the World Ocean level increase by 100–120 m and, consequently, loading of the water column on the seabed changed, is 20 ka, it can be seen that the earthquake recurrence is quite commensurate with the duration of the postglacial transgression.



**Fig. 7.** Ranges in the Lode-Nadai coefficient (vertical axis):

(a) and (b) – for horizontal movements of the surface without the impact of vertical movements on the western wing of the fault zone at the point indicated with the green dot (a), and on the eastern wing of the fault zone at the point indicated with the pink dot (b).

(c) and (d) – under the impact of vertical movements of the surface as a result of hydroisostasy simulation on the western wing of the fault zone at the point indicated with the green dot (c), and on the eastern wing of the fault zone at the point indicated with the pink dot (d).

Locations of the points, where the values have been taken are indicated with pink and green dots in Figures 3, 4 and 6.

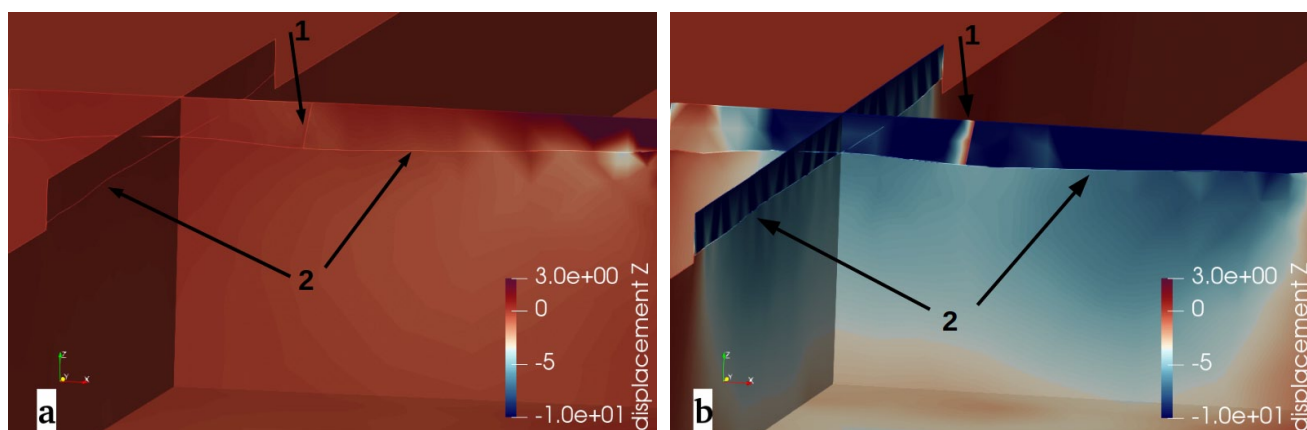
Another indicator of the seismic activity of faults is the slip rate, that is the average displacement rate along the fault [35, 36]. The slip rate is calculated as the total amplitude of displacements along the fault during the time in which the displacements occurred according to the palaeoseismological data, and as a result, the average displacement rate along the fault over several thousand or even tens of thousands of years is obtained. The mechanics of fracture movements are discussed in detail in monographs [37, 38].

It is obvious, that the seismic activity of the faults with different mean displacement rates is different, which is expressed in differences in earthquake magnitudes and recurrence intervals. In this case, numerical simulation for rheological and geometric conditions similar to the Earth's crust and upper mantle layer of the Sakhalin block shows an obvious difference in displacements on the wings of the Central Sakhalin fault zone (Figures 3, 4 and 5) when comparing horizontal impacts with horizontal in combinations with vertical ones simulating the hydroisostasy contribution.

The strains on the fault plane obtained resulting from the numerical simulation (Fig. 8 a, b), which, in fact, are the amplitude of displacements along the fault, differ markedly. If the displacements on the fault under horizontal impacts (Fig. 8 a) in a certain place are several centimeters, then in the case of a combined impact (Fig. 8 b) the displacement amplitude reaches several meters.

Seismotectonic activity, in turn, affects the vertical movements in the coastal zone, as it has happened, for example, during the 2007 Nevelsk earthquake [39], through bending of the deformable elastic Earth's crust during seismic events. The strains that cause displacements on the fault are not limited to the area immediately near the fault, but occur at a great distance, reaching the coastal zone. Such strains determine the evolution of the coastal zone relief, within which the main economic infrastructures are usually located.

Estimates of the stress field by the Lode–Nadai coefficient for Sakhalin, performed by the results of the analysis of modern earthquakes [13, 14, 30], illustrate the «instant», in



**Fig. 8.** View of the model sections showing vertical displacements (displacement Z) including on the fault plane, as a result of 20 ka of horizontal impacts (a); combined horizontal and vertical impacts (b). The location of the cross-section planes is shown with the red lines in Fig. 6 d. Arrow 1 points to the fault plane, arrow 2 points to the Moho discontinuity.

the geological sense, geodynamic setting in the Earth's crust. This allows us to assess the nature of the geodynamic setting at the moment. It is possible to obtain a whole range of changes in the stress field over time, when calculating the coefficient according to the simulation results. In our case, we obtained the spatial distribution of the coefficient values every 1 ka over 40 ka under various dynamic conditions – horizontal compression, horizontal compression in combination with vertical one. This makes it possible to compare the stress state fields depending on the influence of external factors, for example, changes in the level of the World Ocean when the change of glacial periods with interglacial ones, and to evaluate the influence of these factors on the stress field distribution. Figures 6 and 7 clearly demonstrate the difference in the distribution and dynamics of the stress field depending on the combination of the impact of external factors on the block of the Earth's crust and the mantle layer of the study area.

The values of  $\sigma_1$ , the largest of the principal stresses vary in the range from several tens to several thousand MPa, which does not contradict the values obtained in the southern part of the Central Sakhalin fault (CSF) in [25], although a more detailed model with lower rheological parameters was used for the southern part of the CSF. Such convergence of independent results testifies to a good similarity of the models to real conditions.

The Lode–Nadai coefficient illustrates the change in the geodynamic setting when the di-

rection of impact from external factors changes. The rearrangement of the stress field occurs when changing the direction of vertical impacts simulating the hydroisostasy.

The metastable state of the fault, when “the very moment of the dynamic disruption is largely random and can be determined by external relative to the focal zone, sometimes quite weak impacts... The sources of such short- and medium-term local fluctuations of the stress state can be strain processes in neighboring areas, earthquake impacts, tides and ocean loading, magmatic intrusions, anthropogenic activity in the form of reservoir filling, mining, injection and pumping of fluids, large explosions, as well as seasonal factors such as snow loading, changing reservoir levels, etc.” [38, p. 260]. In this sense, the hydroisostasy resulting from a change in the ocean level by 100–120 m over 20 ka is no longer a “weak”, but rather a “strong” impact in the role of trigger seismic events. The results of calculation of the Lode–Nadai coefficient (Figures 6 and 7) clearly demonstrate a sharp change in the geodynamic setting when simulating the hydroisostasy effect, which can lead to the dynamic disruption along the fault.

Unfortunately, it has not been possible to apply in this work the description of the mantle layers in the form of viscoelastic material, which would allow taking into account the time delays in relaxation after the removal of vertical compressive strains. But the representation of the upper mantle layer as elastic material made it pos-

sible to determine the trends in the distribution of the stress-strain state in the Earth's crust.

At present, there is no consensus among researchers on the location of the interplate boundary between the Amur and Sea of Okhotsk plates in the southern part of Sakhalin, hence, a compromise position of the fault zone was taken in the model, in a configuration, as it were, between two positions.

## Conclusion

Numerical simulation carried out for morphological and rheological settings similar to those of Sakhalin showed the following differences between the simulated settings of horizontal compression and the combination of horizontal compression with time-varying vertical impacts:

- displacement amplitudes are noticeably different for two simulated cases;
- stress fields differ in amplitude under horizontal compression and combination of horizontal and vertical compression, but remain invariant during the period of setting of compression;
- changes in the direction of the vertical impact on retention of the horizontal one lead to changes in the dynamic setting;
- differences in deformations on the wings of the fault zone, as well as on the fault plane itself, are analogues of the average displacement rates along the fault (slip rate) accepted in palaeoseismology and expect a difference in seismic activity on the fault under these two conditions;
- The dynamic disruption is assumed for the metastable state of the fault when the stress field changes. Since, a change in the stress state was clearly obtained as a result of the performed simulation, the role of the trigger of the dynamic disruptions on the faults cannot be excluded for vertical displacements due to the hydroisostasy.

## References

1. Shepard F.P. **1969**. *Marine geology*. Leningrad: Nedra, 462 p.
2. Fairbridge R. **1961**. Eustatic changes in sea level. *Physics and Chemistry of the Earth*, 4: 99–185. [https://doi.org/10.1016/0079-1946\(61\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0079-1946(61)90004-0)
3. Clark J., Farrell W., Peltier W. **1978**. Global changes in postglacial sea level: Numerical calculations. *Quaternary Research*, 9(3): 265–287 [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(78\)90033-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(78)90033-9)
4. Lambeck K., Purcell A., Johnston P., Nakada M., Yokoyama Y. **2003**. Water-load definition in the glacio-hydro-isostatic sea-level equation. *Quaternary Science Reviews*, 22(2–4): 309–318. [https://doi.org/10.1016/s0277-3791\(02\)00142-7](https://doi.org/10.1016/s0277-3791(02)00142-7)
5. Bulgakov R.F., Senachin V.N. **2019**. Marine terraces and hydroisostasy influence on the vertical movements of the Sakhalin. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(3): 277–286. (In Russ.). [doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.277-286](https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.277-286)
6. Zverev A.T. **2020**. Eustatic fluctuations in World Ocean level. *Geodesy and Aerophotosurveying*, 64(2): 157–163. (In Russ.). <https://doi.org/10.30533/0536-101x-2020-64-2-157-163>
7. Yokoyama Y., Purcell A. **2021**. On the geophysical processes impacting palaeo-sea-level observations. *Geoscience Letters*, 8(13). <https://doi.org/10.1186/s40562-021-00184-w>
8. Roy K., Peltier W.R. **2015**. Glacial isostatic adjustment, relative sea level history and mantle viscosity: reconciling relative sea level model predictions for the U.S. East coast with geological constraints. *Geophysical J. International*, 201(2): 1156–1181. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv066>
9. Bulgakov R.F., Ivashchenko A.I., Kim Ch.U., Sergeev K.F., Strel'tsov M.I., Kozhurin A.I., Besstrashnov V.M., Strom A.L., Suzuki Y., Tsutsumi H., Watanabe M., Ueki T., Shimamoto T., Okumura K., Goto H., Kariya Y. **2002**. [Active faults of Sakhalin]. *Geotektonika*, 36(3): 227–246. (In Russ.).
10. Stepashko A.A. **2010**. Deep roots of seismotectonics in the Far East: the Sakhalin zone. *Russian J. of Pacific Geology*, 4(3): 228–241. (In Russ.).
11. Kozhurin A.I. **2013**. [Active geodynamics of the northwest sector of the Pacific tectonic belt (according to the active fault studies)]: [extended abstract of dissertation ... Dr. Sci. (Geol. and Miner.)]. Moscow, Institut fiziki Zemli im. O.Yu. Shmidta RAN. (In Russ.).
12. Nicholson U., VanLaningham S., Macdonald D.I.M. **2013**. Quaternary landscape evolution over a strike-slip plate boundary: Drainage network response to incipient orogenesis in Sakhalin, Russian Far East. *Geosphere*, 9(3): 588–601. <https://doi.org/10.1130/ges00883.1>
13. Tataurova A.A. **2015**. Stress and strain fields based on data on crustal earthquake mechanisms in Sakhalin Island. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 3(27): 93–101. (In Russ.).
14. Sim L.A., Bogomolov L.M., Bryantseva G.V., Savvichev P.A. **2017**. Neotectonics and tectonic stresses of the Sakhalin Island. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(1): 181–202. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237>
15. Heidbach O., Rajabi M., Fuchs K., Müller B. **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>
16. Suzuki Y., Tsutsumi H., Watanabe M., Ueki T., Okumura K., Goto H., Strel'tsov M.I., Kozhurin A.I., Bulgakov R.F., Terentief N., Ivashchenko A.I. **2000**. Geology and geomorphology of the Sakhalin Island: Preliminary report on active faults in Sakhalin, Russia. *J. of Geography (Chigaku Zasshi)*, 109(2): 311–317. [https://doi.org/10.5026/jgeography.109.2\\_311](https://doi.org/10.5026/jgeography.109.2_311)
17. Senachin V.N., Veselov O.V., Semakin V.P., Kochergin E.V. **2013**. [Digital model of the Earth's crust of the Sea of Okhotsk region]. *Geoinformatika*, 4: 33–44. (In Russ.).
18. Reynolds S.D., Coblenz D.D., Hillis R.R. **2002**. Tectonic forces controlling the regional intraplate stress field in continental Australia: Results from new finite element mode-

- ling. *J. of Geophysical Research*, 107(B7). <https://doi.org/10.1029/2001jb000408>
19. Zhao S., Müller R.D. **2003**. Three-dimensional finite-element modelling of the tectonic stress field in continental Australia. In: *Evolution and Dynamics of the Australian Plate*, p. 71–89. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2372-8.71>
  20. Dziewonski A.M., Anderson D.L. **1981**. Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25(4): 297–356. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7)
  21. Zharkov V.N. **2013**. [Interior structure of the Earth and planets: elementary introduction to planetary and satellite geophysics]. Moscow: Nauka i obrazovanie, 414 p. (In Russ.).
  22. Sakulina T.S., Kalenich A.P., Atakov A.I., Tikhonova I.M., Krupnova N.A., Pyzh'yanova T.M. **2011**. [Geological model of the Sea of Okhotsk region according to the data of 1-OM and 2-DV profiles]. *Razvedka i okhrana nedr*, 10: 11–17. (In Russ.).
  23. Suvorov A.I. **1968**. Deep faults of the Earth. *Priroda = Nature*, 9: 30–41.
  24. Ivogla E.G., Manilov Yu.F. **2019**. Structure of the lithosphere in the zone of the continent–ocean transition in the southern part of the Russian Far East: Evidence from the density modeling. *Russian J. of Pacific Geology*, 13(6): 493–509. <https://doi.org/10.1134/s1819714019060034>
  25. Kamenev P.A., Zabolotin A.E., Degtyarev V.A., Zherdeva O.A. **2019**. Geomechanical model of South Sakhalin active fault. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(3): 287–295. (In Russ.). [doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.287-295](https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.287-295)
  26. Prytkov A.S., Vasilenko N.F. **2016**. Geodinamika Severnogo Sakhalina posle Neftegorskogo zemletreseniya 1995 g. Mw=7.1 po dannym GPS nablyudeniya [Geodynamics of the North Sakhalin after the 1995 Mw=7.1 Neftegorsk earthquake according to the GPS observation data]. *Monitoring. Nauka i tekhnika*, 3(28): 9–12. (In Russ.).
  27. Prytkov A.S., Vasilenko N.F. **2018**. Earth surface deformation of the Sakhalin Island from GPS data. *Geodynamics & Tectonophysics*, 9(2): 503–514. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0358>
  28. Korotkiy A.M., Pushkar V.S., Grebennikova T.A. **1997**. [Marine terraces and quaternary history of the Sakhalin shelf]. Vladivostok: Dal'nauka, 229 p. (In Russ.).
  29. Bulgakov R.F. **2021**. 3D modeling of the hydroisostasy effect with a configuration of Moho surface of the Sea of Okhotsk close to real. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 5(4): 339–345. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.4.339-345>
  30. Polets Y. **2019**. The stress state of the Sakhalin Island and adjacent territories. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 324(1): 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012010>
  31. Tsukuda T. **1985**. Long-term seismic activity and present microseismicity on active faults in Southwest Japan. In: Kisslinger C., Rikitake T. (eds) *Practical approaches to earthquake prediction and warning*. Dordrecht: Springer, ch. 3: 253–284. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-2738-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-017-2738-9_4)
  32. Okada A., Takemura K., Katon S. **1998**. Characteristics of the Nojima fault, a major surface rupture associated with the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, in the northern part of Awaji Island, Western Japan. *Humans and Nature*, 9: 33–56. [https://doi.org/10.24713/hitotoshizen.9.0\\_33](https://doi.org/10.24713/hitotoshizen.9.0_33)
  33. Kozhurin A.I., Ponomareva V.V., Pinegina T.K. **2008**. Active fault tectonics of the south of Central Kamchatka. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 2: 10–27. (In Russ.).
  34. Tsutsumi H., Suzuki Y., Kozhurin A.I., Strel'tsov M.I., Ueki T., Goto H., Okumura K., Bulgakov R.F., Kitagawa H. **2005**. Late Quaternary faulting along the western margin of the Poronaysk Lowland in Central Sakhalin, Russia. *Tectonophysics*, 407: 257–268.
  35. McCalpin J.P. (ed.) **1996**. *Paleoseismology*. 1<sup>st</sup> ed. USA, Academic Press. (International Geophysics Series; 62). 2nd ed. **2009**. URL: [https://www.irms.cas.cz/ext/ethiopia/materials/papers/tectonic\\_geomorphology/Paleoseismology\\_McCalpin.pdf](https://www.irms.cas.cz/ext/ethiopia/materials/papers/tectonic_geomorphology/Paleoseismology_McCalpin.pdf)
  36. Anderson J.G., Wesnousky S.G., Stirling M.W. **1996**. Earthquake size as a function of fault slip rate. *Bull. of the Seismological Society of America*, 86(3): 683–690.
  37. Kasahara K. **1985**. *Earthquake mechanics*. Moscow: Mir, 264 p.
  38. Kocharyan G.G. **2016**. *Geomechanics of faults*. Moscow: GEOS, 424 p. (In Russ.).
  39. Lomtev V.L., Gurinov M.G. **2009**. The tectonic conditions of the August 2, 2007, M ~6.1 Nevelsk earthquake. *Russian J. of Pacific Geology*, 3(5): 450–459.

## Об авторе

**Булгаков Рустам 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](mailto:r.bulgakov@imgg.ru)

## About Author

**Bulgakov, Rustam F.** (<https://orcid.org/0000-0001-9095-3785>), Cand. of 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](mailto:r.bulgakov@imgg.ru)

Поступила в редакцию 22.08.2022  
После рецензирования 18.10.2022  
Принята к публикации 28.10.2022

Received 22 August 2022  
Revised 18 October 2022  
Accepted 28 October 2022

© Авторы 2022 г. Открытый доступ.  
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2022. Open access.  
Content is available under Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)

## МОНИТОРИНГ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 551.21

<https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.328-338>  
<https://www.elibrary.ru/qvwlny>

# Эксплозивная активность вулкана Чикурачки в январе–октябре 2022 г. (о. Парамушир, Северные Курильские острова)

А. В. Дегтерев\*, М. В. Чибисова

\*E-mail: [d\\_a88@mail.ru](mailto:d_a88@mail.ru)

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

**Реферат.** Вулкан Чикурачки, расположенный в юго-западной части о. Парамушир (Северные Курильские острова) 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 8 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 (15 октября 2022 г.) достигала 790 км, а площадь 25 408 км<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** Северные Курильские острова, вулкан, Чикурачки, Парамушир, вулканический пепел, извержение, спутниковые данные

# The explosive activity of Chikurachki volcano in January–October 2022 (Paramushir Island, Northern Kuriles)

Artem V. Degterev\*, Marina V. Chibisova

\*E-mail: [d\\_a88@mail.ru](mailto:d_a88@mail.ru)

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

**Abstract.** Chikurachki volcano located in the southern part of Paramushir Island (Northern Kuriles) was in a state of increased activity from January to October 2022. According to satellite data and the results of visual observations, at least 5 episodes of explosive activity, lasting from 2 to 8 days: January 30 – February 03, June 23–24, June 30 – 01 July, August 21 – September 02, October 13–20 were recorded. All observed events were similar to previous volcanic eruptions in their nature and duration, among which weak and moderate vulcanian eruptions prevailed: both single emissions and series of explosions to a height of 2–5 km a.s.l., as well as periods of relatively calm ash and gas mixture emission of various intensity were observed. Ash plumes and clouds spread mainly in the east, south, southeast, northeast and southwest directions, their length reached 790 km, and the area was 25 408 km<sup>2</sup> (15 October, 2022).

**Keywords:** Northern Kuril Islands, volcano, Chikurachki, Paramushir, eruption, volcanic ash, satellite data

**Для цитирования:** Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Эксплозивная активность вулкана Чикурачки в январе–октябре 2022 г. (о. Парамушир, Северные Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 4, с. 328–338. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.328-338>; <https://www.elibrary.ru/qvwlny>

**For citation:** Degterev A.V., Chibisova M.V. The explosive activity of Chikurachki volcano in January–October 2022 (Paramushir Island, Northern Kuriles). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 4, pp. 328–338. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.328-338>; <https://www.elibrary.ru/qvwlny>

## Благодарности

Работа выполнена в соответствии с планом НИР лаборатории вулканологии и вулканопасности Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (№ 121030100168, рук. А.В. Дегтерев).

Авторы признательны Елене Константиновне Горанько и членам экипажа экспедиционного судна «Iron Lady», а также Сергею Захаровичу Смирнову (ИГМ СО РАН), Рафаэлю Владимировичу Жаркову (ИМГиГ ДВО РАН) за информацию о состоянии вулкана Чикурачки в 2022 г. Авторы выражают благодарность рецензентам за конструктивные замечания.

## Введение

Вулкан Чикурачки (абс. выс. 1816 м), являющийся одним из самых активных вулканов Курильской островной дуги, расположен в северной оконечности хр. Карпинского, трассирующего южную часть о. Парамушир (рис. 1). Его название в айнской топонимике переводится как «испачканное черным», «испачканное пеплом» [1], что соотносится с высокой активностью и внешним видом этого вулкана.

Первые сведения о геологическом строении вулкана были получены Г.С. Горшковым [2], который установил, что его постройка состоит из древнего лавового основания, предположительно, плейстоценового возраста и перекрывающего его молодого стратовулкана, сложенного преимущественно пирокластическим материалом. На вершине молодой постройки, имеющей вид правильного усеченного конуса, не расчлененного эрозией, расположен неглубокий, блюдцеобразный кратер диаметром ~480 м (рис. 1), открытый на юго-восток. Его полость заполнена лавой мощного извержения 1986 г., глыбовая поверхность которой покрыта многочисленными трещинами. В юго-западной части кратера находится колодцеобразная бокка [3] (рис. 1), являющаяся центром последних извержений влк. Чикурачки. Вещественный состав продуктов вулкана представлен преимущественно умеренно-калиевыми базальтами, существенно меньше распространены андезибазальты [3–6].

Его извержения, по данным летописных источников, известны с середины XIX в.: 1853–1859, 1958, 1961, 1964, 1973, 1986, 2002, 2003, 2005, 2007 (2 события), 2008, 2015, 2016 гг. [4, 6–13]. Среди них преобладали относительно слабые (VEI 1–2) вулканские и стромболианские извержения; дважды, в 1853 и 1986 гг., имели место мощные плинианские события – исклю-

## Acknowledgements

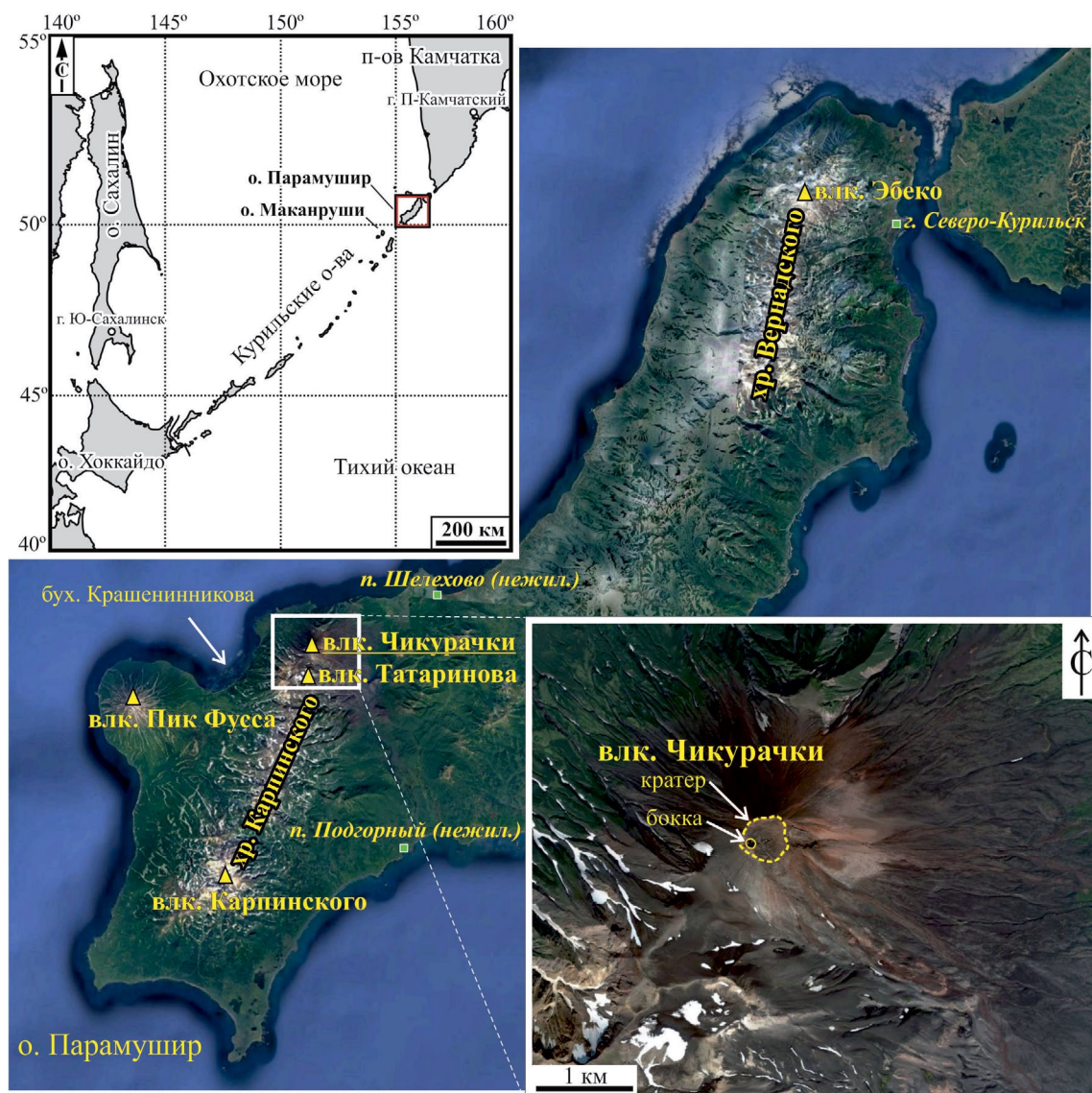
The work was carried out in accordance with the research plan of the Laboratory of volcanology and volcanic hazard of the Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (No. 121030100168 – supervisor A.V. Degterev).

The Authors are grateful to Elena Goranko and the crew members of the «Iron Lady» expeditionary vessel, as well as to Sergey Smirnov (IGM SB RAS), Rafael Zharkov (IMGG FEB RAS) for providing information about activity of Chikurachki volcano in 2022. Authors thank the Reviewers for the constructive comments.

чительно редкое явление для вулкана, продуцирующего главным образом магмы базальтового состава [3]. Высота эруптивной колонны во время этих извержений составляла 13–14 км, а мощность (толщина) тефры на расстоянии 7 км от кратера достигала 1.2 м [3]. Эксплозивные извержения плинианского типа хотя сравнительно редки (по данным [3], интервал между ними составляет 100–200 лет), но характерны для современного этапа эруптивной истории влк. Чикурачки [3, 5], поэтому можно предполагать, что они возможны в будущем.

Ближайший населенный пункт – г. Северо-Курильск (2691 чел., 01.01.2021 г.) – находится в 60 км к северо-западу от влк. Чикурачки (рис. 1), поэтому риски для жителей и инфраструктуры города связаны лишь с пеплопадами плинианских извержений (при направлении ветра на восток), которые могут оказывать токсическое воздействие, нарушать работу систем водоснабжения, энергообеспечения, телекоммуникаций и пр. [14, 15]. Серьезной опасности при извержении подвергаются туристы, охотники, рыбаки прибрежного лова, посещающие окрестности вулкана или базирующиеся в непосредственной близости от него. Кроме того, эруптивные тучи, нагруженные вулканическим пеплом, несут опасность для авиатранспорта, осуществляющего перевозки вблизи о. Парамушир. Настоящая работа продолжает цикл публикаций в журнале, посвященных описанию текущей вулканической активности на Курильских островах.

В 2022 г. влк. Чикурачки находился в состоянии повышенной активности: после извержения вулкана в январе–феврале 2022 г. (см. нашу статью в первом номере этого журнала за 2022 г.) зафиксировано еще четыре аналогичных события, первые сведения о которых представлены в настоящем сообщении.



**Рис. 1.** Географическое положение влк. Чикурачки в системе Курильской островной дуги. Треугольниками отмечены действующие вулканы о. Парамушир. Использованы спутниковые снимки из ГИС «Google Earth».

**Fig. 1.** Geographical position of Chikurachki volcano (Paramushir Island) in the system of the Kuril island arc. Active volcanoes are marked with triangles. Satellite images from the GIS «Google Earth» were used.

Из-за удаленности и труднодоступности вулкана, отсутствия наземных пунктов контроля вулканической деятельности (сейсмостанций, наклономеров, ip-видеокамер и т.д.) наблюдение за его активностью осуществлялось на основе данных дистанционного зондирования: нами использовались космические снимки среднего и низкого разрешения NOAA-18/19 (AVHRR/POES), Terra и Aqua (MODIS), SuomiNPP и JPSS-1 (VIIRS) и Himawari-8 по разности инфракрасных каналов 10–12 мкм (4–5 каналы AVHRR, 31–32 каналы MODIS, 14–15 каналы Himawari-8,

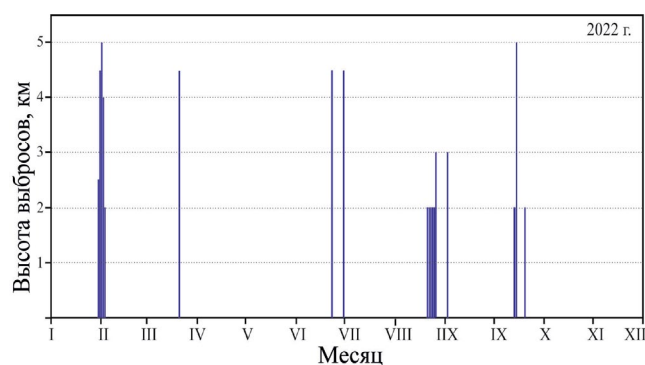
VIIRS), обрабатываемые информационными системами «BEGA-Science» [16] и «Дистанционный мониторинг вулканов Камчатки и Курил» VolSatView [17, 18]. Кроме того, привлекались сведения, предоставленные очевидцами, включающие фото- и видеоматериалы, описательные данные. В работе использованы данные по активности влк. Чикурачки, полученные VAAC (Volcanic Ash Advisory Center) Токио, KVERT (Kamchatka Volcanic Eruption Response Team), а также авторские материалы SVERT (Sakhalin Volcanic Eruption Response Team).

## Результаты наблюдений

В 2022 г. с влк. Чикурачки было связано 5 эпизодов эксплозивной активности продолжительностью от 2 до 8 дней, каждый из которых состоял из серии пепловых выбросов вулканского типа на высоту 2–5 км н.у.м. (рис. 2). Кроме того, имели место и более мелкие события (до 2 км н.у.м.), они регулярно фиксируются по данным сервиса NOAA/CIMSS Volcanic Cloud Monitoring (<https://volcano.ssec.wisc.edu/>): с октября по середину ноября было зафиксировано порядка шести таких выбросов. На используемых нами спутниковых снимках эти события диагностированы не были из-за их небольшой высоты, отсутствия или слабой концентрации пепла; результатов визуальных наблюдений, сделанных очевидцами, найти не удалось. По этой причине их описание в настоящем сообщении мы не приводим.

**30 января – 3 февраля 2022 г.** Первый эпизод активности влк. Чикурачки, произошедший в январе 2022 г., описан в упомянутой выше публикации авторов в журнале, поэтому в рамках настоящего сообщения приведем его краткие характеристики.

Первые сведения об активизации влк. Чикурачки в январе 2022 г. поступили от очевидцев и были опубликованы в СМИ (<https://www.sakhalin.kp.ru/online/news/4602438/>).



**Рис. 2.** Хронология эксплозивной активности влк. Чикурачки в 2022 г. (показано распределение выбросов и их высоты), по данным VAAC Токио [[https://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/vaac\\_list.html](https://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/vaac_list.html)], KVERT [<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>], SVERT [<http://www.imgg.ru/ru/svert/reports>].

**Fig. 2.** Chronology of the explosive activity of Chikurachki volcano in 2022 (distribution of emissions and their heights are shown), according to VAAC Tokyo [[https://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/vaac\\_list.html](https://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/vaac_list.html)], KVERT [<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>], SVERT [<http://www.imgg.ru/ru/svert/reports>].

Официальное сообщение о начале извержения влк. Чикурачки опубликовано группой KVERT: 31 января 2022 г. в 01:00 UTC (здесь и далее приводится время по UTC, Coordinated Universal Time – всемирное координированное время) была зарегистрирована интенсивная парогазовая активность вулкана и позже выявлен шлейф с примесью пепла (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2022-10>). Всего в период с 30 января по 3 февраля 2022 г. на влк. Чикурачки зафиксировано 8 парогазовых и пепловых выбросов на высоту 2.5–5 км н.у.м. (рис. 2), 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 (здесь и далее используется аэронавигационное обозначение направления ветра). Максимальная площадь пеплового шлейфа отмечена 2 февраля – 9460 км<sup>2</sup>. Зонай интенсивного пеплопада на о. Парамушир стал сектор к юго-юго-востоку от вулкана площадью ~310 км<sup>2</sup>. Значительных пеплопадов на территории г. Северо-Курильск не наблюдалось.

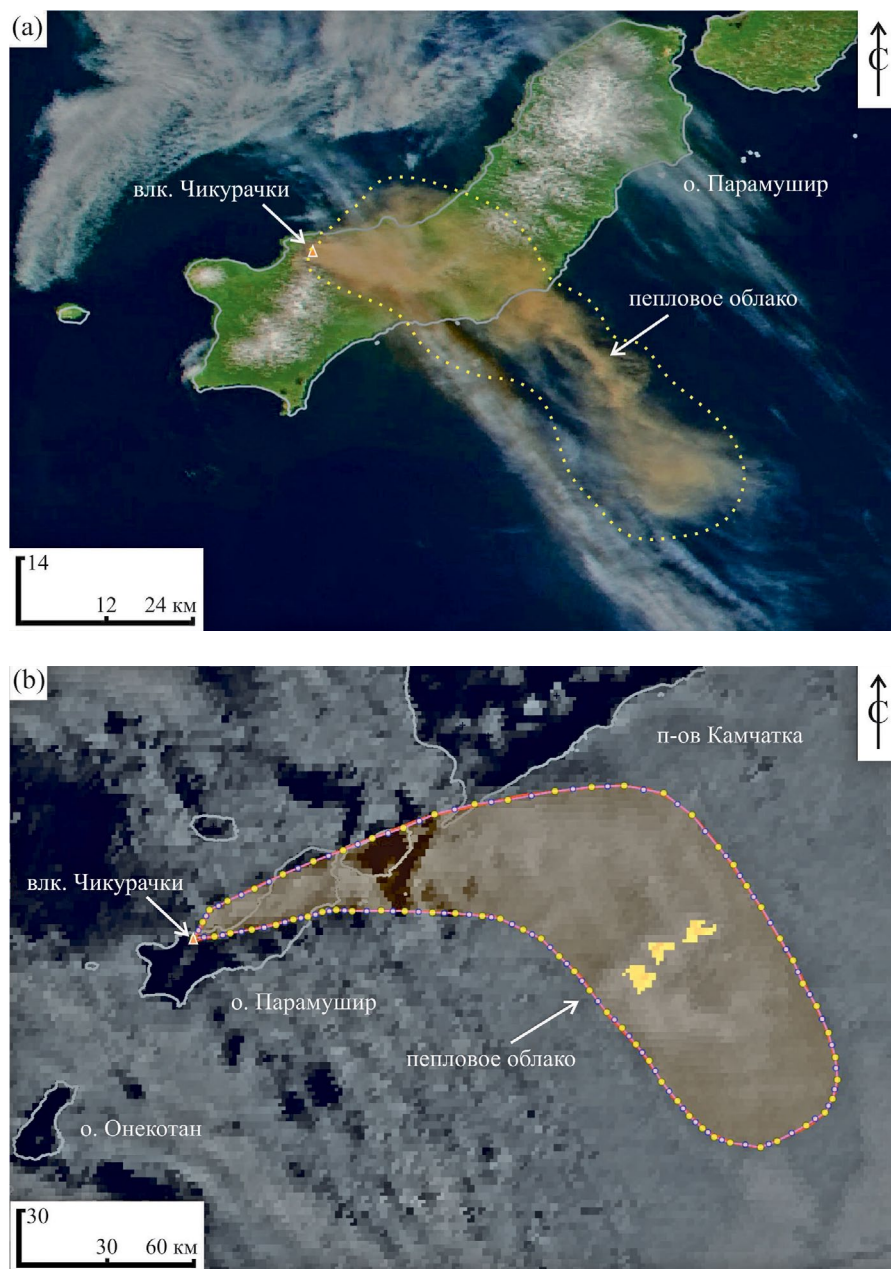
**23–24 июня 2022 г.** Днем 21 июня, за три дня до начала очередного извержения, сотрудники Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (г. Новосибирск), проводившие геофизические работы в центральной части хр. Вернадского (рис. 1), отмечали парогазовую активность влк. Чикурачки – спокойное выделение парогазовой смеси из вершинного кратера на относительно небольшую высоту. 23 июня в 20:00 UTC VAAC Токио по спутниковым данным зафиксировал начало следующего эксплозивного извержения влк. Чикурачки: на снимках Himawari-8 был идентифицирован пепловый выброс на высоту 4–4.5 км н.у.м., после чего началось интенсивное выделение пепло-газовой смеси без дискретных выбросов. К 22:00 UTC сформировался пепловый шлейф протяженностью 48 км и площадью 386 км<sup>2</sup>, тянувшийся в юго-восточном направлении. Примерно через два часа, в ~00:00

UTC (рис. 3 а), поступающий из жерла пепловый материал начал менять направление, распространяясь сначала на восток, а позже на восток-северо-восток. При этом ранее сформировавшаяся часть эруптивного шлейфа продолжала перемещаться на юго-восток прибли-

зительно до 03:00 UTC следующего дня, после чего эруптивное облако мигрировало в основном в восточном направлении. Максимальная площадь пеплового облака по состоянию на 07:10 UTC 24 июня составляла 16 638 км<sup>2</sup> (по данным Himawari-8), средняя скорость его перемещения оценивалась в 34–37 км/ч (рис. 3 б).

Примерно в это же время активность влк. Чикурачки наблюдали работники, находившиеся в районе бывших поселков Шелихово и Подгорный, а также новосибирские геологи с вершины влк. Эбеко (рис. 1), расположенного в 54 км к северо-востоку. На сделанных ими фотоснимках запечатлена слабая эксплозивная деятельность, проявлявшаяся в относительно спокойном поступлении пепло-газовой смеси на высоту ~1 км над кратером (рис. 4). По спутниковым данным поступление материала отслеживалось до 09:20 UTC 24 июня, после чего фиксировалось продвижение ранее сформированного эруптивного облака до 750 км в юго-восточном направлении.

**30 июня – 1 июля 2022 г.** После шестидневного перерыва, в течение которого отмечалась интенсивная парогазовая активность, влк. Чикурачки возобновил эксплозивную активность: 30 июня в 01:00 UTC произошел одиночный пепловый выброс умеренной силы на высоту 4–4.5 км н.у.м., зарегистрированный ВААС Токио по спутниковым данным Himawari-8.



**Рис. 3.** Пепловые облака влк. Чикурачки на спутниковых снимках: (а) 00:12 UTC, 24.06.2022, Terra MODIS, каналы 1–2, (б) 07:10 UTC, 24.06.2022, Himawari-8, каналы 14–15. Желтому цвету соответствуют участки максимальной концентрации пепловых частиц. Использованы данные информационных сервисов «VolSatView» и «ВЕГА-Science».

**Fig. 3.** Ash clouds of Chikurachki volcano on satellite images: (a) 00:12 UTC, 06.24.2022, Terra MODIS, channels 1-2, (b) 07:10 UTC, 06.24.2022, Himawari-8, channels 14-15. The yellow color corresponds to the areas of maximum concentration of ash particles. The data of information services «VolSatView» and «VEGA-Science» were used.

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>). Никаких признаков активности в последующие дни июля замечено не было.

В начале августа 2022 г. в районе хр. Карпинского (рис. 1), в юго-западной части о. Парамушир, проходила работа российско-белорусской научно-исследовательской экспедиции, в которой принимали участие сотрудники Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск), выполнившие визуальные наблюдения за активностью влк. Чикурачки и предоставившие нам сведения. 2 августа ими отмечена спокойная парогазовая эмиссия – поднимающийся из бокки белый столб достигал высоты ~300 м над кромкой кратера. 5 августа участники экспедиции находились на побережье бухты Крашенинникова, откуда периодически, при отсутствии облачности, им открывался вид на вершину влк. Чикурачки. Они отметили, что характер активности вулкана поменялся, вынос из кратера приобрел коричневатый-серый оттенок, свидетельствующий о поступлении пепла. Высота подъема пепло-газового шлейфа составляла 250–300 м. Судя по всему, подобные незначительные активизации вулкана, сопровождаемые поступлением пепла, происходили в 2022 г. регулярно.

21 августа – 2 сентября 2022 г. Сведения о начале этого эпизода активности влк. Чикурачки получены от экипажа экспедиционного судна (яхты) «Iron Lady», выполнявшего научно-исследовательские работы по изучению морских млекопитающих на Северных Курилах в августе 2022 г. 21 августа яхта проходила вдоль охотоморского побережья о. Парамушир,



**Рис. 4.** Эксплозивная активность влк. Чикурачки 24 июня 2022 г., 16:56 по камчатскому времени (04:56 UTC), вид с северо-востока (снимок сделан с вершины влк. Эбеко). Фото С.З. Смирнова

**Fig. 4.** Explosive activity of Chikurachki volcano 04:56 UTC, June 24, 2022 (Kamchatka time 16:56, June 24), view from the northeast (the image was taken from the top of Ebeko volcano). Photo by S.Z. Smirnov

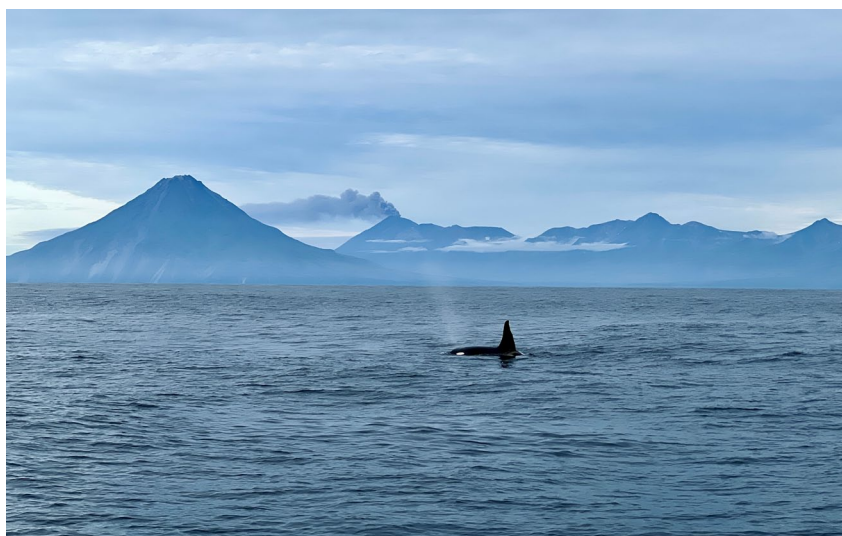
следуя в юго-западном направлении к о. Маканруши. В период между 16:30 и 18:00 ч по камчатскому времени (4:30–6:00 UTC), когда яхта находилась примерно на траверзе влк. Чикурачки, члены экипажа слышали негромкий хлопок, после чего увидели клубы пепла над вулканом – небольшой пепловый выброс, за которым последовала слабая вулканская активность. Пепло-газовый шлейф имел серый цвет и поднимался на относительно небольшую высоту (~200–250 м над кратером), в воздухе ощущался слабый сернистый запах. В последующие дни, 22–25 августа, эксплозивная деятельность влк. Чикурачки, 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 восточном направлении от вулкана). Кроме того, в течение 25–26 августа в районе кратера отмечались термальные аномалии.

26 августа на протяжении всего дня члены экипажа яхты «Iron Lady», выполнявшие плановые работы на о. Маканруши, расположенном в 90 км к юго-западу от влк. Чику-

рачки, наблюдали «дымящий» вулкан: происходило непрерывное, без заметных признаков усиления или появления более сильных выбросов, выделение пеплового материала на высоту порядка 300 м над кратером. Пепел образовывал шлейф, распространявшийся в южном направлении (рис. 5). В ночь с 26 на 27 августа экипажем яхты, стоявшей в районе бухты Крашенинникова, в 10 км к западу от кратера влк. Чикурачки, каких-либо призна-

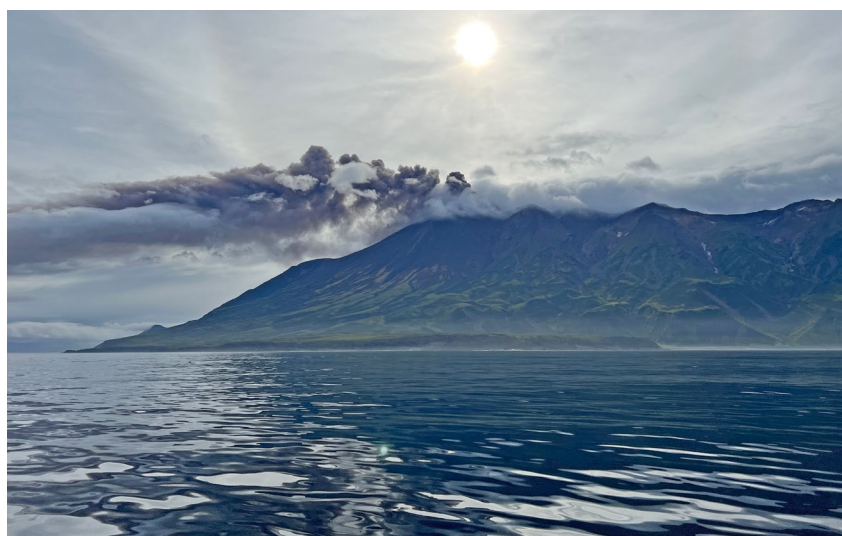
ков его активности (свечение, шум) замечено не было.

На следующий день, 27 августа, при прохождении судна вдоль охотоморской стороны Парамушира члены экипажа попутно вновь наблюдали за работающим вулканом. Эксплозивная деятельность характеризовалась интенсивным выделением пепла, клубящегося над кратером и образующего протяженный шлейф (рис. 6). Его цвет, по словам очевидцев,



**Рис. 5.** Эксплозивная активность влк. Чикурачки 26 августа 2022 г., 17:49 по камчатскому времени (05:49 UTC). Фото Е.К. Горанько

**Fig. 5.** Explosive activity of Chikurachki volcano 05:49 UTC, August 26, 2022 (Kamchatka time 17:49, August 26). Photo by E.K. Goranko



**Рис. 6.** Эксплозивная активность влк. Чикурачки 27 августа 2022 г., 08:42 по камчатскому времени (20:42 UTC, 26 августа). Фото Е.К. Горанько

**Fig. 6.** Explosive activity of Chikurachki volcano 20:42 UTC, August 26, 2022 (Kamchatka time 08:42, August 27). Photo by E.K. Goranko

заметно изменился – с преимущественно серого (21, 26 августа) до коричнево-серого (днем 27 августа). Во время перехода яхта попала под пеплопад, палуба и все судовые надстройки, имеющие горизонтальные поверхности, были засыпаны тонким коричневатого-серым пеплом (максимальный размер частиц – 1.5–2.5 мм). Все это время в воздухе ощущался сернистый запах. За несколько часов наблюдений расход выносимой пепло-газовой смеси заметно не изменялся, отдельные взрывы не отмечались. В последующие дни по спутниковым данным никаких признаков активности не регистрировалось.

2 сентября в 04:30 UTC на спутниковых снимках Himawari-8 диагностирован пепловый выброс на высоту 3 км н.у.м., 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.

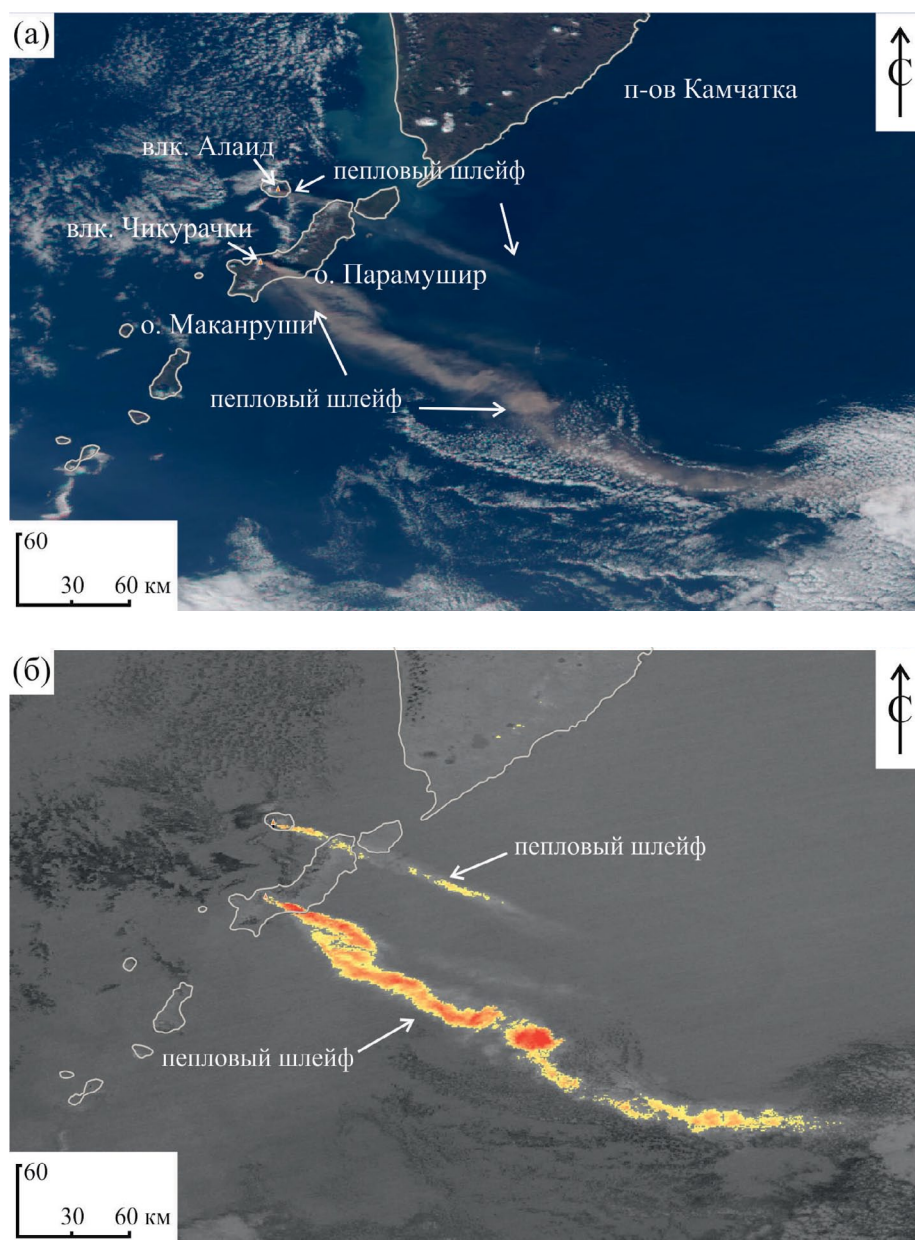
13–20 октября 2022 г. Последнее, по состоянию на конец октября 2022 г., извержение влк. Чикурачки началось 13 октября в 15:58 UTC: по данным SVERT, на спутниковых снимках Aqua MODIS был

идентифицирован слабый пепловый выброс на высоту ~2 км н.у.м. Связанный с ним пепловый шлейф распространялся на 10 км в восток-юго-восточном направлении. На следующий день, 14 октября, по спутниковой информации Suomi NPP (VIIRS) зафиксирована эксплозия аналогичной силы: в 15:40 UTC наблюдался выброс на высоту ~2 км н.у.м., удаление пеплового шлейфа, перемещавшегося в восток-северо-восточном направлении, составило 10–15 км. 15 октября эксплозивная активность влк. Чикурачки усилилась (данные Himawari-8): в 10:50 UTC отмечен 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, произошел следующий, более сильный взрыв с выбросом пепла на высоту 4.5–5 км, после чего началась фаза интенсивной эксплозивной активности с непрерывным поступлением пеплового материала на высоту ~5 км н.у.м. По снимкам Himawari-8, выполненным в инфракрасном диапазоне, в районе вулкана отмечалась термальная аномалия.

В таком режиме вулкан проработал более суток.

Пепловый шлейф перемещался на восток-юго-восток, а затем изменил направление и начал распространяться в юго-восточном направлении (~790 км от вулкана). По состоянию на 08:03 UTC (NOAA-19) общая площадь пеплового облака составляла 25 408 км<sup>2</sup>. Поступление материала фиксировалось пример-

но до 15:30 UTC 16 октября, также отмечалась слабая термальная аномалия. В это же время, синхронно с влк. Чикурачки, извергался влк. Алаид (о. Атласова), расположенный в 50 км севернее. На спутниковом снимке Himawari-8 от 16.10.2022, 01:50 UTC отчетливо видны их пепловые шлейфы, протягивающиеся параллельно друг другу (рис. 7).



**Рис. 7.** Эруптивные шлейфы вулканов Чикурачки (о. Парамушир) и Алаид (о. Атласова) в 01:50 UTC, 16.10.2022 на спутниковых снимках Suomi NPP (VIIRS): (а) разница каналов 14–15 мкм, (б) видимый диапазон. Использованы данные информационного сервиса «VEGA-Science».

**Fig. 7.** Eruption plumes of Chikurachki (Paramushir Island) and Alaid (Atlasov Island) volcanoes at 01:50 UTC, October 16, 2022 on Suomi NPP (VIIRS) satellite images: (a) channel difference 14–15 μm, (b) visible range. The data of the “VEGA-Science” information service were used.

20 октября в 17:10 и 23:00 UTC зарегистрировано два последних слабых парогазовых выброса с примесью пепла на высоту до 2 км н.у.м. Шлейфы от них протягивались на 30 км в северо-восточном направлении. В последующие дни на вулкане отмечалась умеренная парогазовая активность.

### Заключение

По спутниковым данным, дополненным результатами визуальных наблюдений, на влк. Чикурачки за период с января по октябрь 2022 г. было зафиксировано 5 эпизодов эксплозивной активности, продолжительность каждого из которых варьировала от 2 до 8 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 в 2008, 2015, 2016 гг. и большинству слабых и умеренных вулканских извержений влк. Чикурачки, происходивших в историческое время. Наблюдались как единичные выбросы, так и серии эксплозий на высоту 2–5 км н.у.м., а также периоды относительно спокойной 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 км<sup>2</sup> (15 октября 2022 г.).

Вулкан Чикурачки один из самых активных вулканов Курильской островной дуги. Характерные для него плинианские извержения делают мониторинг его активности важной задачей, так как пепловые облака представляют риск для авиации, населения и инфраструктуры острова. В настоящее время спутниковые данные в значительной мере покрывают основные потребности мониторинга, который с использованием возможностей информационных систем «ВЕГА-Science» и «VolSatView» стал более удобным и эффективным. В то же время ограничения, связанные с погодными условиями, разрешающей способностью снимков и невозможностью реализации прогнозных оценок, указывают на необходимость организации наземных геофи-

зических наблюдений с возможностью регистрации и передачи актуальной информации о состоянии вулкана. Не теряют своей актуальности и результаты визуальных наблюдений, выполненных случайными очевидцами. Их устные свидетельства, сопровождаемые фото- и видеоматериалами, содержат важные детали, позволяющие составить более полную картину извержения и дополнить данные, полученные методами дистанционного зондирования.

### Список литературы

1. Акулов А.Ю. Айнская топонимика Северных Курил. **2022.** *Вестник Сахалинского музея*, 1: 118–134.
2. Горшков Г.С. Вулканы острова Парамушир и их состояние летом 1953 г. **1954.** *Бюллетень вулканологических станций*, 22: 9–29.
3. Белоусов А.Б., Белоусова М.Г., Гришин С.Ю., Крестов П.В. **2003.** Исторические извержения вулкана Чикурачки (о. Парамушир, Курильские острова). *Вулканонология и сейсмология*, 3: 15–34. EDN: ONTZGR
4. Федорченко В.И., Шилов В.Н. **1963.** Извержение вулкана Чикурачки (о-в Парамушир) в 1961 г. *Бюллетень вулканологических станций*, 34: 36–43.
5. Hasegawa T., Nakagawa M., Yoshimoto M., Ishizuka Y., Hirose W., Seki S., Ponomareva V., Rybin A. **2011.** Tephrostratigraphy and petrological study of Chikurachki and Fuss volcanoes, western Paramushir Island, northern Kurile Islands: Evaluation of Holocene eruptive activity and temporal change of magma system. *Quaternary International*, 246(1-2): 278–297. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.06.047>
6. Горшков Г.С. **1967.** *Вулканизм Курильской островной дуги*. М.: Наука, 287 с.
7. Шилов В.Н., Воронова Л.Г. **1962.** Состояние действующих вулканов северной группы Курильских островов летом 1959 г. и некоторые сведения об извержении вулкана Чикурачки в мае 1958 г. *Тр. СахКНИИ*, 12: 114–126.
8. Овсянников А.А., Муравьев Я.Д. **1992.** Извержение вулкана Чикурачки в 1986 г. *Вулканонология и сейсмология*, 5/6: 3–20.
9. 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. Научи о Земле*, 1(11): 67–73.
10. Маневич А.Г., Гирина О.А., Мельников Д.В., Малик Н.А., Нуждаев А.А., Ушаков С.В., Демянчук Ю.В. **2010.** Активность вулканов Камчатки и о. Парамушир Северных Курил в 2008 г. В кн.: *Материалы конференции, посвящ. Дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 30–31 марта 2009 г.* Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 7–14.
11. Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуждаев А.А., Демянчук Ю.В. **2016.** Активность вулканов Камчатки и Северных Курил в 2015 г. и их опасность для авиации. В кн.: *Материалы XIX региональной науч. конф. «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящ. Дню вулканолога, 29–30 марта 2016 г.* Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, с. 35–45.

12. Гирина О.А., Маневич А.Г., Нухдаев А.А., Сорокин 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>
13. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В. **2017**. Активность вулканов Курильских островов в 2016 г. *Вестник КРАУНЦ. Научи о Земле*, 1(33): 83–88.
14. Horwell C.J., Baxter P.J. **2006**. The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation. *Bull. Volcanology*, 69: 1–24. <https://doi.org/10.1007/s00445-006-0052-y>
15. Wilson T., Stewart C., Sword-Daniels V., Leonard G., Johnston D.M., Cole J.W., Wardman J., Wilson G., Barnard S.T. **2012**. Volcanic ash impacts on critical infrastructure. *Physics and Chemistry of the Earth. A, B, C*, 45/46: 5–23. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.06.006>
16. Лупян Е.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Бартаев 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.
17. 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>
18. 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.
19. national, 246(1-2): 278–297. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.06.047>
6. Gorshkov G.S. **1967**. [Volcanism of the Kuril island arc]. Moscow: Nauka Publ., 287 p. (In Russ.).
7. Shilov V.N., Voronova L.G. **1962**. [State of the active volcanoes of northern group of the Kuril Islands in summer of 1959 and some information about Chikurachki volcano eruption in May, 1958]. *Trudy SakhKNII SO AN SSSR [Transactions of the Sakhalin Complex Scientific Research Institute SB AS of USSR]*, 12: 114–126. (In Russ.).
8. Ovsyannikov A.A., Murav'ev Ya.D. **1992**. 1986 Eruption of Chikurachki volcano. *J. of Volcanology and Seismology*, 5–6: 3–20. (In Russ.).
9. 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*, 1(11): 67–73. (In Russ.).
10. Manevich A.G., Girina O.A., Mel'nikov D.V., Malik N.A., Nuzhdaev A.A., Ushakov S.V., Demyanchuk Yu.V. **2010**. [Activity of the volcanoes of Kamchatka and Paramushir Island of Northern Kuriles in 2008]. In: *Materialy konf., posvyashch. Dnyu vulkanologa, Petropavlovsk-Kamchatskiy, 30–31 marta 2009 g [Proceedings of the Conference devoted to the Day of volcanologist, Petropavlovsk-Kamchatskiy, March 30–31, 2009]*. Petropavlovsk-Kamchatskiy: IVIS DVO RAN, p. 7–14.
11. Girina O.A., Manevich A.G., Mel'nikov D.V., Nuzhdaev A.A., Demyanchuk Yu.V. **2016**. [Activity of the volcanoes of Kamchatka and Northern Kuriles in 2015, and their threat to aviation]. In: *Materialy XIX regional'noy nauch. konf. «Vulkanizm i svyazannye s nim protsessy», posvyashch. Dnyu vulkanologa, 29–30 marta 2016 g. [Proceedings of the XIX Regional scientific conference devoted to the Day of volcanologist, March 29–30, 2016]*. Petropavlovsk-Kamchatskiy: IVIS DVO RAN, p. 35–45.
12. 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.).
13. Rybin A.V., Chibisova M.V., Degterev A.V. **2017**. Activity of the Kurile Islands volcanoes in 2016. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*, 1(33): 83–88.
14. Horwell C.J., Baxter P.J. **2006**. The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation. *Bull. Volcanology*, 69: 1–24. <https://doi.org/10.1007/s00445-006-0052-y>
15. Wilson T., Stewart C., Sword-Daniels V., Leonard G., Johnston D.M., Cole J.W., Wardman J., Wilson G., Barnard S.T. **2012**. Volcanic ash impacts on critical infrastructure. *Physics and Chemistry of the Earth. A, B, C*, 45/46: 5–23. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.06.006>
16. Loupian E.A., Bourtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efmov V.Yu., Kashnitskiy A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Suchugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A. **2015**. IKI Center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 12(5): 263–284. (In Russ.).

## References

1. Akulov A.Yu. **2022**. [The Ainu toponymics of Northern Kuriles]. *Vestnik Sahalinskogo muzeya*, 1: 118–134.
2. Gorshkov G.S. **1954**. [Volcanoes of Paramushir Island and their state in the summer of 1953]. *Byulleten' vulkanologicheskikh stantsiy [Bull. of Volcanological Stations]*, 22: 9–29. (In Russ.).
3. Belousov A.B., Belousova M.G., Grishin S.Yu., Krestov P.V. **2003**. Historical eruptions of Chikurachki volcano (Paramushir I., Kuriles). *J. of Volcanology and Seismology*, 3: 15–34. (In Russ.).
4. Fedorchenko V.I., Shilov V.N. **1963**. [Chikurachki volcano eruption (Paramushir Island) in 1961]. *Byulleten' vulkanologicheskikh stantsiy [Bull. of Volcanological Stations]*, 34: 36–43. (In Russ.).
5. Hasegawa T., Nakagawa M., Yoshimoto M., Ishizuka Y., Hirose W., Seki S., Ponomareva V., Rybin A. **2011**. Tephrostratigraphy and petrological study of Chikurachki and Fuss volcanoes, western Paramushir Island, northern Kurile Islands: Evaluation of Holocene eruptive activity and temporal change of magma system. *Quaternary Inter-*

17. 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 the volcanic activity in Kamchatka and on the Kuril Islands. *J. of Volcanology and Seismology*, 10(6): 382–394. <https://doi.org/10.1134/s074204631606004x>
18. 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.).

#### Об авторах

**Дегтерев Артем Владимирович** (<https://orcid.org/0000-0001-8291-2289>), кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, [d\\_a88@mail.ru](mailto:d_a88@mail.ru)

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

#### About Authors

**Degterev, Artem V.** (<https://orcid.org/0000-0001-8291-2289>), Cand. of Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, [d\\_a88@mail.ru](mailto: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](mailto:m.chibisova@imgg.ru)

Поступила в редакцию 15.11.2022

После рецензирования 23.11.2022

Принята к публикации 01.12.2022

Received 15 November 2022

Revised 23 November 2022

Accepted 1 December 2022

© Авторы 2022 г. Открытый доступ.  
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2022. Open access.  
Content is available under Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 581.82+581.522.5(571.645+571.66)

<https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.339-359>  
<https://www.elibrary.ru/urpxel>

## Кора ассимиляционных побегов кустарника спиреи Бовера (*Spiraea beauverdiana* S.K. Schneid.): структурные изменения в условиях вулканогенного стресса на южных Курильских островах и полуострове Камчатка

Е. О. Вацерионова\*, А.В. Копанина, И.И. Власова

\*E-mail: [katya.vatserionova.85@mail.ru](mailto:katya.vatserionova.85@mail.ru)

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

**Реферат.** В работе проведен анализ коры однолетних ассимиляционных побегов кустарника спиреи Бовера (*Spiraea beauverdiana* S.K. Schneid. сем. Rosaceae Juss.), произрастающей в стрессовых условиях вулканической и поствулканической активности на Курильских о-вах (Кунашир, Итуруп) и п-ове Камчатка. Сочетание негативных экологических факторов в условиях фумарольной, газогидротермальной активности и на пирокластических отложениях в вулканогенных ландшафтах вызывает нарушение в деятельности латеральных меристем стебля – феллогена и сосудистого камбия. В стрессовых условиях эти меристемы в течение вегетационного сезона могут находиться в состоянии функциональной активности, имеющей постоянный или прерывистый характер, либо в состоянии временного покоя. В результате комбинаций различных видов функциональной активности меристем в ассимиляционных побегах и в отдельных их участках у спиреи Бовера формируется разная анатомическая структура коры. По совокупности структурно-функциональных признаков выделено 3 типа анатомической организации однолетней коры у спиреи Бовера из вулканических местообитаний. Эти признаки визуализируются методами световой микроскопии в виде контрастных анатомических паттернов. Структурные изменения однолетней коры, сформированные в результате нестабильной деятельности феллогена и сосудистого камбия под влиянием вулканического стресса, мы полагаем, являются адаптивными.

**Ключевые слова:** флоэма, перидерма, аномалии, кора, ассимиляционные побеги, древесные растения, газогидротермы, сольфатары, шлаковые поля, вулканическая активность

## Bark of assimilation shoots of the Beauverd spirea shrub (*Spiraea beauverdiana* S.K. Schneid.): structural changes under the conditions of volcanic stress in the South Kuril Islands and the Kamchatka Peninsula

Ekaterina O. Vatserionova\*, Anna V. Kopanina, Inna I. Vlasova

\*E-mail: [katya.vatserionova.85@mail.ru](mailto:katya.vatserionova.85@mail.ru)

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

**Abstract.** The article analyzes the bark of annual assimilation shoots of the Beauverd spirea shrub (*Spiraea beauverdiana* S.K. Schneid., Rosaceae Juss.) growing under the stressful conditions of volcanic and post-volcanic activity in the Kuril Islands (Kunashir, Iturup) and the Kamchatka Peninsula. The combination of negative environmental factors under the conditions of fumarolic, gas-hydrothermal activity and on pyroclastic deposits in volcanogenic landscapes causes disturbance in the activity of the lateral meristems of the stem – phellogen and vascular cambium. Under the conditions of volcanic stress, the functional activity of these meristems can be both constant and intermittent during the growing season, or may be completely absent (temporary dormancy of meristems). As a result of combinations of different functional activity of meristems in assimilation shoots and in their individual sections, different anatomical structures of the cortex can form in *S. beauverdiana*. Based on the totality of structural and functional features, we identified three types of anatomical organization of the one-year-old cortex in *S. beauverdiana* from volcanic habitats, which are visualized by light microscopy in the form of contrasting anatomical patterns. We believe the structural changes in the one-year-old crust, formed as a result of the unstable activity of the phellogen and vascular cambium under the influence of volcanic stress, to be adaptive.

**Keywords:** phloem, periderm, anomalies, bark, assimilation shoots, woody plants, gas hydrotherms, solfataras, slag fields, volcanic activity

**Для цитирования:** Вацерионова Е.О., Копанина А.В., Власова И.И. Кора ассимиляционных побегов кустарника спиреи Бовера (*Spiraea beauverdiana* S.K. Schneid.): структурные изменения в условиях вулканогенного стресса на южных Курильских островах и полуострове Камчатка *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 4, с. 339–359. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.4.339-359>; <https://www.elibrary.ru/urpxel>

**For citation:** Vatsersonova E.O., Kopanina A.V., Vlasova I.I. Bark of assimilation shoots of the Beauverd spirea shrub (*Spiraea beauverdiana* S.K. Schneid.): structural changes under the conditions of volcanic stress in the South Kuril Islands and the Kamchatka Peninsula. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 4, pp. 339–359. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.4.339-359>; <https://www.elibrary.ru/urpxel>

#### Благодарности и финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (№ 121022500177-6).

#### Acknowledgments and Funding

The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS (№ 121022500177-6).

### Введение

Известно, что на Курильских островах и Камчатке вулканизм – ведущий фактор динамики природных экосистем. Он определяет особенности литосферы, направленность, скорость и динамику рельефообразующих процессов, оказывает влияние на геохимические процессы, на состав и прозрачность атмосферы, а также выступает в качестве одного из основных факторов почвообразования [1, 2]. Современная деятельность вулканов очень разнообразна, а ее воздействие на растительность зависит от типа эруптивной деятельности вулканов и их активности [3]. При эффузивных извержениях, сопровождающихся излияниями лавовых потоков, происходит полное уничтожение растительности, а также начинается существенное и длительное изменение условий местообитания для растений. Продолжительность восстановительных сукцессий на лавовых полях – свыше 1500 лет [4, 5]. При эксплозивных извержениях на поверхность выпадают значительные объемы пирокластического материала – пемзы, тефры или шлака. Пирокластические потоки формируются из раскаленных каменно-гравиевых вязких лавин и газов. Результатами этих воздействий могут быть: полное или частичное уничтожение растительного покрова на обширных площадях, запыление и повреждение надземных частей растений, в частности ассимиляционного аппарата, аэральная пирокластикой, погребение отдельных ярусов или целых участков фитоценозов пирокластическим материалом, изменение условий среды, физических и химических

свойств местообитаний [6]. Продолжительность восстановительных сукцессий на пирокластических отложениях составляет не менее 150–200 лет [4]. Одним из проявлений поствулканической активности является также фумарольная (сульфатарная) и гидротермальная деятельность. Смены и формирование растительности под влиянием сульфатар зависят от эдафических условий, измененных деятельностью сульфатар, от устойчивости отдельных видов растений к токсичным газам (хлористый и фтористый водород, сероводород, сернистый газ и т.д.), а также от особенности микроклимата в зоне их проявления. Около активных сульфатар проявляется специфическая микрозональность в размещении растительных группировок, обусловленная различной устойчивостью видов к воздействию газов и своеобразным микроклиматическим условиям [1].

Масштабы поражения растительного покрова и темпы его последующего восстановления при вулканической и поствулканической активности зависят не только от объема изверженных пород, мощности и типа извержения, химического и гранулометрического состава продуктов извержения, размещения отложенного и переотложенного вулканического материала, но также и от состава преобладающей растительности в зоне извержения, ее зонального и высотно-поясного положения [6]. Влияние вулканической деятельности способствует формированию различных адаптивных механизмов, обеспечивающих приспособление жизненных процессов растений к этим условиям обитания, а также вне-

дрению в биогеоценозы новых видов, более приспособленных к существованию в стрессовой обстановке [1, 3].

В современной научной литературе значительное число работ посвящено изучению структурной реакции древесины на действие стрессовых природных факторов. Например, влияние физиологической засухи на *Juniperus communis* L. [7], *Chukrasia tabularis* A. Juss. [8], *Betula pendula* Roth., *Populus nigra* L., *Quercus robur* L., *Acer platanoides* L. [9, 10], влияние экстремальной засухи на *Moringa peregrina* Forssk. [11], влияние низких температур в широтном пределе леса на *Larix gmelinii* Rupr., *Larix cajanderi* Mayr., *Pinus sylvestris* L. и *Picea obovata* Ledeb. [12, 13]. Зарубежные исследования последних десятилетий показывают, что последствия вулканической деятельности отражаются на структуре древесины хвойных и покрытосеменных. Структурные маркеры вулканического стресса были найдены у древесных растений, произрастающих на различных вулканах: у *Pinus montezumae* Lamb., *Pinus hartwegii* Lindl. на влк. Попокатепетль [14, 15]; *Fagus sylvatica* L. и *Acer pseudoplatanus* L. в ландшафтах вулканического комплекса Везувий [16]; *Pinus hartwegii* L. на влк. Санта-Мария [17]. F.H. Schweingruber [18] обобщил, что структурные изменения древесины в результате воздействия вулканов выражены в формировании узких годичных колец, узкой поздней древесины, ложных годичных колец, уменьшении толщины клеточных стенок и увеличении доли паренхимы в поздней древесине.

Однако влиянию стрессовых факторов среды и вулканической деятельности на кору и ее развитие у древесных растений уделено сравнительно мало внимания. Кора древесных растений является сложным объектом для изучения во многих отношениях, и прежде всего методически, поэтому в области экологической анатомии коры сведений о ее структурных перестройках под влиянием вулканической активности гораздо меньше, чем в ксилотомии [19–21]. Небольшое количество современных исследований посвящено структурной реакции коры древесных растений на последствия от различных стрессогенных факторов среды, например пожаров, у *Pinus sylvestris* L. [22]; видов *Quercus* и *Pinus* [23, 24];

*Carya tomentosa* Willd. *Quercus alba* L., *Quercus velutina* Lam., *Acer rubrum* L., *Fagus grandifolia* Ehrh., *Liriodendron tulipifera* L. [25]; *Quercus chrysolepis* Liebm., *Quercus garryana* Douglas., *Quercus kelloggii* Newberry, *Acer macrophyllum* Pursh. [26].

Последние работы по влиянию стрессовых условий вулканических ландшафтов Курильских островов и п-ова Камчатка на древесные растения позволили выявить целый комплекс структурных адаптаций коры: у *Betula ermanii* Cham. в условиях Южно-Сахалинского грязевого вулкана (о. Сахалин), сольфатарного поля и газогидротерм влк. Баранского (о. Итуруп) [27–29]; у *Spiraea beauverdiana* в условиях Центрального восточного сольфатарного поля кальдеры влк. Головинна (о. Кунашир) [30–32]; у *Hydrangea paniculata* Siebold. на влк. Менделеева (о. Кунашир) в условиях Столбовских гидротермальных источников [33], у *Toxicodendron orientale* Greene. в условиях Верхнедокторских газогидротермальных источников [34], у представителей семейства *Ericaceae* Juss., произрастающих в условиях микроландшафтов вулкана [35]; у различных кустарников и кустарничков в условиях кальдеры влк. Ксудач (п-ов Камчатка). В этих экологических условиях отмечено формирование кустарниковой экоморфы *B. Ermanii* [36, 37]. Изучение структурных перестроек коры представляет интерес для выявления закономерностей формирования адаптационных способностей растений в стрессовых условиях, в том числе антропогенного и техногенного происхождения. Эта особенность дает возможность мониторинга и индикации динамики изменения геологической среды [28, 37].

Среди древесных растений особый интерес для изучения структуры коры и ее реакции на условия окружающей среды представляют виды, имеющие широкую экологическую валентность, жизненная форма которых может трансформироваться под давлением природного стресса. Одним из таких видов является *Spiraea beauverdiana*. С жизненной формой кустарник она приурочена к горным лесам, а как приземистый кустарничек успешно обживает субальпийский и альпийский пояса высокогорий приморских и приокеанических территорий Северо-Восточной Азии [38].

Отмечено, что *S. beauverdiana* экологически связана с активной геодинамической обстановкой на Курильских островах и п-ове Камчатка [39].

Целью настоящего исследования является изучение структурных особенностей коры ассимиляционных побегов *S. beauverdiana*, произрастающей в контрастных экологических условиях на активных вулканах Кунашира и Итурупа (Курильские о-ва) и п-ова Камчатка. В исследованных местообитаниях спиреи Бовера стрессовые условия обусловлены разнообразными проявлениями вулканической и поствулканической активности (лавовые потоки, пирокластические отложения, сольфатарные поля, газогидротермальные источники).

### Материалы и методы

*Spiraea beauverdiana* (Rosaceae Juss.) – густоветвистый кустарник до 30 (60) см высотой, с опушенными или голыми побегами. Листья эллиптические или продолговатые, мелкие (1–3 см длиной), городчатые или пильчатые-зубчатые преимущественно в верхней половине. Соцветия щитковидные, от 1 до 6 см в диаметре, густые, с нижними осями до 3 см длиной. Оси соцветий и цветоножек всегда сероватые от густого бархатистого опушения. Цветки от 4 до 7 мм в диаметре, белые, иногда розоватые. Листовки 2.5–3 мм в диаметре, пушистые [40, 41].

*S. beauverdiana* широко распространена в Восточной Сибири, на Дальнем Востоке (рис. 1), Японии, Северной Америке [41]. Северная граница ее ареала проходит в арктических широтах [42]. На Курилах она произрастает на островах – Кунашир, Итуруп, Уруп, Парамушир, Шумшу (Большая Курильская гряда), Танфильева, Юрий, Зеленый, Полонского (Малая Курильская гряда). В границах своего ареала на Камчатке и Курильских островах *S. beauverdiana* довольно массово встречается в ландшафтах, трансформированных современной вулканической деятельностью. На Сахалине *S. beauverdiana* произрастает по всему острову, но преимущественно в средней его части высоко в горах [40, 41].

Местообитания *S. beauverdiana* – горные леса и редколесья, кустарничковые тундры,

скалы, каменистые склоны и осыпи, шлаковые поля, заросли ольховника и кедрового стланика, опушки каменно-березовых, пихтово-еловых и еловых лесов, кустарничково-осоково-моховые болота, заросли кустарников по склонам морских и приречных террас, сырые осоково-вейниковые луга, выходы холодных ключей на каменистых приморских склонах, нивальные лужайки в горах и щебнисто-глинистые склоны до 1600 м над ур. м. [43, 44].

Материал для исследования мы собирали в ходе полевых работ и экспедиций лаборатории экологии растений и геоэкологии ИМГиГ ДВО РАН на островах Кунашир и Итуруп и п-ове Камчатка с 2007 по 2019 г. Образцы *S. beauverdiana* собраны в различных ландшафтных условиях [рис. 2, 3; табл. 2–3].

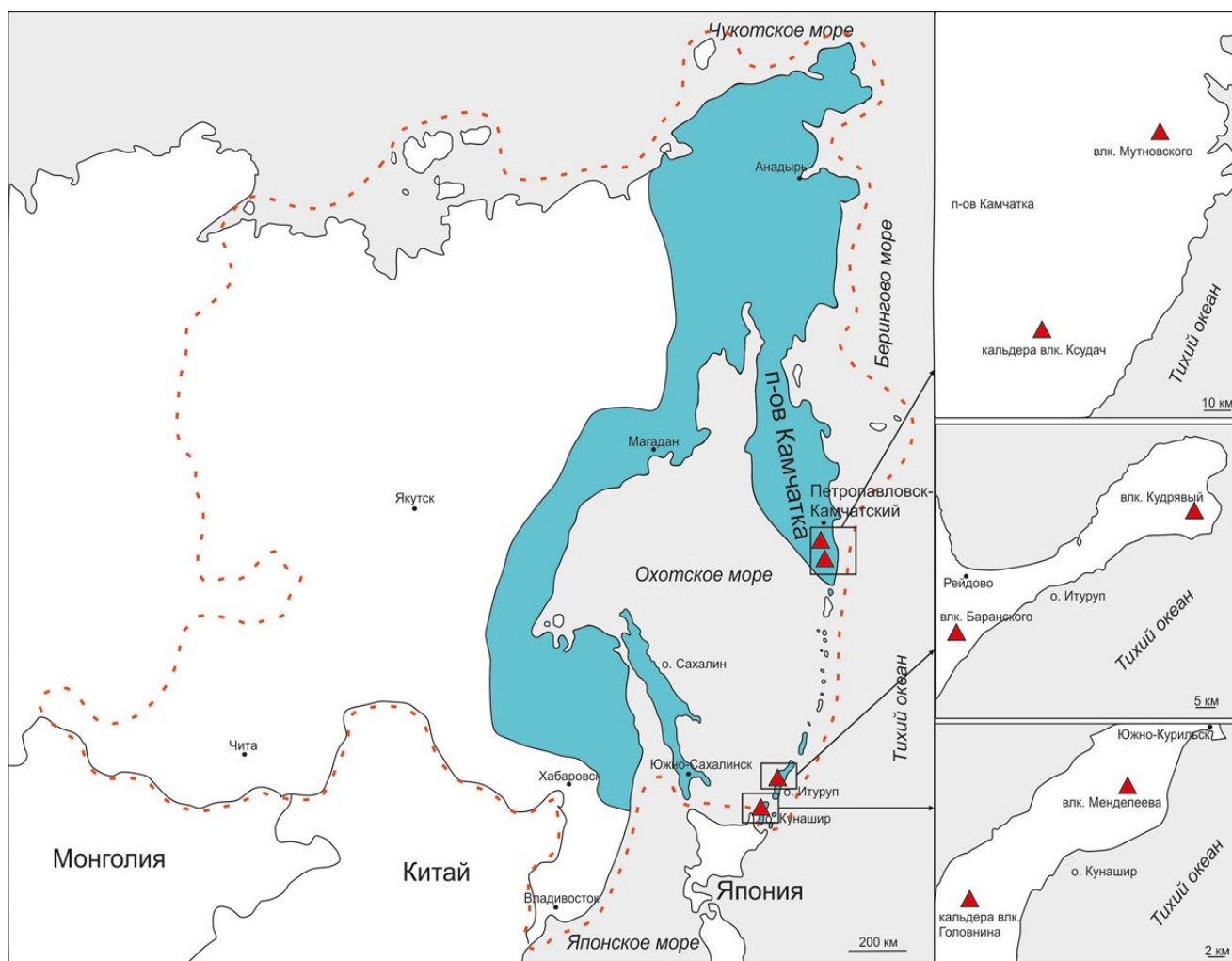
На о. Кунашир местами сбора *S. beauverdiana* были сольфатарные поля вулканов Головинина и Менделеева с паргазовыми выбросами. Эти поля характеризуются определенным агрессивным химическим составом почв и приземных слоев атмосферы (рис. 2 е, 3 а; табл. 1, 2) [45, 46], поэтому они практически лишены растительности (рис. 2 ф, 3 б; табл. 3). Образцы отобраны также в 1 км от сольфатарного поля внутри кальдеры Головинина. Заметного влияния вулканической деятельности на растительность в этом местообитании нет, поэтому его можно назвать типичным для исследуемого вида (рис. 2 г, h; табл. 1, 3).

На о. Итуруп образцы *S. beauverdiana* собирали в среднем комплексе лавового потока, сформированного последним извержением влк. Кудрявый, и у подножия влк. Баранского. На влк. Кудрявый на растения влияют выбросы с фумарол верхнего комплекса [46, 47], а также кислотные дожди и туманы (рис. 2 а, б; табл. 1, 2). А в условиях подножия влк. Баранского местообитание спиреи Бовера приурочено к бортам осыпи вулканического склона, представленной крупными валунами и глыбами, между которыми удерживается кустарниковая растительность (табл. 3). Растительность здесь практически не испытывает повреждающего влияния вулканических проявлений, поэтому данное местообитание характеризуется как близкое к типичному для исследуемого вида (рис. 2 с, d).

На п-ове Камчатка образцы *S. beauverdiana* собраны в районе парящих газогидротермальных источников «Дачные» влк. Мутновского и в кальдере влк. Ксудач. Местообитание *S. beauverdiana* около газогидротермальных источников существенно отличается от окружающих территорий по микроклимату, температурному режиму почв, геохимическим характеристикам [48, 49] (рис. 3 с; табл. 1, 2, 3). В кальдере влк. Ксудач местом сбора растений был южный склон постройки внутри кальдерного влк. Штюбеля и на берегу р. Теплая. Здесь последнее извержение 1907 г. вынесло на поверхность большие объемы рыхлых вулканических продуктов – пепла, песка, пемзы, шлака [50] (рис. 3 е, г; табл. 1, 2). На этих ювенильных пеплово-шлаковых отложениях

в 2016 г. уже сформировались растительные сообщества со значительным участием пионерных видов и некоторых кустарничков, в том числе *S. beauverdiana* (рис. 3 f, h; табл. 3).

Образцы *S. beauverdiana* для структурного анализа, учитывая опыт многолетних полевых работ [51], собраны в максимальном приближении к источникам вулканических проявлений. Местообитания *S. beauverdiana* обследовали по рекомендациям при геоботанических исследованиях [52, 53]. В каждом местообитании однолетние побеги *S. beauverdiana* отбирали с побегов ветвления от трех особей. Фиксацию образцов стеблей для анатомического анализа проводили в день сбора в смеси 70%-го этилового спирта и глицерина. Анализ образцов коры выполняли на оборудовании



**Рис. 1.** Ареал *S. beauverdiana* на Дальнем Востоке России по [41]. Пунктирной красной линией обозначены границы Дальневосточного федерального округа. Красными треугольниками обозначены исследуемые местообитания *S. beauverdiana*.

**Fig. 1.** Habitat of *S. beauverdiana* in the Russian Far East according to [41]. The dotted red line marks the borders of the Far East. The red triangles indicate the studied habitats of *S. beauverdiana*.



**Рис. 2.** *S. beauverdiana* в исследуемых местообитаниях на островах Итуруп и Кунашир. Слева (а, с, е, г) ландшафты исследуемых участков, справа (b, d, f, h) растения с этих участков. (а) – ландшафты лавового потока влк. Кудрявый, (b) – *S. beauverdiana* в несомкнутых шикшево-кассиопеево-камнеломковых группировках в этом районе; (с) – ландшафты подножия влк. Баранского, (d) – *S. beauverdiana* в бамбучково-кустарниковом растительном сообществе; (е) – ландшафты берега оз. Кипящее кальдеры влк. Головнина, (f) – *S. beauverdiana* в разреженных травяно-кустарниковых группировках; (g) – ландшафты кальдеры влк. Головнина, дно кальдеры, (h) – *S. beauverdiana* в бамбучнике кедровостланиково-кустарниковом. Фото а, b – А.В. Дегтярева; c, d – А.В. Копаниной; e, f, g, h – А.И. Тальских

**Fig. 2.** *S. beauverdiana* in the studied habitats on the islands of Iturup and Kunashir. On the left (a, c, e, g) there are the landscapes of the studied areas, on the right (b, d, f, h) – the plants from these areas. (a) – landscapes of the lava flow of Kudryavy volcano, (b) – *S. beauverdiana* in the open *Empetrum*–*Cassiope*–*Saxifraga* groups in this area; (c) – landscapes at the foot of Baransky volcano, (d) – *S. beauverdiana* in a sasa sp. shrub plant community; (e) – landscapes of the lake shore of Lake Kipyashchee of the Golovnin volcano caldera, (f) – *S. beauverdiana* in sparse herbaceous-shrub communities in the area of Lake Kipyashchee; (g) – landscapes of the Golovnin volcano caldera, the bottom of the caldera, (h) – *S. beauverdiana* in the pinus pumila-shrub sasa sp. in this area. Photo a, b – by A.V. Degtyarev; c, d – by A.V. Kopanina; e, f, g, h – by A.I. Talskikh



**Рис. 3.** *S. beauverdiana* в исследуемых местообитаниях на о. Кунашир и п-ове Камчатка. Слева (а, с, е, г) ландшафты исследуемых участков; справа (b, d, f, h) растения с этих участков. (а) – ландшафты Северо-Восточного сольфатарного поля влк. Менделеева, (b) – *S. beauverdiana* в кедровостланиково-бамбучниковом растительном сообществе в данном районе; (с) – ландшафты источников «Дачные» влк. Мутновский, (d) – *S. beauverdiana* в ивково-рододендрово-спирейном растительном сообществе; (е) – ландшафты устья р. Теплая в кальдере влк. Ксудач, (f) – *S. beauverdiana* в филодоцеево-остролодочниковом растительном сообществе; (g) – ландшафты влк. Штубеля в кальдере влк. Ксудач, h – *S. beauverdiana* в ивково-рододендровом остролодочно-ковом-майниковом растительном сообществе. Все фото А.В. Копаниной

**Fig. 3.** *S. beauverdiana* in the studied habitats on Kunashir Island and the Kamchatka Peninsula. On the left (a, c, e, g) there are the landscapes of the studied areas; on the right (b, d, f, h) – the plants from these areas. (a) – landscapes of the North-Eastern solfataric field of Mendeleev volcano, (b) – *S. beauverdiana* in *Pinus pumila*–*Sasa* sp. plant community in this area; (c) – landscapes of Dachnye springs of Mutnovsky volcano, (d) – *S. beauverdiana* in a *Salix*–*Rhododendron*–*Spiraea* plant community; (e) – landscapes of the mouth of the Teplaya River, the Ksudach volcano caldera, (f) – *S. beauverdiana* in a *Phyllodoce*–*Oxytropis* plant community; (g) – landscapes of Shtyubel volcano in the Ksudach volcano caldera, (h) – *S. beauverdiana* in the *Salix*–*Rhododendron* *Oxytropis*–*Maianthemum* plant community. All photos by A.V. Kopanina

лаборатории экологии растений и геоэкологии ИМГиГ ДВО РАН методами световой микроскопии [51]. Для изготовления поперечных, радиальных и тангентальных микросрезов стеблей толщиной 10–25 мкм использовали санный микротом HM 430с с замораживающим столиком (Thermo Scientific, США). Окрашивали микросрезы регрессивным методом с использованием сафранина и нильского синего, с последующей отмывкой в растворах этилового спирта возрастающей концентрации (от 50 до 96 %) и заключительным обезвоживанием в карбоксиле и ксиле по методическим рекомендациям [54]. Постоянные препараты изготавливали с использованием синтетических заливочных сред. Компьютерную обработку изображений микросрезов для измерения биометрических параметров и микрофотографии делали при помощи программного обеспечения ZEN 2 lite на световом микроскопе Axio Scope.A1, Carl Zeiss.

Мы проанализировали 7 количественных показателей тканей коры однолетних стеблей. Объем выборки для каждого параметра составлял не менее 30 измерений с каждой особи. По особям объем выборки усредняли. При анализе параметров тканей и клеток в однолетних стеблях с 8 местообитаний рассчитаны выборочное среднее ( $M_{cp}$ ), коэффициент вариации, границы математического ожидания (для достоверительной вероятности 95 %) (табл. 4).

Описание тканей коры выполняли на основе аналитических подходов, принятых The International Association of Wood Anatomists – IAWA по анатомии коры древесных растений [55]. Следуя рекомендациям IAWA, под корой мы понимаем все ткани, расположенные снаружы от сосудистого камбия. В однолетнем стебле древесного растения это эпидерма или перидерма, колленхима, кортекс, эндодерма, первичные механические элементы (склереиды или волокна), первичная и вторичная флоэма.

## Результаты и обсуждение

Внутренняя структура коры однолетнего стебля *S. beauverdiana* была описана нами в более ранних работах [31, 32]. В литературе есть сведения о структуре коры других видов рода *Spiraea*: *Spiraea alpina* Pall. var. *nana*, *Spiraea betulifolia* Pall., *Spiraea crenata* L., *Spiraea*

**Таблица 1.** Краткая геолого-морфологическая характеристика вулканов, на склонах которых изучена *S. Beauverdiana* (по литературным данным).  
**Table 1.** Brief geological and morphological characteristics of the volcanoes, on the slopes of which *S. beauverdiana* was studied (according to the literature data)

| Название вулкана                     | Влк. Кудрявый                   | Влк. Баранского                          | Кальдера влк. Головинна                                   | Влк. Менделеева                                                                                        | Влк. Мутновский                                                                      | Кальдера влк. Ксудач                                                                       |
|--------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Форма вулкана                        | Стратовулкан [46]               | Стратовулкан [46]                        | Супервулкан (кальдера) [46]                               | Стратовулкан [46]                                                                                      | Щитовой [3]                                                                          | Супервулкан (кальдера) [50]                                                                |
| Абсолютная высота вулкана, м         | 991 [46]                        | 1125 [46]                                | 541 [46]                                                  | 888 [46]                                                                                               | 2322 [3]                                                                             | 1079 [50]                                                                                  |
| Последнее извержение вулкана, год    | 1883 [46]                       | 1951 [46]                                | 1948 [46]                                                 | 1880 [46]                                                                                              | 2000 [3]                                                                             | 1907 [50]                                                                                  |
| Вид современной деятельности вулкана | Фумарольная активность [46, 47] | Фумарольная и термальная активность [46] | Фумарольная и газогидротермальная активность [46, 48, 49] |                                                                                                        | Фумарольная и гидротермальная активность [50]                                        |                                                                                            |
| Породы, из которых сложен вулкан     | Двуфазные андезиты [46, 47]     | Андезиты [1]                             | Туфогенно-осадочные образования [46]                      | Андезитовые и андезитово-базальтовые лавы. Основной состав лав – кварцевый оливинсодержащий дацит [46] | Породы от базальтов до риодацитов. Преобладают высокоглиноземистые базальты [48, 49] | Обширный покров пемз дацитового состава, отложения черных шлаков андезитово-базальтов [50] |

**Таблица 2.** Характеристика исследованных местобитаний *S. beauverdiana* на южных Курильских о-вах и п-ове Камчатка (по [45–49])  
**Table 2.** Characteristics of the studied habitats of *S. beauverdiana* on the southern Kuril Islands and the Kamchatka Peninsula (according to [45–49])

| Местообитание                            | О. Итуруп                                                                                                                                                       |                                                                                        | О. Кунашир                                                                               |                                                                          |                                                                                                          | П-ов Камчатка                                                                               |                                                          |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
|                                          | Влк. Кудрявый, западный склон, средний комплекс лавового потока                                                                                                 | Влк. Баранского, подножие, северо-западный склон, каменистое русло временного водотока | Кальдера влк. Головинна, Центральное Восточное сольфатарное поле, берег оз. Кипящее      | Кальдера влк. Головинна, дно кальдеры в 1 км на юго-запад от оз. Кипящее | Влк. Менделеева, Северо-Восточное сольфатарное поле, верхняя группа источников ручья Кислый, правый борт | Влк. Мутновский, газогидротермальные источники «Дачные» (в 1.5 км от геотермальной станции) | Кальдера влк. Ксудач, южный склон постройки влк. Штубеля |
| Координаты пунктов сбора                 | N 45°23'16";<br>E 148°48'19"                                                                                                                                    | N 45°3'45";<br>E 147°35'34"                                                            | N 43°51'58";<br>E 145°29'56"                                                             | N 43°51'43";<br>E 145°30'0"                                              | N 43°59'16";<br>E 145°43'35"                                                                             | N 52°31'49";<br>E 158°11'32"                                                                | N 51°48'33";<br>E 57°31'46"                              |
| Дата сбора                               | 29.07.2015                                                                                                                                                      | 31.07.2018                                                                             | 10.10.2007                                                                               | 28.07.2019                                                               | 10.09.2006                                                                                               | 15.07.2016                                                                                  | 20.07.2016                                               |
| Высота пунктов сбора над уровнем моря, м | 567                                                                                                                                                             | 289                                                                                    | 160                                                                                      | 170                                                                      | 180                                                                                                      | 809                                                                                         | 424<br>517                                               |
| Тип термальной воды                      | –                                                                                                                                                               | –                                                                                      | От субнейтральных до кислых (гидрокарбонатно-сульфатные, натриево-кальциевые) [46]       | –                                                                        | Кислые, углекислые, сульфатные натриево-кальциево-магниево-сульфатные [46]                               | Сульфатно-кальциевые гидрокарбонатно-натриевые с невысокой общей минерализацией [48, 49]    | –                                                        |
| Газовый состав выбросов фумарол          | Выбросы с верхнего комплекса: CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> , HCl, H <sub>2</sub> , CO, N <sub>2</sub> [46, 47]. Кислотные дожди и туманы | –                                                                                      | CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, HCl [46]. Кислотные дожди и туманы | –                                                                        | H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> [46]. Кислотные дожди и туманы                                         | CO <sub>2</sub> [48, 49]. Кислотные дожди и туманы                                          | –                                                        |
| Температура парогазовой смеси            | 870–940 °C [46]                                                                                                                                                 | –                                                                                      | 90–100 °C [46]                                                                           | –                                                                        | 90–98.5 °C [46]                                                                                          | 95 °C [48, 49]                                                                              | –                                                        |
| Присутствие тяжелых металлов в породах   | Re [46]                                                                                                                                                         | –                                                                                      | Pb–Cd, Rb–As [46]                                                                        | –                                                                        | Zn, Pb, Mn [45]                                                                                          | Cu, Mn, Zn, As, Sb [48, 49]                                                                 | –                                                        |

*Примечание.* Прочерк означает отсутствие признака.

*Note.* Dash means that feature is absent.

**Таблица 3.** Краткая характеристика *S. beauverdiana* в местообитаниях на южных Курильских о-вах и п-ове Камчатка по данным полевых обследований  
**Table 3.** Brief characteristics of *S. beauverdiana* in the habitats on the southern Kuril Islands and the Kamchatka Peninsula according to field survey data

| Местообитание                               | Растительное сообщество местообитания                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Жизненная форма | Высота   | Жизненность                                                              |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------|--------------------------------------------------------------------------|
| Влк. Кудрявый, лавовый поток                | Несомкнутые шикшево-кассиопево-камнеломковыми группировки ( <i>Empetrum sibiricum</i> , <i>Cassiope lycorodoides</i> , <i>Saxifraga merkitii</i> ), расстопы между которыми от 1 до 5–7 м. Куртины и пятна <i>S. beauverdiana</i> встречаются совместно с доминантами группировок.                                                                                                                                                                                                                      | Кустарничек     | До 30 см | Вегетирует, цветет, плодоносит                                           |
| Влк. Баранского, подножие                   | Бамбучково-кустарниковое сообщество ( <i>Sasa</i> sp., <i>S. beauverdiana</i> ). Отдельные кусты <i>S. beauverdiana</i> встречаются между валунами осыпи у бортов временного водотока.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Кустарник       | До 60 см | Вегетирует, цветет, плодоносит                                           |
| Кальдера влк. Головинна, берег оз. Кипящего | Разреженные травяно-кустарниковые группировки ( <i>Ledum hypoleucum</i> и <i>Empetrum sibiricum</i> , <i>S. beauverdiana</i> , <i>Reynoutria sachalinensis</i> ). Отдельные компактные кусты <i>S. beauverdiana</i> встречаются между каменными отдельностями осыпи над сольфатарами.                                                                                                                                                                                                                   | Кустарничек     | До 20 см | Вегетирует, цветет, плодоносит. Химические некрозы на листьях и стеблях. |
| Кальдера влк. Головинна, дно кальдеры       | Бамбучник кедровостланниково-кустарниковый ( <i>Sasa</i> sp., <i>Pinus pumila</i> , <i>Ledum hypoleucum</i> , <i>S. beauverdiana</i> , <i>Empetrum sibiricum</i> ). Крупные кусты и куртины <i>S. beauverdiana</i> располагаются среди пятен доминант сообщества, образуя плотный растительный покров.                                                                                                                                                                                                  | Кустарник       | До 60 см | Вегетирует, цветет, плодоносит                                           |
| Влк. Менделеева, сольфатарное поле          | Несомкнутые кедровостланниково-бамбучниковые ( <i>Pinus pumila</i> , <i>Sasa</i> sp., <i>Hydrangea paniculata</i> , <i>Menziesia repandata</i> , <i>Ledum hypoleucum</i> , <i>S. beauverdiana</i> ) и кустарниково-миксантусово-рейнтриевые группировки ( <i>Ledum hypoleucum</i> , <i>Gaultheria miqueliana</i> , <i>Sasa</i> sp., <i>Miscanthus sinensis</i> , <i>Reynoutria sachalinensis</i> ). Разреженные куртины и пятна <i>S. beauverdiana</i> встречаются совместно с доминантами группировок. | Кустарничек     | До 20 см | Вегетирует, цветет, плодоносит. Химические некрозы на листьях и стеблях. |
| Влк. Мутновский, источники «Дачные»         | Ивово-рододендрово-спирейное ( <i>Salix arctica</i> , <i>Rhododendron kamtschaticum</i> , <i>S. beauverdiana</i> ) сообщество. Куртины и пятна <i>S. beauverdiana</i> встречаются совместно с доминантами группировок.                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Кустарничек     | До 30 см | Вегетирует, цветет, плодоносит. Химические некрозы на листьях и стеблях. |
| Кальдера влк. Ксулач, устье р. Теплая       | Филлоцеево-остролодочниковое ( <i>Phyllocladus alevitica</i> , <i>Oxytropis revoluta</i> , <i>S. beauverdiana</i> ) сообщество. Куртины и пятна <i>S. beauverdiana</i> встречаются совместно с доминантами группировок.                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Кустарник       | До 60 см | Вегетирует, цветет, плодоносит.                                          |
| Кальдера влк. Ксулач, влк. Штубеля          | Ивово-рододендровое остролодочниково-майниковое ( <i>Salix arctica</i> , <i>Rhododendron kamtschaticum</i> , <i>Oxytropis revoluta</i> , <i>Maianthemum dilatatum</i> , <i>S. beauverdiana</i> ) сообщество. Разреженные куртины и пятна <i>S. beauverdiana</i> встречаются совместно с доминантами группировок.                                                                                                                                                                                        | Кустарничек     | До 30 см | Вегетирует, цветет, плодоносит.                                          |

**Таблица 4.** Количественная характеристика тканей коры *S. beauverdiana* в контрастных экологических условиях на Курильских о-вах и п-ове Камчатка  
**Table 4.** Quantitative characteristics of *S. beauverdiana* bark tissues under the contrasting environmental conditions in the Kuril Islands (Kunashir and Iturup Islands) and the Kamchatka Peninsula

| Параметр                              | О. Итуруп                    |                           | О. Кунашир                                  |                                        |                                   | П-ов Камчатка                        |                                       |                                     |
|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
|                                       | Влк. Кудрявый, лавовый поток | Влк. Баранского, подножие | Кальдера влк. Головинина, берег оз. Кипящее | Кальдера влк. Головинина, дно кальдеры | *Влк. Менделеева, солончатое поле | *Влк. Мутновский, источники «Дачные» | Кальдера влк. Ксудач, устье р. Теплая | Кальдера влк. Ксудач, влк. Штгобеля |
| Типы анатомического строения коры     | I                            | III                       | I                                           | II                                     | I                                 | III                                  | III                                   | III                                 |
| Диаметр стебля, мм                    | 1.13±0.06 (0.14)             | 1.03±0.04 (0.06)          | 1.68±0.02 (0.05)                            | 0.94±0.07 (0.28)                       | 0.91±0.01 (0.04)                  | 0.96±0.06 (0.24)                     | 0.62±0.03 (0.14)                      | 0.70±0.03 (0.14)                    |
| Ширина коры, мкм                      | 110.4±3.19 (0.08)            | 177.9±5.89 (0.06)         | 124.8±7.22 (0.15)                           | 113.7±6.13 (0.21)                      | 100.5±3.32 (0.09)                 | 104.6±3.72 (0.14)                    | 77.3±4.69 (0.16)                      | 88.5±9.73 (0.29)                    |
| Ширина коры в аномальной зоне, мкм    | –                            | –                         | –                                           | 166.9±8.63 (0.17)                      | –                                 | –                                    | –                                     | –                                   |
| Ширина аномальной феллемы, мкм        | –                            | –                         | –                                           | 49.1±3.94 (0.27)                       | –                                 | –                                    | –                                     | –                                   |
| Ширина аномальной феллодермы, мкм     | –                            | –                         | –                                           | 28.7±2.43 (0.28)                       | –                                 | –                                    | –                                     | –                                   |
| Ширина прироста вторичной флоэмы, мкм | 24.3±1.98 (0.22)             | 25.8±1.96 (0.14)          | 19.3±1.20 (0.17)                            | 15.3±0.93 (0.24)                       | 18.5±0.72 (0.10)                  | 18.9±1.13 (0.23)                     | 13.1±0.55 (0.11)                      | 13.1±1.17 (0.24)                    |

\*Неспецифические аномальные зоны были обнаружены в более взрослых стеблях (2 и более лет).

\*Non-specific abnormal zones were found in older stems (2 or more years).

Примечания. Приведена средняя арифметическая величина ± границы для математического ожидания (коэффициент вариации). Прочерк – признак отсутствует.

Notes. Arithmetical mean±boundaries for mathematical expectation (coefficient of variation) is given. Dash means that feature is absent.

*humilis* Pojark., *Spiraea japonica* L., *Spiraea salicifolia* L. [56, 57].

Тканевый состав коры *S. beauverdiana* существенно меняется в течение первого вегетационного сезона за счет смены первичного строения коры на вторичное в первой половине сезона в результате заложения и деятельности вторичных меристем – феллогена и сосудистого камбия. Заложение феллогена у *S. beauverdiana* происходит в глубоких слоях коры, и все ткани, расположенные снару́жи от него, отмирают, так как он образует непроницаемую феллему.

В конце первого вегетационного сезона ткани коры *S. beauverdiana* (эпидерма; кортекс, включающий колленхиму, основную паренхиму и эндодерму), расположенные снару́жи от перидермы, почти полностью отмирают и деформируются, но не слущиваются с поверхности стебля (рис. 4 а). Эндодерма также деформируется после суберинизации феллемы. К концу лета вся нару́жная часть стебля отмирает до эндодермы, которая начинает функционировать как покровная ткань. Перидерма и ее нару́жная часть – феллема длительное время прикрыта эндодермой и лишь к середине или даже к концу следующего вегетационного сезона (на второй год роста), после опадения эндодермы, начинает выполнять функцию покровной ткани. Внешняя часть молодой коры – эпидерма, эндодерма или, позже, перидерма – выполняет роль защиты внутренних тканей от абиотических и биотических стрессов. Внутренняя часть коры *S. beauverdiana* представлена флоэмой, которая осуществляет транспорт ассимилятов, их запас и синтез вторичных метаболитов.

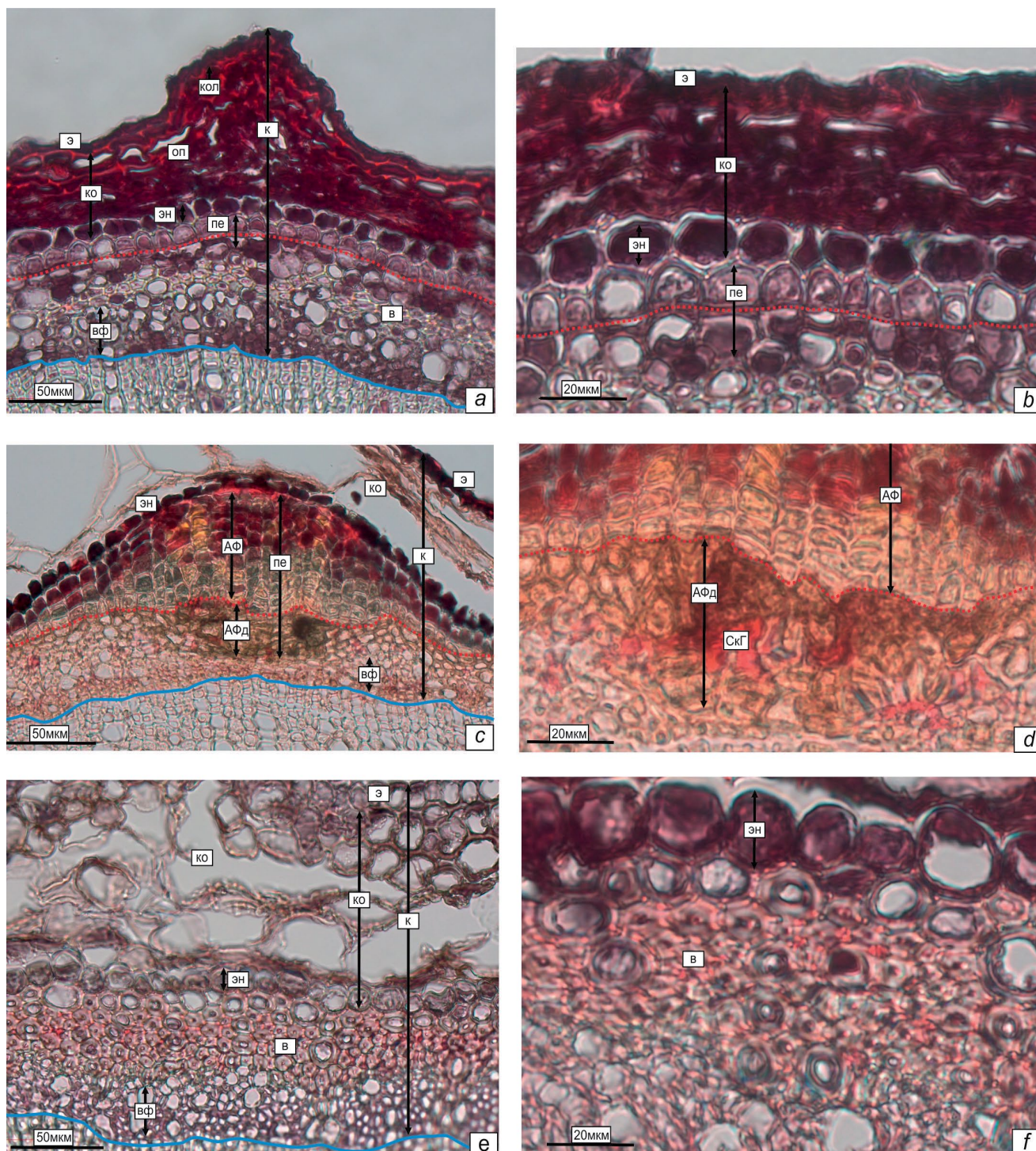
В конце вегетационного сезона в стебле *S. beauverdiana* по направлению от периферии к центру в коре располагаются следующие ткани: деформированная эпидерма; деформированный кортекс, включающий колленхиму, основную паренхиму и эндодерму; перидерма, включающая однослойную феллему, феллоген и 1-2-слойную феллодерму; протофлоэма, протофлоэмные волокна и склереиды; метафлоэма и вторичная флоэма (рис. 4 а).

В коре однолетних ассимиляционных стеблей *S. beauverdiana* в различных вулканических ландшафтах наблюдаются различные отклонения от типичной анатомии. Анализируя эти отклонения, мы выявили 3 типа анатомической организации коры однолетних стеблей.

**I** типу свойственно равномерное заложение феллогена, который формирует перидерму по всей окружности однолетнего стебля (рис. 4 а, б). Такой тип анатомического строения мы обнаружили на о. Итуруп у образцов с лавового потока влк. Кудрявый, у подножия северо-западного склона влк. Баранского, а на о. Кунашир у образцов, собранных внутри кальдеры влк. Головнина (дно кальдеры), на сольфатарном поле влк. Менделеева. Этот тип анатомической организации коры характерен для однолетних стеблей *S. beauverdiana* с типичной анатомией.

**II** тип характеризуется наличием зон неспецифического аномального строения тканей коры. Этим зонам свойственна интенсивная склерификация и дилатация флоэмной паренхимы, а главная особенность – аномальная деятельность феллогена, в результате которой за несколько недель вегетации формируются многослойные феллема и феллодерма (рис. 4 с, d), в отличие от «типичного» строения, когда феллема состоит из 1 слоя клеток, а феллодерма из 1–2 слоев. Эти зоны носят локальный характер и чередуются в стебле с участками обычного строения. Благодаря этому аномальные зоны отчетливо различимы на микросрезках молодой коры. К этому типу относятся образцы с берега оз. Кипящее в кальдере влк. Головнина, о. Кунашир. На сольфатарном поле влк. Менделеева и на источниках «Дачные» влк. Мутновский зоны неспецифического аномального строения тканей коры были обнаружены в более взрослых стеблях (2 и более лет). Впервые эти зоны во внутренней структуре коры у *S. beauverdiana* мы выявили на сольфатарном поле кальдеры влк. Головнина [31, 32] и предположили, что наличие аномалий в коре – наиболее яркое проявление адаптации древесных растений к экстремальным условиям среды. Зоны неспецифического аномального строения могут образовываться в перидерме или более глубоких слоях – во вторичной флоэме [30, 31, 58].

В коре **III** типа перидерма отсутствует, т.е. феллоген не закладывается в первый вегетационный период (рис. 4 е, f). Такие особенности мы обнаружили в образцах с лавового потока влк. Кудрявый, кальдеры влк. Ксудач (устье р. Теплая и влк. Штюбеля) и на источниках «Дачные» влк. Мутновский.



**Рис. 4.** Типы анатомического строения тканей коры однолетнего стебля *S. beauverdiana*: а, б – I тип (образцы с лавового потока влк. Кудрявый); с, д – II тип (образцы с кальдеры влк. Головнина, берег оз. Кипящее); е, ф – III тип (образцы с лавового потока влк. Кудрявый). (а, с, е) – кора однолетнего стебля; (б, д, ф) – внешняя часть коры. Обозначения: К – кора, КО – кортекс, Э – эпидерма, КОЛ – колленхима, ОП – основная паренхима, ЭН – эндодерма, ПЕ – перидерма, АФ – аномальная феллема, АФД – аномальная феллодерма, СкГ – склереидные группы, В – волокна, ВФ – вторичная флоэма. Красная пунктирная линия – феллоген; синяя сплошная линия – сосудистый камбий.

**Fig. 4.** Types of the anatomical structure of the bark tissues of the annual stem of *S. beauverdiana*: а, б – I type (samples from the lava flow of Kudryavy volcano); с, д – II type (samples from the Golovnin volcano caldera, the shore of Lake Kipyashcheye); е, ф – III type (samples from the lava flow of Kudryavy volcano). (а, с, е) – bark of an annual stem; (б, д, ф) – outer part of the bark. Abbreviations: К – bark, КО – cortex, Э – epidermis, КОЛ – collenchyma, ОП – main parenchyma, ЭН – endodermis, ПЕ – periderm, АФ – abnormal phelloderm, АФД – abnormal phelloderm, СкГ – sclereids group, В – fibers, ВФ – secondary phloem; red dotted line – phellogen; solid blue line – vascular cambium.

Других характерных отличий для каждого типа анатомического строения однолетней коры не выявлено. Интенсивность склерификации первичной флоэмы разная у растений разных местообитаний, но наиболее она выражена у образцов с подножия влк. Баранского (I тип) и с лавового потока влк. Кудрявый (III тип). Годичный прирост флоэмы, сформированный сосудистым камбием, экстремально узкий у образцов с кальдеры влк. Ксудач и экстремально широкий у образцов с лавового потока влк. Кудрявый, при этом у них один III тип анатомического строения коры.

В ландшафтах подножия влк. Баранского и кальдеры влк. Головнина (дно кальдеры) нет существенного вулканического воздействия на растительность (табл. 2, 3). На старых вулканических отложениях уже сформировался плотный растительный покров, в том числе с участием *S. beauverdiana* (рис. 2 с, г; табл. 3). В этих местообитаниях растения занимают большие пространства, формируют крупные пятна и куртины. Здесь растения обладают полной жизненностью, они цветут и вегетируют, видимых повреждений на листьях нет (рис. 2 d, h; табл. 3). Экологические факторы обитания в этих районах позволяют растению находиться практически в своем экологическом оптимуме. Эти местообитания *S. beauverdiana* можно охарактеризовать как типичные для исследуемого вида (табл. 2). Средний комплекс лавового потока влк. Кудрявый тоже близок к типичному местообитанию, так как здесь при снеготаяниях происходит снос дополнительных растительных остатков, на основе которых формируется почва, где древесные растения закрепляются и могут нормально произрастать (табл. 2, 3).

На сольфатарном поле влк. Менделеева в результате действия сероводорода и сернистых газов породы видоизменены и обогащены сульфидами металлов (табл. 2), поэтому данное местообитание не является благоприятным для произрастания древесных растений, в том числе *S. beauverdiana*.

Статистический анализ структурных показателей коры однолетних стеблей *S. beauverdiana*, сформированной по I типу (табл. 4), показал общность количественных признаков коры этого типа. В этом типе нет экстремально малых значений ширины коры и флоэмы. Ширина коры у *S. beauverdiana* с подножия

влк. Баранского на 19 % больше, чем у образцов с кальдеры влк. Головнина (дно кальдеры). Эта разница создается за счет увеличения ширины склеренхимного кольца. Ширина вторичной флоэмы у образцов с подножия влк. Баранского (I тип) и дна кальдеры влк. Головнина (I тип) имеет близкие значения. Вышеперечисленные ткани в этих местообитаниях не имеют экстремально малых значений. Ширина коры и ширина вторичной флоэмы у образцов с сольфатарного поля влк. Менделеева (I тип) имеют близкие значения с образцами с кальдеры влк. Головнина (дно кальдеры) и меньше на 16 % ширины коры образцов с подножия влк. Баранского. Ширина коры у образцов с лавового потока влк. Кудрявый (I и III типы) меньше, чем у образцов с подножия влк. Баранского (I тип), на 11 % и больше по сравнению с образцами с дна кальдеры влк. Головнина (I тип) на 9 %. Ширина вторичной флоэмы образцов с лавового потока влк. Кудрявый (I и III типы) больше, чем у растений с I типом коры из всех местообитаний, на 20–22 % за счет крупных клеток вторичной флоэмы (флоэмной паренхимы).

Количественные показатели коры однолетнего стебля *S. beauverdiana*, сформированной по II типу (табл. 4), обнаруживают аномальные значения, т.е. в такой коре формируются зоны неспецифического аномального строения тканей коры. Кора этого типа встречается в ассимиляционных побегах *S. beauverdiana* только в одном местообитании – на берегу оз. Кипящее кальдеры влк. Головнина. Ширина коры в аномальной зоне у этих образцов больше на 25 %, чем у образцов с подножия влк. Баранского (I тип), и на 39 % больше, чем у образцов с кальдеры влк. Головнина (дно кальдеры) (I тип). Эти увеличения ширины коры происходят за счет большего числа слоев феллемы и феллодермы в аномальной зоне (рис. 4 с). Ширина вторичной флоэмы у образцов с берега оз. Кипящее кальдеры влк. Головнина (II тип) меньше, чем у образцов с подножия влк. Баранского (I тип) и дна кальдеры влк. Головнина (I тип), в среднем на 17 %.

Стрессовые факторы, включая кислотные дожди и туманы, которые формируются на берегу оз. Кипящее (табл. 1, 2), создают крайне неблагоприятные условия для произрастания древесных растений, в том числе *S. beauverdiana*.

Статистический анализ структурных показателей коры однолетних стеблей *S. beauverdiana*, сформированной по III типу (табл. 4), показал общность количественных признаков коры этого типа. В этом типе у некоторых образцов есть экстремально малые значения ширины коры и флоэмы. Ширина коры у образцов с кальдеры влк. Ксудач, влк. Штюбеля, и источников «Дачные» влк. Мутновский (III тип) меньше, чем у образцов с подножия влк. Баранского (I тип), на 30–37 % за счет отсутствия перидермы. А ширина коры образцов с кальдеры влк. Ксудач, берег р. Теплая (III тип), меньше по сравнению с образцами с подножия влк. Баранского на 11 %. Несмотря на то что у растений с берега р. Теплая также отсутствует перидерма, степень уменьшения ширины коры здесь ниже за счет того, что клетки кортекса еще не деформированы, в отличие от образцов с кальдеры влк. Ксудач, влк. Штюбеля, и источников «Дачные» влк. Мутновский (III тип), у которых клетки кортекса уже смяты.

Значения ширины коры у образцов с кальдеры влк. Ксудач (влк. Штюбеля и берег р. Теплая) (III тип) и с кальдеры влк. Головнина (дно кальдеры) (I тип) близки. А у образцов с источников «Дачные» влк. Мутновский (III тип) по сравнению с образцами с кальдеры влк. Головнина (дно кальдеры) ширина коры меньше на 23 %.

Наибольшие значения ширины коры у образцов с лавового потока влк. Кудрявый (I и III типы) – в 1.6–2.2 раза выше, чем у образцов с влк. Ксудач (влк. Штюбеля, берег р. Теплая) и источников «Дачные» влк. Мутновский (III тип), и в 1.5–1.7 раза выше, чем у образцов с подножия влк. Баранского и дна кальдеры влк. Головнина (I тип). Это объясняется большим приростом вторичной флоэмы и недеформированной паренхимы кортекса.

Ширина вторичной флоэмы образцов с кальдеры влк. Ксудач (влк. Штюбеля, берег р. Теплая) и источников «Дачные» влк. Мутновский (III тип) в 1.5–2.0 раза меньше, чем у образцов с подножия влк. Баранского и кальдеры влк. Головнина (дно кальдеры) (I тип), и в 1.9–2.5 раза меньше, чем в образцах с лавового потока влк. Кудрявый (I и III типы), за счет меньшего числа слоев вторичной флоэмы.

Значительно дренированные пирокластические отложения в кальдере влк. Ксудач

(влк. Штюбеля и берег р. Теплая) и участки с кислой и сильнокислой реакцией в субстратах различной обводненности (источники «Дачные») (табл. 1, 2) создают неблагоприятные условия для произрастания древесных растений.

В условиях лавового потока влк. Кудрявый у особей *S. beauverdiana* наблюдается формирование двух типов (I и III) структуры коры однолетних побегов. Формирование двух типов коры здесь происходит, возможно, в связи с прерыванием работы феллогена на отдельных стеблях, что может свидетельствовать о локальном стрессогенном эффекте, например, при концентрации кислотных осадков в процессе испарения с ассимиляционной поверхности молодых побегов *S. beauverdiana*.

Структурные особенности в коре *S. beauverdiana* в условиях оз. Кипящее кальдеры влк. Головнина свидетельствуют о некотором сходстве зон неспецифического аномального строения с аномалией древесины, связанной с синдромом ямчатости стебля, которая встречается у *Betula pendula* var. *carelica* (Merckl.) [30, 31, 58]. Ямчатость стебля может быть вызвана как биотическими факторами – заражением некоторыми вирусами или группой вирусов (переносится насекомыми, повреждающими побеги, или передается при прививках), так и определенным сочетанием абиотических факторов [59, 60]. Кроме того, в условиях засушливого климата Нижнего Поволжья у однолетних стеблей некоторых видов берез было отмечено увеличение ширины коры за счет активного нарастания феллемы [61]. В отличие от берез, у *S. beauverdiana* в норме не образуется многослойная феллема, но в условиях крайнего стресса в микроландшафтах сольфатарных полей она может формироваться как аномальная структура.

Анализируя структурную реакцию коры однолетних ассимиляционных побегов на вулканический стресс у разных видов древесных растений, имеющих различные жизненные формы – деревья, кустарники, кустарнички и лианы, мы обратили внимание на ее разнонаправленность. В однолетних стеблях *Toxicodendron orientale* Greene в условиях Верхнедокторских групп термальных источников влк. Менделеева происходит уменьшение ширины коры, а в однолетних стеблях *Betula*

*ermanii* в условиях Южно-Сахалинского грязевого вулкана (о. Сахалин), Старозаводского сольфатарного поля и вблизи гидротермальных Голубых озер влк. Баранского (о. Итуруп) ширина коры близка к типичным показателям [34, 62]. В условиях гидротермальных источников влк. Менделеева в однолетних стеблях представителей *Ericaceae* (*Menziesia pentandra* Maxim., *Vaccinium hirtum* Thunb., *Gaultheria miqueliana* Takeda., *Vaccinium praestans* Lamb.) наблюдается увеличение ширины коры. В условиях терм первичные ткани коры в однолетних и малолетних стеблях, включая эпидерму, дольше сохраняют свое функциональное значение [57]. Впервые этот эффект разнонаправленности структурного ответа на вулканический стресс мы выявили у *B. ermanii* [63]. Мы полагаем, что этот эффект свидетельствует о высокой пластичности коры ассимиляционных побегов. Возможно, он свойствен только видам, обладающим широкой экологической валентностью, имеющим обширный широтный диапазон распространения. Для проверки высказанного предположения необходимы дополнительные исследования на широком видовом материале.

Мы полагаем, что разнообразие типов анатомического строения однолетних ассимиляционных побегов *S. beauverdiana* связано с нарушением деятельности латеральных меристем стебля – феллогена и камбия под давлением неблагоприятных факторов вулканических ландшафтов. Функциональная активность этих меристем в условиях вулканического стресса может носить как постоянный, так и прерывистый характер в течение вегетационного сезона, а может вообще отсутствовать, когда эти меристемы переходят к вынужденному временному покою. В состоянии вынужденного временного покоя в вегетационный сезон феллоген и сосудистый камбий не производят флоэму и перидерму, что приводит к формированию экстремально узких и неравномерных годовичных приростов этих тканей. Таким образом, в пределах даже одного экстремального местообитания можно обнаружить структуру коры двух типов.

Сочетание различных экологических факторов – высокие температуры в корневой зоне, высокая концентрация растворимых солей в кислой среде, редкоземельных элементов и тяжелых металлов в почве на сольфатарных полях и газогидротермальных ис-

точниках, а также высокая инсоляция, низкая влагоемкость пирокластического чехла и его нестабильность на шлаковых полях вызывает у древесных растений и *S. beauverdiana* состояние физиологической засухи. В этих условиях чрезвычайной ограниченности всех анаболических процессов, и прежде всего фотосинтеза, в ассимиляционных побегах создается острый дефицит пластического материала. Все меристемы: и феллоген и сосудистый камбий – являются активными зонами поглощения питательных веществ, как органических, так и минеральных, а также воды [64]. В условиях ограничения снабжения этими веществами меристемы ассимиляционных побегов крайне нестабильно работают, что приводит к образованию аномальных тканей в коре и структурным изменениям перидермы и флоэмы [65], а также к различным структурным отклонениям, описанным в настоящем исследовании.

## Заключение

Исследованы структурные особенности коры однолетних ассимиляционных побегов *S. beauverdiana*, произрастающей в контрастных экологических условиях в условиях фумарольной, газогидротермальной активности и на пирокластических отложениях в вулканогенных ландшафтах южных курильских островов Кунашира и Итурупа и п-ова Камчатка.

Выявлены различные отклонения от типичной анатомии в структурной организации тканей коры ассимиляционных побегов *S. beauverdiana*, которые выполняют основную функциональную нагрузку углеродного питания, ближнего и дальнего транспорта углерода, защиты внутренней среды тела растения от внешних абиотических и биотических воздействий. По совокупности структурно-функциональных признаков выделены 3 типа анатомической организации коры однолетних стеблей *S. beauverdiana* под давлением вулканического стресса, которые, как мы полагаем, являются адаптационными. Разные анатомические структуры коры складываются в этих условиях в результате различных комбинаций работы феллогена и сосудистого камбия, функциональная активность которых может носить как постоянный, так и прерывистый характер или быть в состоянии вынужденного временного покоя. Мы полагаем, что структурные от-

клонения коры однолетнего стебля могут быть использованы в качестве диагностики физиологического состояния древесного растения в тот или иной период развития или в том или ином местообитании.

В зависимости от интенсивности давления неблагоприятных факторов среды происходят изменения физиологических процессов, протекающих в коре стебля древесных растений, что находит отражение в структурном изменении этого тканевого комплекса: увеличении или уменьшении ширины коры и ширины прироста вторичной флоэмы однолетнего стебля. Изучение структуры однолетнего стебля *S. beauverdiana* в различных экстремальных условиях позволяет нам сделать вывод о формировании сложного разнонаправленного процесса адаптации у древесных растений, в том числе в виде неспецифических аномальных зон.

### Список литературы

1. Манько Ю.И. 1980. Вулканизм и динамика растительности. *Ботанический журнал*, 65(4): 457–469.
2. Лавров Н.П. 2005. *Новейший и современный вулканизм на территории России*. М.: Наука, 604 с.
3. Манько Ю.И., Сидельников А.Н. 1989. *Влияние вулканизма на растительность*. Владивосток: ДВО АН СССР, 163 с.
4. Гришин С.Ю. 1992. Сукцессии подгольцовой растительности на лавовых потоках Толбачинского дола. *Ботанический журнал*, 77(1): 92–100.
5. Гришин С.Ю. 2014. Излияние лавовых потоков на Курильских островах в XX и начале XXI в.: масштабы и глубина изменения экосистем. *Известия Русского географического общества*, 6: 1–13.
6. Нешатаева В.Ю. 2009. *Растительность полуострова Камчатка*. М.: КМК, 537 с.
7. Боголицын К.Г., Сурсо М.В., Гусакова М.А., Зубов И.Н. 2016. Влияние стрессовых воздействий на компонентный состав и строение древесины можжевельника. *Лесной журнал*, 6: 33–41. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.6.33>
8. Islam M., Rahman M., Brauning A. 2019. Impact of extreme drought on tree-ring width and vessel anatomical features of *Chukrasia tabularis*. *Dendrochronologia*, 53: 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.11.007>
9. Кузьмичев А.М., Золотухин А.И. 2012. Повреждения древесных растений экстремально высокими температурами и засухой летом 2010 г. в Среднем Прихоперье. *Вестник Саратовского государственного университета им. Н.И. Вавилова*, 1: 32–36.
10. Золотухин А.И., Занина М.А. 2015. Адаптации древесных растений после теплового стресса в Прихоперье. *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*, 15(1): 93–98.
11. Farahat E., Gartner H. 2019. Anatomy and dendrochronological potential of *Moringa peregrina* from the hyper-arid desert in Egypt. *Dendrochronologia*, 56: 125606. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.125606>
12. Фахрутдинова В.В., Бенькова В.Е., Шашкин А.В. 2017. Изменчивость структуры годичных колец у лиственницы Гмелина на северной границе леса (полуостров Таймыр). *Сибирский лесной журнал*, 2: 62–69. <https://doi.org/10.15372/sjfs20170207>
13. Фонти М.В., Фахрутдинова В.В., Калинина Е.В., Тычков И.И., Попкова М.И., Шишов В.В., Николаев А.Н. 2018. Многолетняя изменчивость анатомических параметров годичных колец хвойных пород в криолитозоне средней Сибири. *Лесоведение*, 6: 403–416.
14. Cruz-Munoz A.R., Rodriguez-Fernandez L., Calva-Vazquez G., Ruvalcaba-Sil J.L. 2008. Effects due to Popocatepetl volcano eruptions on the elemental concentrations in tree growth rings. *X-Ray Spectrometry*, 37(2): 163–168. <https://doi.org/10.1002/xrs.1057>
15. Alfaro Sanchez R., Camarero J.J., Querejeta J.I., Sagra J., Moya D., Rodriguez-Trejo D.A. 2020. Volcanic activity signals in tree-rings at the treeline of the Popocatepetl, Mexico. *Dendrochronologia*, 59: 125663. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125663>
16. Battipaglia G., Cherubini P., Saurer M., Siegwolf T.W., Strumia S., Cotrufo F. 2007. Volcanic explosive eruptions of the Vesuvio decrease tree-ring growth but not photosynthetic rates in the surrounding forests. *Global Change Biology*, 13: 1122–1137. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01350.x>
17. Carlon Allende T., Macias J.L., Mendoza M.E., Villanueva Diaz J. 2020. Evidence of volcanic activity in the growth rings of trees at the Tacana Volcano, Mexico-Guatemala border. *Canadian J. of Forest Research*, 50(1): 65–72. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0214>
18. Schweingruber F.H. 2007. *Wood structure and environment*. Berlin: Springer-Verlag, 279 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-48548-3>
19. Боровикова М.Г. 2013. Изменчивость ширины годичных слоев стволовой древесины и коры березы пушистой. *Вестник КрасГАУ*, 2(77): 76–80.
20. Барыкина Р.П., Кудряшев Л.В. 1973. Анатомическое исследование гипоарктических кустарников *Betula exilis* Sukacz. и *Betula nana* L. *Ботанический журнал*, 58(3): 421–428.
21. Corvalan P., Naulin P., Contreras A. 2019. Variacion del espesor de corteza en el perfil fustal de *Nothofagus obliqua* en la precordillera de Maule, Chile. *Interciencia*, 44: 644–648.
22. Стасова В.В., Зубарева О.Н., Иванова Г.А. 2015. Анатомические характеристики луба ствола сосны обыкновенной после лесного пожара. *Сибирский лесной журнал*, 1: 74–86.
23. Pausas J.G. 2015. Bark thickness and fire regime. *Functional Ecology*, 29: 315–327. <http://doi.org/10.1111/1365-2435.12372>
24. Pausas J.G. 2017. Bark thickness and fire regime: another twist. *New Phytologist*, 213: 13–15. <https://doi.org/10.1111/nph.14277>
25. Shearman T.M., Wang G.G., Ma P.T., Guan S. 2018. Patterns of bark growth for juvenile trees of six common hardwood species in the eastern United States and the implications to fire-tolerance. *Trees*, 32: 519–524. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1649-9>
26. Kidd K.R., Varner J.M. 2019. Differential relative bark thickness and aboveground growth discriminates fire resistance among hardwood sprouts in the southern Cascades, California. *Trees*, 33: 267–277. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1775-z>

27. Тальских А. И., Копанина А.В., Власова И.И. **2019**. Структурные особенности коры молодых стеблей *Betula ertmanii* Cham. в условиях Южно-Сахалинского грязевого вулкана (о-в Сахалин). В кн.: *Геодинамические процессы и природные катастрофы: тез. докл. III Всерос. науч. конф. с междунар. участием, Южно-Сахалинск, 27–31 мая*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, с. 181.
28. Kopanina A.V., Talskikh A.I., Vlasova I.I., Kotina E.L. **2022**. Age-related pattern in bark formation of *Betula ertmanii* growing in volcanic environments from southern Sakhalin and Kuril Islands (Northeast Asia). *Trees*, 36: 1–25. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02257-x>
29. Тальских А.И., Копанина А.В., Власова И.И. **2022**. Структурные особенности коры однолетнего стебля *Betula ertmanii* Cham. под воздействием газо-гидротермальных выходов вулкана Баранского. *Региональные проблемы*, 25(1): 16–30. <http://doi.org/10.31433/2618-9593-2022-25-1-16-30>
30. Вацерионова Е.О., Копанина А.В. **2016**. Особенности структуры молодых стеблей *Spiraea beauverdiana* в условиях сольфатарных полей вулкана кальдеры Головинна, остров Кунашир. *Бюл. БСИ ДВО РАН*, 15: 8–10.
31. Копанина А.В., Власова И.И., Вацерионова Е.О. **2017**. Структурные адаптации древесных растений к условиям вулканических ландшафтов Курильских островов. *Вестник ДВО РАН*, 1: 88–96.
32. Вацерионова Е.О., Копанина А.В., Власова И.И. **2021**. Структура коры однолетнего стебля *Spiraea beauverdiana* (Rosaceae) в условиях сольфатарных полей кальдеры вулкана Головинна (о-в Кунашир, южные Курильские о-ва). *Бюл. БСИ ДВО РАН*, 25: 1–15. <http://doi.org/10.17581/bbgi2501>
33. Побережная Т.М., Копанина А.В. **2011**. Биогеохимические и анатомические особенности растений в местах проявления современного вулканизма. *Сибирский экологический журнал*, 18(2): 285–292.
34. Kopanina A.V., Vlasova I.I. **2019**. Structural changes of bark of the woody liana *Toxicodendron orientale* Greene (Anacardiaceae) in the extreme environments of gashydrothermal volcanic activity. *Botanica Pacifica*, 8(2): 3–17. <https://doi.org/10.17581/bp.2019.08212>
35. Копанина А.В., Еремин В.М. **2012**. Анатомия коры представителей семейства *Ericaceae*, произрастающих на Сахалине и Курильских островах. *Ботанический журнал*, 97(8): 1061a–1079.
36. Копанина А.В., Лебедева Е.В., Власова И.И. **2018**. Особенности восстановления растительности после извержения 1907 г. Кальдеры Ксудач на юге Камчатского полуострова. *Изв. РАН. Серия географическая*, 6: 57–69. <https://doi.org/10.1134/S2587556618060092>
37. Kopanina A.V., Lebedeva E.V., Vlasova I.I., Talskikh A.I. **2020**. Structural traits of woody plants and geomorphological conditions to the vegetation recovery at Ksudach caldera (Southern Kamchatka) since the explosive eruption in 1907. *J. of Mountain Science*, 17(7): 1613–1635. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5583-8>
38. Безделев А.Б., Безделева Т.А. **2006**. *Жизненные формы семенных растений российского Дальнего Востока*. Владивосток: Дальнаука, 295 с.
39. Кораблев А.П., Нешатаева В.Ю. **2016**. Первичные вулканогенные сукцессии растительности лесного пояса на плато Толбачинский дол (Камчатка). *Изв. РАН. Серия биологическая*, 4: 366–376.
40. Толмачев А.И. **1956**. *Деревья, кустарники и древеснистые лианы острова Сахалина*. М.: Изд-во АН СССР, 159 с.
41. Смирнов А.А. **2002**. *Распространение сосудистых растений на острове Сахалин*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 245 с.
42. Якубов В.В., Недолужко В.А., Шанцер И.А., Тихомиров В.Н., Румянцев С.Д. **1996**. Семейство Розовые – Rosaceae. В кн.: *Сосудистые растения советского Дальнего Востока*. СПб.: Наука, т. 8, с. 125–246.
43. Баркалов В.Ю. **2009**. *Флора Курильских островов*. Владивосток: Дальнаука, 468 с.
44. Якубов В.В. **2007**. *Растения Камчатки: полевой атлас*. М.: Путь, Истина и Жизнь, 260 с.
45. Жарков Р.Ф., Побережная Т.М. **2008**. Влияние сольфатарно-гидротермальной деятельности вулканов на компоненты ландшафтов (влк. Менделеева, о-в Кунашир, Курильские острова). *Вестник ДВО РАН*, 1: 53–58.
46. Жарков Р.В. **2014**. *Термальные источники южных Курильских островов*. Владивосток: Дальнаука, 378 с.
47. Чаплыгин И.В. **2009**. *Рудная минерализация высокотемпературных фумарол вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские о-ва)*: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук, Москва.
48. Селянгин О.Б. **2009**. *К вулканам Мутновский и Горелый: вулканологический и туристический путеводитель*. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 108 с.
49. Панова Л.А. **2012**. Минералы геотермальных отложений Дачных источников вулкана Мутновский, Камчатка. *Металлогения древних и современных океанов*, 1: 78–81.
50. Мелескеев И.В., Сулержицкий Л.Д. **1987**. Вулкан Ксудач (Камчатка) за последние 10 тыс. лет. *Вулканология и сейсмология*, 4: 28–39.
51. Vlasova I.I., Kopanina A.V. **2021**. Peculiarities of selecting woody plants for anatomy analysis in various environments. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 946: 012048. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012048>
52. Боголюбов А.С., Панков А.Б. **1996**. *Простейшая методика геоботанического описания леса: метод. пособие*. М.: Экосистема, 17 с.
53. Андреева Е.Н., Баккал И.Ю., Горшков В.В. и др. **2002**. *Методы изучения лесных сообществ*. СПб.: Ботанический институт им. В.Л. Комарова, 240 с.
54. Барыкина Р.П., Веселова Т.Д., Девятов А.Г. и др. **2004**. *Справочник по ботанической микротехнике: основы и методы*. М.: Изд-во МГУ, 312 с.
55. Angyalossy V., Pace M.R., Evert R.F., Marcati C.R., Oskolski A.A., Terrazas T., Kotina E., Lens F., Mazzoni-Viveiros S.C., Angeles G., Machado S.R., Crivellaro A., Rao K.S., Junikka L., Nikolaeva N., Baas P. **2016**. IAWA list of microscopic bark features. *IAWA J.*, 37(4): 517–615. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160151>
56. Лотова Л.И., Тимонин А.К. **2005**. *Анатомия коры розовцветных (Rosaceae): разнообразие, эволюция, таксономическое значение*. М.: КМК, 264 с.
57. Ерёмин В.М., Копанина А.В. **2012**. *Атлас анатомии коры деревьев, кустарников и лиан Сахалина и Курильских островов*. Брест: Полиграфика, 896 с.
58. Копанина А.В. **2018**. Структурные адаптации *Spiraea beauverdiana* (Rosaceae Juss.) в экстремальных условиях. В кн.: *Материалы VI Междунар. симп. им. Б.Н. Уголева, посвящ. 50-летию регион. коорд. совета по совр. пробл. дресиноведения, Красноярск, 10–16 сент. 2018 г.* Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Новосибирск, с. 108–111.
59. Коровин В.В., Новицкая Л.Л., Курносов Г.А. **2003**. *Структурные аномалии стебля древесных растений*. М.: Москов. гос. ун-т леса, 259 с.

60. Новицкая Л.Л. **2008**. Карельская береза: механизмы роста и развития структурных аномалий. Петрозаводск: Verso, 144 с.
  61. Талалуева Л.В. **1983**. Особенности анатомического строения коры стебля некоторых видов рода *Betula* (Betulaceae). *Ботанический журнал*, 70(4): 490–495.
  62. Talskikh A.I., Kopanina A.V., Vlasova I.I. **2019**. Structural features of the bark in young stems of *Betula ermanii* Cham. in the conditions of Yuzhno-Sakhalinsky mud volcano (Sakhalin Island). *IOP Conference. Series Earth and Environmental Science*, 324: 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012033>
  63. Копанина А.В., Тальских А.И., Власова И.И. **2018**. Особенности строения коры и древесины *Betula ermanii* (Betulaceae S.F. Gray) в островных экосистемах. В кн.: *Материалы VI Междунар. симп. им. Б.Н. Уголева, посвящ. 50-летию регион. коорд. совета по совр. пробл. древесиноведения, Красноярск, 10–16 сент.* Новосибирск: СО РАН, с. 111–115.
  64. Evert R.F. **2006**. *Esau's plant anatomy: meristems, cells, and tissues of the plant body: their structure, function, and development*. 3rd ed. Canada, 601 с. <https://doi.org/10.1002/0470047380>
  65. Kopanina A.V. **2019**. Structure and formation of bark tissues of *Betula ermanii* (Betulaceae) in ontogenesis. In: *Plant anatomy: traditions perspectives: Materials of the Intern. Symp. ded. to the 90th anniversary of Prof. Ludmila Ivanovna Lotova, Sept. 16–22. Pt 1*. Moscow: MAKSS Press, p. 131–133.
- ## References
1. Manko Yu.I. **1980**. [Volcanism and vegetation dynamics]. *Botanical J.*, 65(4): 457–469. (In Russ.).
  2. Laverov N.P. **2005**. [Newest and modern volcanism in Russia]. Moscow: Nauka, 604 p. (In Russ.).
  3. Manko Yu.I., Sidelnikov A.N. **1989**. [Effect of volcanism on vegetation]. Vladivostok: DVO AN SSSR, 163 p. (In Russ.).
  4. Grishin S.Yu. **1992**. [Successions of subalpine vegetation on lava flows of the Tolbachinsky Dol]. *Botanical J.*, 77(1): 92–100. (In Russ.).
  5. Grishin S.Yu. **2014**. Outpouring of lava flows on the Kuril Islands in XX and the beginning of XXI centuries: scope and depth of ecosystem changes. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 6: 1–13. (In Russ., abstr. in Engl.).
  6. Neshataeva V.Yu. **2009**. [Vegetation of Kamchatka Peninsula]. Moscow: KMK, 537 p. (In Russ.).
  7. Bogolitsyn K.G., Surso M.V., Gusakova M.A., Zubov I.N. **2016**. The influence of stresses on the component composition and structure of juniper wood. *Lesnoj zhurnal = Russian Forestry J.*, 6: 33–41. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.6.33>
  8. Islam M., Rahman M., Brauning A. **2019**. Impact of extreme drought on tree-ring width and vessel anatomical features of *Chukrasia tabularis*. *Dendrochronologia*, 53: 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.11.007>
  9. Kuzmichev A.I., Zolotukhin A.I. **2012**. The damage of woody plants by extremely high temperatures and dry weather in summer 2010 in the middle Khoper river region. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova*, 1: 32–36. (In Russ., abstr. in Engl.).
  10. Zolotukhin A.M., Zanina M.A. **2015**. The adaptations of woody plants after a thermal stress in the khopyor river region. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Himiya. Biologiya. Ekologiya*, 15(1): 93–98. (In Russ., abstr. in Engl.).
  11. Farahat E., Gartner H. **2019**. Anatomy and dendrochronological potential of *Moringa peregrina* from the hyper-arid desert in Egypt. *Dendrochronologia*, 56: 125606. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.125606>
  12. Fakhrutdinova V.V., Benkova V.E., Shashkin A.V. **2017**. Variability of the tree-rings structure of Gmelin's Larch at northern tree line (Peninsula of Taymyr). *Sibirskij lesnoj zhurnal = Siberian J. of Forest Science*, 2: 62–69. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.15372/sjfs20170207>
  13. Fonti M.V., Fakhrutdinova V.V., Kalinina E.V., Tychkov I.I. et al. **2019**. Long-term variability of anatomic features of annual tree rings of larch, pine and spruce in the permafrost zone in Central Siberia. *Contemporary Problems of Ecology*, 12(7): 692–702. <https://doi.org/10.1134/S1995425519070035>
  14. Cruz-Munoz A.R., Rodriguez-Fernandez L., Calva-Vazquez G., Ruvalcaba-Sil J.L. **2008**. Effects due to Popocatepetl volcano eruptions on the elemental concentrations in tree growth rings. *X-Ray Spectrometry*, 37: 163–168. <https://doi.org/10.1002/XRS.1057>
  15. Alfaro Sanchez R., Camarero J.J., Querejeta J.I., Sagra J., Moya D., Rodriguez-Trejo D. **2020**. Volcanic activity signals in tree-rings at the treeline of the Popocatepetl, Mexico. *Dendrochronologia*, 59: 125663. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125663>
  16. Battipaglia G., Cherubini P., Saurer M., Siegwolf T.W., Strumia S., Cotrufo F. **2007**. Volcanic explosive eruptions of the Vesuvio decrease tree-ring growth but not photosynthetic rates in the surrounding forests. *Global Change Biology*, 13: 1122–1137. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01350.x>
  17. Carlon Allende T., Macias J.L., Mendoza M.E., Villanueva Diaz J. **2020**. Evidence of volcanic activity in the growth rings of trees at the Tacana Volcano, Mexico-Guatemala border. *Canadian J. of Forest Research*, 50(1): 65–72. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0214>
  18. Schweingruber F.H. **2007**. *Wood structure and environment*. Berlin: Springer-Verlag, 279 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-48548-3>
  19. Borovikova M. G. **2013**. The year layer width variability of the fluffy birch stem wood and bark. *Vestnik KrasGAU*, 2(77): 76–80. (In Russ., abstr. in Engl.).
  20. Barykina R.P., Kudryashev L.V. **1973**. [Anatomical study of the hypoarctic shrubs *Betula exilis* Sukacz. and *Betula nana* L.]. *Botanical J.*, 58(3): 421–428. (In Russ.).
  21. Corvalan P., Naulin P., Contreras A. **2019**. Variacion del espesor de corteza en el perfil fustal de *Nothofagus obliqua* en la precordillera de Maule, Chile. *Interciencia*, 44: 644–648.
  22. Stasova V.V., Zubareva O.N., Ivanova G.A. **2015**. Anatomical features of the scots pine stem phloem after forest fire. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal*, 1: 74–86. (In Russ., abstr. in Engl.).
  23. Pausas J.G. **2015**. Bark thickness and fire regime. *Functional Ecology*, 29: 315–327. <http://doi.org/10.1111/1365-2435.12372>
  24. Pausas J.G. **2017**. Bark thickness and fire regime: another twist. *New Phytologist*, 213: 13–15. <https://doi.org/10.1111/nph.14277>
  25. Shearman T.M., Wang G.G., Ma P.T., Guan S. **2018**. Patterns of bark growth for juvenile trees of six common hardwood species in the eastern United States and the implications to fire-tolerance. *Trees*, 32: 519–524. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1649-9>

26. Kidd K.R., Varner J.M. **2019**. Differential relative bark thickness and aboveground growth discriminates fire resistance among hardwood sprouts in the southern Cascades, California. *Trees*, 33: 267–277. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1775-z>
27. Talskikh A.I., Kopanina A.V., Vlasova I.I. **2019**. [Structural features of the bark of young stems of *Betula ermanii* Cham. in the conditions of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano (Sakhalin Island)]. In: *Geodynamic processes and natural disasters: Abstracts of the III All-Russian scientific conf. with intern. participation, Yuzhno-Sakhalinsk, May 27–31. Yuzhno-Sakhalinsk: Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS*, p. 181. (In Russ.)
28. Kopanina A.V., Talskikh A.I., Vlasova I.I., Kotina E.L. **2022**. Age-related pattern in bark formation of *Betula ermanii* growing in volcanic environments from southern Sakhalin and Kuril Islands (Northeast Asia). *Trees*, 36: 915–939. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02257-x>
29. Talskikh A.I., Kopanina A.V., Vlasova I.I. **2022**. Structural features in the bark of the annual stem *Betula ermanii* Cham., exposed to the Baransky volcano hydrothermal gases and fluids. *Regional'nye problemy*, 25(1): 16–30. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.31433/2618-9593-2022-25-1-16-30>
30. Vazzerionova E.O., Kopanina A.V. **2016**. The internal structure of the young stems *Spiraea beauverdiana* formed under solfataric fields Golovnin volcano caldera, Kunashir Island. *Byull. Botanicheskogo sada-instituta DVO RAN*, 15: 8–10. (In Russ., abstr. in Engl.)
31. Kopanina A.V., Vlasova I.I., Vatsionova E.O. **2017**. Structural adaptation of woody plants to volcanic landscapes of the Kuril Islands. *Vestnik of the FEB RAS*, 1: 88–96. (In Russ., abstr. in Engl.)
32. Vatsionova E.O., Kopanina A.V., Vlasova I.I. **2021**. The structure of the bark of the annual stem of *Spiraea beauverdiana* (Rosaceae) in the conditions of the solfataric fields of the Golovnin volcano's caldera (Kunashir, south Kuril Islands). *Byull. Botanicheskogo sada-instituta DVO RAN*, 25: 1–15. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.17581/bbgi2501>
33. Poberezhnaya T.M., Kopanina A.V. **2011**. The biogeochemistry and anatomy of plants in areas of recent volcanism. *Contemporary Problems of Ecology*, 4(2): 212–217. <http://doi.org/10.1134/S1995425511020135>
34. Kopanina A.V., Vlasova I.I. **2019**. Structural changes of bark of the woody liana *Toxicodendron orientale* Greene (Anacardiaceae) in the extreme environments of gashydrothermal volcanic activity. *Botanica Pacifica*, 8(2): 3–17. <https://doi.org/10.17581/bp.2019.08212>
35. Kopanina A.V., Eremin V.M. **2012**. Bark anatomy of some *Ericaceae* species from Sakhalin and Kuril Islands. *Botanicheskij zhurnal*, 97(8): 1061a–1079. (In Russ., abstr. in Engl.)
36. Kopanina A.V., Lebedeva E.V., Vlasova I.I. **2018**. Features of vegetation restoration after the eruption of 1907 Ksudach caldera in the south of the Kamchatka peninsula. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 6: 57–69. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.1134/S2587556618060092>
37. Kopanina A.V., Lebedeva E.V., Vlasova I.I., Talskikh A.V. **2020**. Structural traits of woody plants and geomorphological conditions to the vegetation recovery at Ksudach caldera (Southern Kamchatka) since the explosive eruption in 1907. *J. of Mountain Science*, 17: 1613–1635. <http://doi.org/10.1007/s11629-019-5583-8>
38. Bezdelev A.B., Bezdeleva T.A. **2006**. [Life forms of seed plants of the Russian Far East]. Vladivostok: Dal'nauka, 295 p. (In Russ.)
39. Korablev A.P., Neshataeva V.Y. **2016**. Primary plant successions of forest belt vegetation on the Tolbachinskii Dol volcanic plateau (Kamchatka). *Biology Bull.*, 43(4): 307–317. <http://doi.org/10.1134/S1062359016040051>
40. Tolmachev A.I. **1956**. [Trees, shrubs and woody lianas of Sakhalin Island]. Moscow: Academy of Sciences of the USSR, 159 p. (In Russ.)
41. Smirnov A.A. **2002**. [Distribution of vascular plants on Sakhalin Island]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN, 245 p. (In Russ.)
42. Yakubov V.V., Nedoluzhko V.A., Shantser I.A., Tikhomirov V.N., Rumyantsev S.D. **1996**. [Rosaceae family – Rosaceae]. In: *Vascular plants of the Soviet Far East*. St. Petersburg: Nauka, 8: 125–246. (In Russ.)
43. Barkalov V.Yu. **2009**. *Flora of the Kuril Islands*. Vladivostok: Dal'nauka, 468. (In Russ., abstr. in Engl.)
44. Yakubov V.V. **2007**. *Plants of Kamchatka (the Field Atlas)*. Moscow: Put', Istina i Zhizn', 260 p. (In Russ.)
45. Zharkov R.F., Poberezhnaya T.M. **2008**. Effect of solfataric hydrothermal activity of volcanoes on landscapes (taking Mendelev volcano, Kunashir Island, Kuril Islands, as an example). *Vestnik of the FEB RAS*, 1: 53–58. (In Russ., abstr. in Engl.)
46. Zharkov R.V. **2014**. *Thermal springs of the South Kuril Islands*. Vladivostok: Dal'nauka, 378. (In Russ., abstr. in Engl.)
47. Chaplygin I.V. **2009**. [Ore mineralization of high-temperature fumaroles of Kudryavy volcano (Iturup Island, Kuril Islands)]: [extended abstr... Cand. Sci. (Geol.-Miner.)]. Moscow, 24 p. (In Russ.)
48. Selyangin O.B. **2009**. *To the Mutnovsky and Gorely volcanoes: volcanological and traveller's guide*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Novaja kniga, 108 p. (In Russ.)
49. Panova L.A. **2012**. [Minerals of geothermal deposits of Dachnye springs of Mutnovsky volcano, Kamchatka]. *Metallurgy of Ancient and Modern Oceans*, 1: 78–81. (In Russ.)
50. Melekestsev I.V., Sulerzhitsky L.D. **1987**. [Ksudach volcano (Kamchatka) over the last 10 thousand years]. *Volcanology and Seismology*, 4: 28–39. (In Russ.)
51. Vlasova I.I., Kopanina A.V. **2021**. Peculiarities of selecting woody plants for anatomy analysis in various environments. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 946: 012048. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012048>
52. Bogolyubov A.S., Pankov A.B. **1996**. [The simplest method of geobotanical description of the forest: a guidance manual]. Moscow: Ecosystem, 17 p. (In Russ.)
53. Andreeva E.N., Bakkal I.Yu., Gorshkov V.V., et al. **2002**. [Methods for studying forest communities]. St. Petersburg: Komarov Botanical Institute of RAS, 240 p. (In Russ.)
54. Barykina R.P., Veselova T.D., Devyatov A.G., et al. **2004**. [Handbook of botanical microengineering: fundamentals and methods]. Moscow: Publ. House of Moscow State University, 312 p. (In Russ.)
55. Angyalossy V., Pace M.R., Evert R.F., Marcati C.R., Oskolski A.A., Terrazas T., Kotina E., Lens F., Mazzoni-Viveiros S.C., Angeles G., Machado S.R., Crivellaro A., Rao K.S., Junikka L., Nikolaeva N., Baas P. **2016**. IAWA list of microscopic bark features. *IAWA J.*, 37(4): 517–615. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160151>

56. Lotova L.I., Timonin A.K. **2005**. [*Anatomy of the Rosaceae bark: diversity, evolution, taxonomic significance*]. Moscow: KMK, 264 p. (In Russ.).
57. Eremin V.M., Kopanina A.V. **2012**. [*Atlas of the anatomy of the bark of trees, shrubs and lianas of Sakhalin and the Kuril Islands*]. Brest: Polygraphics, 896 p. (In Russ.).
58. Kopanina A.V. **2018**. Structural adaptations of *Spiraea beauverdana* (Rosaceae Juss.) in extreme conditions. In: *Materialy VI Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni B.N. Ugoleva, posvyashchennogo 50-letiyu Regional'nogo koordinatsionnogo soveta po sovremennym problemam drevesinovedeniya, Krasnoyarsk, 10–16 September*. Novosibirsk: SB RAS, p. 108–111. (In Russ., abstr. in Engl.).
59. Korovin V.V., Novitskaya L.L., Kurnosov G.A. **2003**. [*Structural stem anomalies of woody plants*]. Moscow: MGUL, 259 p. (In Russ.).
60. Novitskaya L.L. **2008**. *Karelian birch: mechanisms of growth and development of structural abnormalities*. Petrozavodsk, Verso, 144 p. (In Russ., abstr. in Engl.).
61. Talalueva L.V. **1983**. [Features of the anatomical structure of the stem bark of some species of the genus *Betula* (Betulaceae)]. *Botanical J.*, 70(4): 490–495. (In Russ.).
62. Talskikh A.I., Kopanina A.V., Vlasova I.I. **2019**. Structural features of the bark in young stems of *Betula ermanii* Cham. in the conditions of Yuzhno-Sakhalinsky mud volcano (Sakhalin Island). *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 324: 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012033>.
63. Kopanina A.V., Talskikh A.I., Vlasova I.I. **2018**. Features of the structure of the bark and wood of *Betula ermanii* (Betulaceae S.F. Gray) in island ecosystems. In: *Materialy VI Mezhdunarodnogo simp. imeni B.N. Ugoleva, posvyashch. 50-letiyu Regional'nogo koordinatsionnogo soveta po sovremennym problemam drevesinovedeniya, Krasnoyarsk, 10–16 September*. Novosibirsk: SB RAS, p. 111–115. (In Russ., abstr. in Engl.).
64. Evert R.F. **2006**. *Esau's plant anatomy: meristems, cells, and tissues of the plant body: their structure, function, and development*. 3rd ed. Canada, 601 p. <https://doi.org/10.1002/0470047380>.
65. Kopanina A.V. **2019**. Structure and formation of bark tissues of *Betula ermanii* (Betulaceae) in ontogenesis. In: *Plant anatomy: traditions and perspectives: Materials of the Intern. Symp. ded. to the 90th anniversary of Prof. Ludmila Ivanovna Lotova, Sept. 16–22. Pt 1*. Moscow: MAKSPress, p. 131–133. [https://msu-botany.ru/gallery/10-29003-m664-conf-lotova2019\\_part1.pdf](https://msu-botany.ru/gallery/10-29003-m664-conf-lotova2019_part1.pdf)

## Об авторах

**Ватсерionova Екатерина Олеговна** (<https://orcid.org/0000-0002-2280-083X>), научный сотрудник лаборатории экологии растений и геоэкологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, [katya.vatserionova.85@mail.ru](mailto:katya.vatserionova.85@mail.ru)

**Копанина Анна Владимировна** (<https://orcid.org/0000-0001-5354-3584>), кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории экологии растений и геоэкологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, [anna\\_kopanina@mail.ru](mailto:anna_kopanina@mail.ru)

**Власова Инна Ивановна** (<https://orcid.org/0000-0002-9365-266X>), старший научный сотрудник лаборатории экологии растений и геоэкологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, [iivlasova@gmail.com](mailto:iivlasova@gmail.com)

## About Authors

**Vatserionova, Ekaterina O.** (<https://orcid.org/0000-0002-2280-083X>), Researcher of the Laboratory of plant ecology and geocology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, [katya.vatserionova.85@mail.ru](mailto:katya.vatserionova.85@mail.ru)

**Kopanina, Anna V.** (<https://orcid.org/0000-0001-5354-3584>), Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Head of the Laboratory of plant ecology and geocology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, [anna\\_kopanina@mail.ru](mailto:anna_kopanina@mail.ru)

**Vlasova, Inna I.** (<https://orcid.org/0000-0002-9365-266X>), Senior Researcher of the Laboratory of plant ecology and geocology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, [iivlasova@gmail.com](mailto:iivlasova@gmail.com)

Поступила 17.08.2022

После доработки 20.11.2022

Принята к публикации 01.12.2022

Received 17 August 2022

Revised 20 November 2022

Accepted 1 December 2022

© Авторы 2022 г. Открытый доступ.  
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2022. Open access.  
Content is available under Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 581.522.5(571.64)

<https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.360-379>  
<https://www.elibrary.ru/saqhjo>

## Особенности структурного отклика коры и древесины березы плосколистной (*Betula platyphylla*, Betulaceae) в ландшафтах морских побережий, магматических и грязевых вулканов Сахалина и Курильских островов

А. И. Тальских\*, А. В. Копанина, И. И. Власова

\*E-mail: [anastasiya\\_talsk@mail.ru](mailto:anastasiya_talsk@mail.ru)

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

**Реферат.** Береза плосколистная (*Betula platyphylla*) одна из основных лесообразующих пород в Северо-Восточной Азии. На Дальнем Востоке России она формирует чистые и разнообразные смешанные леса. Благодаря высокой всхожести и темпам роста, неприхотливости, устойчивости к ветру, засухе, низким и высоким температурам береза плосколистная доминирует после сплошных рубок, пожаров, на пирокластических вулканических отложениях, а в дальнейшем создает благоприятные условия для восстановления зональных хвойных лесов. В настоящей работе изучены популяции березы плосколистной в различных условиях среднегорных массивов, морских побережий, активных магматических и грязевых вулканов юга Сахалина и Курильских островов. В каждом местообитании с 15 деревьев измерены возраст и высота деревьев, определены макро- и микропризнаки коры и древесины стволов по сколам, кернам и спилам. Результаты исследования показали, что для березы плосколистной под действием природного стресса характерно формирование низкорослого многоствольного дерева со значительными повреждениями и деформациями кроны, искривленными эксцентричными стволами и структурными прикорневыми аномалиями – капами и сувелями. На охотоморском побережье и в условиях грязевого вулкана на Сахалине выявлена структурная реакция коры и древесины березы плосколистной, свойственная многим древесным растениям в экстремальных местообитаниях, – уменьшение ширины коры и ее ежегодного прироста у старовозрастных деревьев. В условиях газогидротермальных проявлений магматических вулканов годичный прирост коры увеличивается до 2.7 раза по сравнению с нормой, что, вероятно, связано с молодым возрастом деревьев (10–20 лет). Полученные нами данные дополнительно обосновывают адаптивную значимость жизненной стратегии березы плосколистной как быстрорастущего древесного вида и показывают, что ширина коры древесных растений и величина ее ежегодного прироста могут служить функциональными показателями, характеризующими природные системы ландшафтов с различной степенью напряженности экологических факторов.

**Ключевые слова:** *Betula platyphylla*, жизненная форма, кора, ширина коры, скорость прироста, структурные аномалии, капы, сольфатары, вулканическая активность, грязевой вулкан

## Features of the structural response of the bark and wood of birch (*Betula platyphylla*, Betulaceae) in the landscapes of sea coasts, magmatic and mud volcanoes of Sakhalin and the Kuril Islands

Anastasiya I. Talskih\*, Anna V. Kopanina, Inna I. Vlasova

\*E-mail: [anastasiya\\_talsk@mail.ru](mailto:anastasiya_talsk@mail.ru)

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

**Abstract.** *Betula platyphylla* is one of the main forest-forming species in Northeast Asia. In the Russian Far East, it forms birch and diverse mixed forests. Due to high germinative ability and growth rates, unpretentiousness, resistance to wind, drought, low and high temperatures, *Betula platyphylla* dominates after clear-cutting, fires and on pyroclastic deposits of volcanoes, and further forms favorable conditions for the restoration of zone coniferous forests. This paper studies the populations of *Betula platyphylla* under the various conditions of mid-mountain massifs, sea shores, active magmatic and mud volcanoes in the south of Sakhalin and Kuril Islands. Tree age and height were measured and macro- and micro-characteristics of the bark and wood of stems were identified in each habitat from 15 trees using the

cleavages, cores and sections. The results of the study have shown that *Betula platyphylla* under the impact of natural stress is characterized by the formation of a low-growing multi-stemmed tree with significant damage and deformation of the crown, twisted eccentric stems and structural basal anomalies – woodknobs and gnarls. The structural reaction of the bark and wood of the *Betula platyphylla*, character for many woody plants adapted to extreme habitats, which manifests itself in a decrease in the bark thickness and its growth rate in mature trees was revealed on the Okhotsk coast and under the conditions of the mud volcano on Sakhalin. Under the conditions of gas-hydrothermal springs of magmatic volcanoes, the bark thickness growth rate increases up to 2.7 times compared to the norm, which is probably associated with the young age of trees (10–20 years). The data we have obtained additionally substantiate the adaptive significance of the life strategy of the *Betula platyphylla* as a fast-growing tree species and show that the bark thickness of woody plants and its growth rate can be the plant functional traits that characterize the natural landscape systems with varying degrees of intensity of ecological factors.

**Keywords:** *Betula platyphylla*, life-form, bark, bark thickness, growth rate, structural anomaly, woodknob, solfatara, volcanic activity, mud volcano

**Для цитирования:** Тальских А.И., Копанина А.В., Власова И.И. Особенности структурного отклика коры и древесины березы плосколистной (*Betula platyphylla*, *Betulaceae*) в ландшафтах морских побережий, магматических и грязевых вулканов Сахалина и Курильских островов. *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 4, с. 360–379. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.4.360-379>; <https://www.elibrary.ru/saqhjo>

**For citation:** Talskih A.I., Kopanina A.V., Vlasova I.I. Features of the structural response of the bark and wood of birch (*Betula platyphylla*, *Betulaceae*) in the landscapes of sea coasts, magmatic and mud volcanoes of Sakhalin and the Kuril Islands. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 4, pp. 360–379. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.4.360-379>; <https://www.elibrary.ru/saqhjo>

### Благодарности и финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (№ 121022500177-6).

Авторы выражают благодарность рецензентам за внимательное прочтение рукописи, советы и ценные замечания.

### Acknowledgements and Funding

The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS (№ 121022500177-6).

The Authors are grateful to the respected Reviewers for their careful reading of the manuscript, advices and valuable comments.

## Введение

Береза плосколистная (*Betula platyphylla* Sukaczew) является важным хозяйственным лесообразующим видом на Дальнем Востоке России. Этот вид значим как быстрорастущая порода, дающая древесинное сырье, а также как пищевое и лекарственное растение. Береза плосколистная успешно применяется в защитном лесоразведении, для создания ползащитных полос, лесных полос вдоль транспортных путей, а также в лесомелиоративных целях [1, 2]. В нарушенных коренных таежных лесах она благодаря своим эколого-биологическим особенностям формирует благоприятную среду для восстановительных процессов хвойных пород [3, 4].

На российском Дальнем Востоке площадь березовых лесов составляет 9 млн га, главные лесообразующие породы – береза плосколистная, береза ребристая, или желтая (*B. costata* Trautv.), береза даурская, или черная (*B. davurica* Pall.), береза каменная, или Эрмана (*B. ermanii* Cham.) [5]. Леса из плосколистной и каменной берез находятся на втором месте на Дальнем Востоке по занимаемой площади и составляют 8 % всех лесов [6]. Наи-

большее промышленное значение на Дальнем Востоке имеет береза плосколистная, образующая обычно чистые березовые, иногда березово-осиновые древостой кустарниковых и реже травяно-кустарниковых типов леса, с запасом до 200 м<sup>3</sup>/га [5].

Благодаря высокой экологической пластичности в отношении факторов среды и конкурентным преимуществам, береза участвует в составе почти всех типов леса: широколиственных (с кленом *Acer*, липой *Tilia*, дубом *Quercus*), смешанных, светлых хвойных (с лиственницей *Larix*) и темнохвойных (с елью *Picea* и пихтой *Abies*) [4, 7]. Береза плосколистная создает благоприятный полог для поселения под ним сосны кедровой (*Pinus*), ели, пихты, лиственницы и некоторых теневыносливых лиственных пород – липы, ильма (*Ulmus*), клена, граба (*Carpinus*) и др. [4]. При антропогенных или пирогенных сукцессиях восстановление зональных хвойных лесов, как правило, осуществляется через смену березы плосколистной. Чаще всего после вырубок или пожаров на всей территории ареала береза плосколистная образует чистые насаждения с примесью лиственницы Каяндера (*Larix*

*cajanderi* Mayr) [4, 7]. Береза плосколистная хоть и является светолюбивым растением, но не закрепляет за собой территории, пройденные рубками и пожарами. После смены хвойными породами в первом поколении эта береза в составе насаждений сохраняется в небольшом количестве (5–10 %), выполняя роль стабилизатора лесовосстановительной среды [3].

Сукцессионные смены с участием березы плосколистной, в том числе формирующей самостоятельные леса, в Северо-Восточной Азии возникали под влиянием вулканических извержений, уничтожавших хвойные леса [7]. Вулканический ландшафт является для березы плосколистной территорией экстремального произрастания и активного освоения наряду со специализированными экологическими группами растений, в том числе пионерными. Береза и другие древесные виды появляются в фитоценозах в процессе вулканогенных сукцессий на стадии образования ксеромезофитных сообществ с участием кустарников [7]. Значительное усложнение структуры сообществ происходит, когда начинают доминировать деревья, в частности лиственница и береза. При увеличении сомкнутости древостоя деревья играют все большую эдификаторную роль, под их пологом формируется покров из лесных мезофитов. Сообщества подобной структуры были отмечены на лавах 1500-летнего возраста, где сформировались лиственничные редколесья с участием березы плосколистной; при этом на лавовых потоках, выходящих на поверхность, все еще развиты синузии эпилитных лишайников [8]. В результате постоянной вулканической деятельности структура высотной поясности растительности горных вулканических массивов нередко оказывается нарушенной. К примеру, на восточном склоне Ключевского вулкана п-ова Камчатка на месте горнотаежного пояса елово-лиственничных лесов в настоящее время выражен пояс длительнопроизводных березняков из *B. platyphylla*, лиственничников из *L. cajanderi* [9].

Специфические стрессовые условия, свойственные ландшафтам грязевых и магматических вулканов, способствуют формированию у растений различных адаптивных механизмов, обеспечивающих приспособление их жизненных процессов к этим усло-

виям обитания. Деятельность вулканов, как магматических, так и грязевых, оказывает колоссальное воздействие на растительность, в том числе древесную, инициирует первичные и вторичные сукцессии [10–14]. Результатом эксплозивной деятельности вулканов могут быть полное или частичное уничтожение растительного покрова на территориях различной площади, повреждение растительности, изменение физических и химических свойств местообитаний [15]. Свойства атмосферного воздуха и подстилающего субстрата в зонах газогидротермальных проявлений позволяют рассматривать эти зоны как природную лабораторию для отбора видов и форм растений, устойчивых к воздействию токсичных газов и своеобразным эдафическим и микроклиматическим условиям [16]. Крупные грязевые вулканы состоят из обширного поля глинистых отложений с несколькими группами небольших эруптивных аппаратов (грифонов и сальз), через которые продукты грязевулканической деятельности постоянно выбрасываются на поверхность. На отложениях сопочной брекчии, сформированной вулканом на протяжении нескольких десятилетий и, вероятно, столетий, формируются различные по структурно-функциональным характеристикам сообщества с участием древесных растений, в том числе березы плосколистной [17, 18].

В пределах своего ареала, в том числе на о. Сахалин, береза плосколистная произрастает также на морских побережьях [19]. Растительность в таких местообитаниях формируется в условиях засоления субстрата и воздуха и под воздействием ряда механических факторов (ветер, затопление, нестабильность почв). К выживанию в таких условиях приспособляются лишь галофильные либо толерантные виды, устойчивые к засолению субстрата [20]. Так как Сахалин находится под влиянием холодных водных масс Охотского моря, на побережьях растительность подвергается действию сильных частых ветров с моря, холодных морских туманов, тайфунов и т.д. Ветер на побережьях холодных морей существенно влияет на внешний облик древесной растительности, нарушая нормальный рост деревьев, определяя наклон ствола, формируя однобокость кроны или плоскую,

так называемую флагообразную крону [21]. В лесах деревья с подветренной и штормовой стороны имеют в основном низкорослую, а некоторые стелющуюся жизненную форму. В местах, менее подверженных воздействию ветров и штормов, формируются деревья средней высоты [20].

Эколого-физиологическое состояние деревьев в различных природно-климатических районах успешно оценивают по данным о структуре коры и древесины [22–25]. В последние годы внимание исследователей сосредоточено на оценке структурных особенностей коры деревьев, ее макро- и микропризнаков, поскольку она является единственным барьером между растением и окружающей средой, а также важнейшей транспортной магистралью для синтезируемого растением углерода. Активно исследуется влияние различных экологических факторов (пожары, засухи, влияние экстремальных температур и т.д.) на внутреннюю структуру коры древесных растений [26–28]. Изучается структурная реакция коры древесных растений на последствия пожаров, в связи с тем, что относительная ширина коры существенно влияет на выживание деревьев под действием критически высоких температур [29–34].

Кора – комплекс высокоспециализированных клеток и тканей, располагающихся с внешней стороны от камбия и выполняющих защитную, проводящую, ассимиляционную синтетическую и запасующую функции [35]. Кора составляет значительную долю (от 5 до 28 %) общего объема дерева, эта доля зависит не только от древесной породы, но также от возраста дерева и условий роста [36]. Результаты наших исследований коры другого вида березы – березы каменной позволяют говорить о возможности использования данных о структуре коры для оценки адаптивного потенциала и экологической стратегии берез в экстремальных местообитаниях [37–40].

Целью настоящей работы является изучение структурных особенностей коры и древесины, в частности их ширины и скорости прироста, в стволах березы плосколистной на Сахалине и Курильских островах в различных экологических условиях, обусловленных влиянием холодного моря и современной вулканической деятельностью.

## Материал и методы исследования

### Объект исследования

Береза плосколистная, *Betula platyphylla*, относится к семейству березовые (*Betulaceae*), роду береза (*Betula*) [41]. Не все ботаники признают существование березы плосколистной как отдельного вида. В частности, И.Ю. Коропачинский [42, 43] утверждает, что территорию азиатской части России занимает единственный вид березы повислой *Betula pendula* Roth. А.К. Скворцов [44] считает наименование береза плосколистная синонимом наименования береза повислая. Китайские ученые относят березу плосколистную к отдельному виду, но в связи с нечеткими морфологическими признаками объединяют под этим названием следующие разновидности или отдельные виды: береза японская (*B. japonica* Thunb.), береза маньчжурская (*B. mandshurica* Nakai) и береза шехуанская (*B. szechuanica* (C.Schneid.) C.A. Jansson) [45]. Мы придерживаемся в данном случае систематической позиции В.А. Недолужко [46], которая обосновывает существование самостоятельного вида березы плосколистной (*B. platyphylla* Sukaczew) на российском Дальнем Востоке.

Береза плосколистная – мелколиственное листопадное дерево, высотой до 18–25 м, с диаметром стволов до 60 см и рыхлой кроной [2, 4]. Ствол прямой, с гладкой белой, реже светло-серой или розовато-белой корой, на старых стволах образуется темно- или черно-серая, продольно-груботрещиноватая корка. Имеет пирамидальную или овальную форму кроны с тонкими, раскидистыми, слегка свисающими или торчащими ветвями. Листья треугольно-яйцевидные или широкояйцевидные голые с усеченным основанием, 5–7 см длиной и 3–6 см шириной [1, 2, 41]. Вид однодомный. Опыляется ветром. Плод – плоский односемянный двукрылый орешек длиной от 1.5 до 2.5 мм [41]. Регулярное и обильное плодоношение начинается с 15–30 лет [2]. Предельный возраст составляет 120–140 лет [2, 4], отдельные деревья доживают до 200 лет [1].

Береза плосколистная широко распространена в Северо-Восточной Азии – в России, в северо-восточных районах Китая, в Монголии, Северной Корее и Японии (рис. 1) [1, 41, 45]. На территории России ареал вида охва-

тывает Восточную Сибирь, а именно южную часть Бурятии, Читинскую область, Якутию, встречается в Красноярском крае к востоку от р. Енисей; на Дальнем Востоке – Приамурье, Хабаровский край, Магаданскую область, юг Чукотки, п-ов Камчатка, о. Сахалин [1, 7, 47] и южные Курильские острова (Итуруп, Кунашир, Шикотан) [19, 48].

Береза плосколистная засухоустойчива, морозостойка и способна хорошо расти в различных условиях окружающей среды, в том числе экстремальных [41]. Предпочитает мощные среднеувлажненные почвы. Оптимальные почвенные условия для нее – аллювиальные суглинки. Корневая система березы плосколистной пластична и может приспосабливаться к различным условиям. В низменностях на тяжелых суглинистых почвах береза плосколистная образует поверхностную корневую систему, выдерживая сезонное переувлажнение [4].

Произрастает береза плосколистная в долинах, на склонах гор и на береговых морских террасах [7, 19]: на п-ове Камчатка поднимается в горы до 500–600 м над ур. м. до верхней границы лиственных редколесий [7]; на Сахалине и Курильских островах встречается не выше 300–350 м над ур. м. в хвойно-широколиственных, широколиственных и смешанных лесах [48]; на юге Приморья поднимается до 1000 м над ур. м., а севернее – не выше 600 м [49]. В Китае произрастает в широком высотном диапазоне 700–4200 м над ур. м. [45]. В Монголии доходит по склонам гор до 1000–1500 м над ур. м. [50].

#### *Сбор материалов, измерения*

Материал собран в ходе полевых и экспедиционных работ, проводившихся с 2015 по 2020 г. на Сахалине и Кунашире – в ландшафтах морских побережий Охотского моря, активных магматических и грязевых вулканов (рис. 1). В качестве образца из типичных (нормальных) условий произрастания береза плосколистная была отобрана на о. Сахалин в березняке ольхово-ивовом высокотравном в северо-западной части Сусунайской долины в междуречье притоков р. Сусуя – р. Магомедка и р. Пута, а также в березняке разнотравном с участием высокотравья у западного подножья горы Большевик Сусунайского хребта (рис. 1, 2 а). В приморских ландшафтах береза пло-

сколистная описана в дубняке вейниково-высокотравном на охотском побережье Сахалина вблизи оз. Русское (рис. 1, 2 с); на Южно-Сахалинском грязевом вулкане (ЮСГВ) – в березово-ольховом бамбучково-высокотравном лесу на юго-западной границе современного эруптивного центра вулкана (рис. 1, 2 b) и в березняке бамбучково-высокотравном в 500 м на северо-запад от современного эруптивного центра на левом берегу р. Алат, притока р. Сусуя. В ландшафтах магматических вулканов Курильских островов исследуемый вид описан на о. Кунашир с кальдеры влк. Головнина и влк. Менделеева. В ландшафтах кальдеры Головнина образцы березы плосколистной были собраны в кедровостланиковом багульниково-кустарниковом сообществе в 60 м на юго-восток от оз. Кипящее и в 150 м от юго-восточного участка Центрального Восточного сольфатарного поля (рис. 1, 2 d), на влк. Менделеева – на границе елово-пихтового бамбучкового леса на берегу правого борта среднего течения ручья Кислый вблизи Нижнеменделеевских источников (рис. 1, 2 e).

В исследуемых сообществах с участием березы плосколистной отбор образцов провели на пробных площадях размером 10×10 м в кустарниковых сообществах и 20×20 м в лесных сообществах. В границах пробных площадей на 15 деревьях определяли следующие признаки: жизненная форма, степень повреждения кроны, наличие корки и ее морфологическая структура, диаметр стволов. Определение жизненных форм изучаемого объекта проводили по И.Г. Серебрякову [51]. Высоту деревьев измеряли при помощи электронного высотомера Haglof, диаметр стволов – мерной вилкой Haglof. Степень повреждения крон оценивали, вычисляя процент поврежденных скелетных (крупных) ветвей от общего числа таких ветвей в кроне.

В каждом местообитании с 15 деревьев взяли сколы и керны стволов на высоте 50 см от почвы. Сколы брали с корой и древесиной шириной 2–2.5 см. Керны стволов отбирали при помощи возрастного бура Haglof. Также в каждом местообитании были сделаны спилы стволов разного возраста с 3 модельных деревьев. Спилов после сушки в комнатных условиях полировали шлифовальной машинкой. Все сколы со стволов и спилов стволов фиксировали в день сбора в 96 %-м этаноле и глицерине

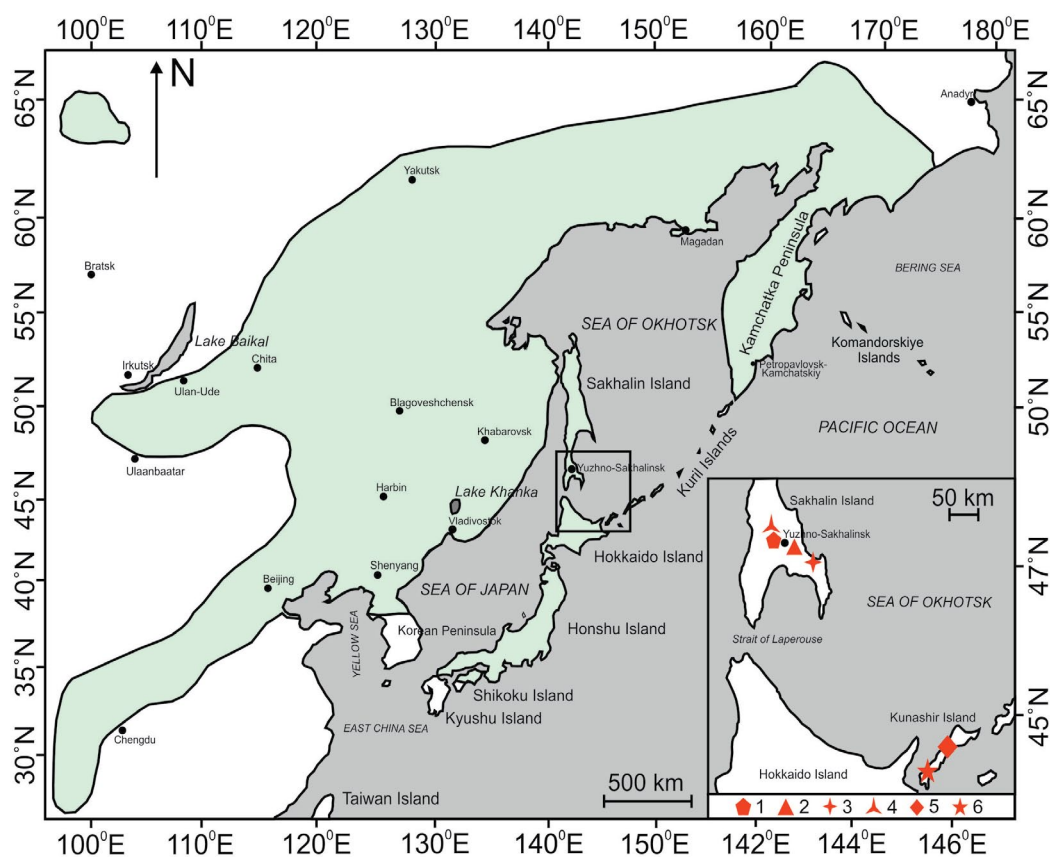
в соотношении 3:1 и выдерживали в этой смеси не менее 2 мес.

#### Лабораторный анализ образцов методами световой микроскопии

Лабораторный анализ образцов выполнен в лаборатории экологии растений и геоэкологии Института морской геологии и геофизики ДВО РАН. На спилах, сколах и кернах стволов в лаборатории определяли возраст и измеряли ширину коры (по 3 промера на каждое дерево) на стереоскопическом микроскопе МСП-1 (ЛОМО, Россия). Ширину древесины опреде-

ляли по радиусу ствола от сердцевины до камбия (по 2 промера на каждое дерево). Возраст деревьев устанавливали путем подсчета годовичных приростов древесины на спилах стволов модельных деревьев и на стволовых кернах, используя стереоскопический микроскоп МСП-1 (ЛОМО, Россия).

Перед изготовлением микросрезов образцы коры стволовой части выдерживали в воде от 12 до 24 ч для удаления из тканей этанола и глицерина. Поперечные, радиальные и тангентальные срезы толщиной 10–25 мкм изготавливали на санном микротоме НМ 430с



**Рис. 1.** Ареал *Betula platyphylla* [7, 19, 41, 45, 47, 48]. На схеме обозначены места сбора образцов: (1) березняк ольхово-ивовый высокотравный в северо-западной части Сусунайской долины в междуречье притоков р. Сусуя – р. Магомедка и р. Пуа (типичные условия); (2) березняк разнотравный в предгорье западного склона Сусунайского хребта, подножье горы Большевик (типичные условия); (3) дубняк веяниково-высокотравный на охотском побережье вблизи оз. Русское; (4) березняк ольховый бамбучково-высокотравный и березняк бамбучково-высокотравный на Южно-Сахалинском грязевом вулкане; (5) елово-пихтовый бамбучковый лес в среднем течении ручья Кислый вблизи Нижнеменделеевских источников влк. Менделеева; (6) кедровостланниково-багульниково-кустарниковое сообщество вблизи юго-восточного участка Центрального Восточного сольфатарного поля кальдеры влк. Головинина.

**Fig. 1.** Natural habitat of *Betula platyphylla* [7, 19, 41, 45, 47, 48]. The layout shows the sampling sites: (1) birch alder-willow tall-grass forest in the northwestern part of the Susunai Valley between the tributaries of Susuya River – Magomedka River and Puta River (typical conditions); (2) birch forest with tall herbs in the foothills of the western slope of the Susunai Range, foothills of Mount Bolshevik (typical conditions); (3) reed-tall-grass oak forest, on the Okhotsk coast near Russkoye Lake; (4) birch-alder bamboo-tall grass and birch bamboo forest with tall grass in the landscapes of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano; (5) spruce-fir bamboo forest in the middle flow of the Kislyy stream near the Nizhnemendelevskie springs of Mendelev volcano; (6) dwarf pine wild rosemary phytocenosis in the vicinity of the southeastern part of the Central Eastern solfataric field of the caldera of Golovnin volcano.

с замораживающим столиком (Thermo Scientific, США). Полученные срезы окрашивали сафранином и нильским синим [52], а затем обезвоживали и промывали в растворах возрастающих концентраций этанола. Заключительную дегидратацию проводили в ксилоле и заключали в синтетическую монтирующую среду. Для каждого местообитания изготовили 20 постоянных микропрепаратов коры. Постоянные микропрепараты анализирова-

ли на световом микроскопе Axio Scope.A1 (Carl Zeiss, Германия). Для качественного и количественного анализа, а также для изготовления микрофотографий использовали программу ZEN 2. Трактовку терминов коры выполняли по методическим рекомендациям International Association of Wood Anatomists (IAWA) [53]. Кору взрослого дерева разделяют на две части – внутреннюю и внешнюю, различающиеся анатомическим строени-



**Рис. 2.** *Betula platyphylla* в различных местообитаниях: (а) предгорье западного склона Сусунайского хребта, подножье горы Большевик на о. Сахалин; (б) юго-западная граница современного эруптивного центра Южно-Сахалинского грязевого вулкана на о. Сахалин; (с) охотское побережье вблизи оз. Русское на о. Сахалин; (д) на берегу оз. Кипящее в 150 м от юго-восточного участка Центрального Восточного сольфатарного поля, кальдера влк. Головнина на о. Кунашир; (е) среднее течение ручья Кислый вблизи Нижнеменделеевских источников, влк. Менделеева на о. Кунашир.

Фото: а, d, e – А.И. Тальских; b, c – А.В. Копаниной.

**Fig. 2.** *Betula platyphylla* in various habitats: (a) the foothills of the western slope of the Susunai Range, the foothills of Mount Bolshevik on Sakhalin Island; (b) southwestern boundary of the modern eruptive center of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano, Sakhalin Island; (c) the Okhotsk coast near Russkoye Lake, Sakhalin Island; (d) on the shore of Kipyashcheye Lake, 150 m from the southeastern part of the Central Eastern solfataric field, the caldera of Golovnin volcano, Kunashir Island; (e) the middle flow of the Kisly stream near the Nizhmemendelevskie springs, Mendelev volcano, Kunashir Island. Photo: a, d, e – by A.I. Talskih; b, c – by A.V. Kopanina.

ем и функциями. Внутренняя кора включает в себя флоэму, наружная – корку (ритидом) (у старовозрастных деревьев) или только перидерму и кортекс (в случае его сохранения в коре) (рис. 3) [35, 53].

#### Статистическая обработка

Статистическая выборка для каждого признака коры составляла 45 измерений, а для признаков древесины 30 измерений по каждому местообитанию.

Структурные показатели коры, древесины и стебля в целом определяли исходя из следующих соотношений:

средняя величина прироста коры в год – ширина коры (мм) / возраст стебля (ствола), или возраст дерева (лет) [33, 34];

относительная ширина коры – ширина коры (мм) / внутренний диаметр стебля (мм) [33, 34];

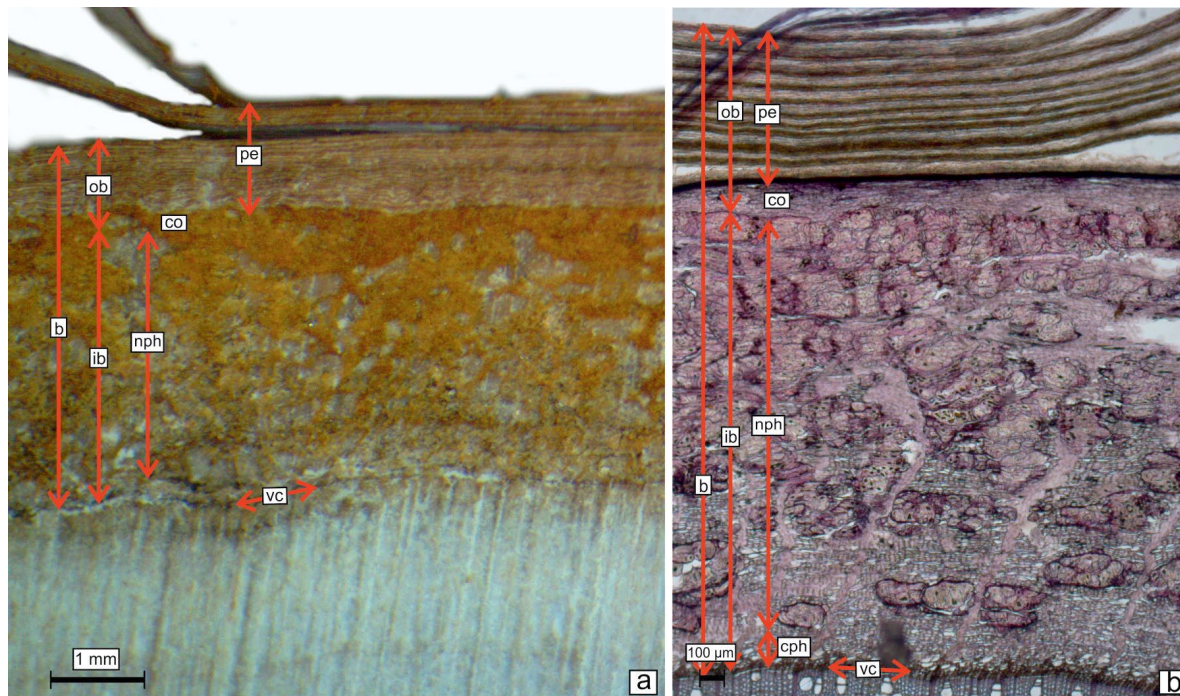
средняя величина прироста древесины в год – ширина древесины (мм) / возраст стебля (ствола), или возраст дерева (лет) [33, 34];

коэффициент эксцентричности стволов – максимальный радиус стебля (мм) / минимальный радиус стебля (мм) [38].

Статистический анализ проводили стандартными методами [54, 55]. Для каждого местообитания провели анализ признаков коры и древесины для расчета среднего значения, границы математического ожидания для среднего значения и коэффициента вариации. Границы математического ожидания вычисляли с помощью *t*-распределения Стьюдента (для доверительной вероятности 95 %). Чтобы оценить, есть ли разница в значениях признака в экстремальных местообитаниях и типичных, мы оценили средние значения выборок путем сравнения границ математического ожидания для средних. Если границы математического ожидания не пересекались, то считали, что средние различны. Таким образом, мы сравнили средние значения каждого признака в экстремальных местообитаниях с типичными (см. таблицу).

### Результаты исследования

В типичных условиях на юге о. Сахалин *Betula platyphylla* исследована нами в двух фитоценозах: березняке ольхово-ивовом высоко-



**Рис. 3.** Структура коры *Betula platyphylla*: (а) микрофотография в отраженном свете при увеличении 10х; (б) микрофотография коры молодого ствола в проходящем свете с применением красителей при увеличении 50х. Обозначения: b – кора; co – кортекс; cph – проводящая флоэма; ib – внутренняя кора; np – непроводящая флоэма; ob – внешняя кора; pe – перидерма; vc – камбий.

**Fig. 3.** Structure of the bark of *Betula platyphylla*: (a) micrograph in reflected light at 10x magnification; (b) micrograph of the bark of a young trunk in transmitted light with the use of dyes at a magnification of 50x. Designations: b – bark; co – cortex; cph – conductive phloem; ib – inner bark; np – nonconductive phloem; ob – outer bark; pe – periderm; vc – cambium.

**Таблица.** Характеристики скелетных стеблей (стволов и стволиков) березы плосколистной (*Betula platyphylla*), произрастающей в различных экологических условиях Сахалина и Курильских островов

**Table.** Characteristics of main stems (mature stems and trunks) of *Betula platyphylla*, growing under the various environmental conditions of Sakhalin and Kuril Islands

| Место сбора                    | Сахалин                                |                           |                                             |                                    |                                                                   |                                                                      | Кунашир                                                                                   |  |
|--------------------------------|----------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|                                | Суеунайская долина                     | Подножье г. Большевик     | ЮСГВ (юго-западная граница грязевого поля)  | ЮСГВ, (левобережье р. Алат)        | Охотское побережье, оз. Русское                                   | Влк. Менделеева, среднее течение р. Кислый                           | Влк. Головинна, побережье оз. Кипящее                                                     |  |
| Дата сбора (число, месяц, год) | 11.09.2018                             | 02.09.2020                | 15.10.2015                                  | 25.10.2018                         | 01.10.2010                                                        | 29.07.2019                                                           | 28.07.2019                                                                                |  |
| Координаты столпожения         | N 47°2'55<br>E 142°40'12               | N 46°56'45<br>E 142°46'11 | N 47°4'49<br>E 142°34'38                    | N 47°05'06<br>E 142°34'25          | N 46°47'17<br>E 143°21'18                                         | N 43°59'52<br>E 145°46'03                                            | N 43°51'46<br>E 145°30'5                                                                  |  |
| Высота над уровнем моря, м     | 77                                     | 141                       | 284                                         | 260                                | 6                                                                 | 103                                                                  | 144                                                                                       |  |
| Растительное сообщество        | Березняк ольхово-ивовый высокоотравный | Березняк разноотравный    | Березняк ольховый бамбучково-высокоотравный | Березняк бамбучково-высокоотравный | Дубняк вейниково-высокоотравный с участием <i>Larix cajanderi</i> | Ельник пихтовый бамбучковый с участием <i>Duschekia maximowiczii</i> | Кедровостлианиково-багульниково-кустарниковое сообщество с участием <i>B. platyphylla</i> |  |
| Жизненная форма                | Одноствольное дерево                   | Одноствольное дерево      | Одноствольное дерево                        | Одноствольное дерево               | Низкорослое одноствольное или многоствольное дерево               | Низкорослое одноствольное или многоствольное дерево                  | Низкорослое многоствольное дерево                                                         |  |
| Возраст, лет                   | 55–57                                  | 77–85                     | 49–55                                       | 76–80                              | 73–80                                                             | 12–15                                                                | 16–22                                                                                     |  |
| Высота, м                      | 17–19                                  | 16–20                     | 10–12                                       | 18–20                              | 3.5–4.5                                                           | 3.5–4                                                                | 2.0–2.5                                                                                   |  |
| Сомкнутость крон               | 0.6                                    | 0.7                       | 0.3–0.4                                     | 0.6                                | 0.5                                                               | 0.5–0.6                                                              | –                                                                                         |  |
| Повреждение кроны, %           | 5                                      | 5                         | 10–15                                       | 5                                  | 40–50                                                             | 50–60                                                                | 40–60                                                                                     |  |
| Структурные аномалии ствола    | –                                      | –                         | –                                           | –                                  | Прикорневые капы и сувели                                         | Группы спящих почек в прикорневой зоне                               | Группы спящих почек в прикорневой зоне                                                    |  |
| Наличие корки (ритидом)        | Есть                                   | Есть                      | Нет                                         | Есть                               | Есть                                                              | Нет                                                                  | Нет                                                                                       |  |
| Диаметр ствола, см             | 24.5–25.3                              | 35.8–37.1                 | 12.4–13.6                                   | 36.5–37.4                          | 15.7–19.0                                                         | 5.1–6.9                                                              | 3.3–3.7                                                                                   |  |
| Коэффициент ксцентричности     | 1.13                                   | 1.43                      | 1.24                                        | 1.65                               | 2.21                                                              | 1.76                                                                 | 1.82                                                                                      |  |
| Ширина коры, мм                | 5.36±0.32 / 0.15                       | 9.01±0.67                 | 3.91±0.22 / 0.11*                           | 9.77±0.56 / 0.16                   | 4.51±0.22 / 0.13*                                                 | 3.54±0.47 / 0.23*                                                    | 2.64±0.13 / 0.12*                                                                         |  |
| Ширина внешней коры, мм        | 1.41±0.16 / 0.25                       | 2.46±0.32 / 0.21          | 0.91±0.12 / 0.23*                           | 2.36±0.27 / 0.24                   | 1.07±0.14 / 0.22                                                  | 0.56±0.05 / 0.16*                                                    | 0.48±0.06 / 0.25*                                                                         |  |

|                                     |                    |                     |                    |                     |                     |                    |                    |
|-------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Ширина внутренней коры, мм          | 4.00±0.24 / 0.14   | 6.51±0.36 / 0.15    | 3.05±0.14 / 0.09*  | 7.38±0.32 / 0.12*   | 3.43±0.45 / 0.23    | 3.04±0.24 / 0.15*  | 2.12±0.18 / 0.18*  |
| Ширина древесины по радиусу, мм     | 107.94±3.48 / 0.04 | 165.65±14.20 / 0.18 | 62.59±2.18 / 0.07* | 182.63±12.22 / 0.15 | 77.46±14.09 / 0.30* | 23.46±2.95 / 0.21* | 15.13±1.12 / 0.17* |
| Ширина прироста коры в год, мм      | 0.10±0.01 / 0.04   | 0.11±0.01 / 0.21    | 0.07±0.01 / 0.11*  | 0.12±0.01 / 0.16    | 0.06±0.003 / 0.13*  | 0.27±0.04 / 0.23*  | 0.15±0.01 / 0.12*  |
| Ширина прироста древесины в год, мм | 1.93±0.06 / 0.15   | 2.06±0.18 / 0.18    | 1.21±0.04 / 0.07*  | 2.32±0.16 / 0.15    | 1.06±0.19 / 0.30*   | 1.80±0.23 / 0.21   | 0.83±0.06 / 0.17*  |
| Относительная ширина коры           | 0.02±0.003 / 0.16  | 0.02±0.002 / 0.21   | 0.03±0.002 / 0.12* | 0.03±0.002 / 0.24*  | 0.03±0.005 / 0.25*  | 0.08±0.009 / 0.19* | 0.09±0.009 / 0.22* |

Примечания. Средняя арифметическая величина ± границы математического ожидания / коэффициент вариации. Звездочкой отмечены средние значения, отклоняющиеся от значений типичных местообитаний. Прочерк – признак отсутствия.

Notes. Arithmetic mean ± confidence interval / coefficient of variation. The asterisk marks the mean values deviating from the values of typical habitats. Dash – the characteristics is absent.

травном в северо-западной части Сусунайской долины и березняке разнотравном у подножья горы Большевик в центральной части Сусунайской долины.

В первом фитоценозе береза плосколистная формирует древесный ярус вместе с ольхой волосистой *Alnus hirsuta* (Spach) Rupr. и ивой козьей *Salix caprea* L. Береза плосколистная в этом фитоценозе представлена одноствольными, пряморастущими деревьями. Их высота достигает 19 м, а диаметр стволов 25.3 см в возрасте 55–57 лет (см. таблицу). Кроны берез равномерные, раскидистые, сформированы в верхней половине и верхней трети ствола, без повреждений. Ствол покрыт перидермой белесо-серого цвета, у основания наблюдается почти сплошная мелкочешуйчатая корка (ритидом) темно-серого цвета, вверх по стволу до одного метра корка сформирована локальными участками в местах отмерших ветвей и повреждений (рис. 4 а). Ширина коры березы плосколистной в этом местообитании составляет в среднем 5.04–5.68 мкм (рис. 5 а). Внутренняя часть коры занимает 75 %, а внешняя – 25 % от общей ширины коры. Скорость ежегодного прироста коры оценена в 0.09–0.11 мкм, древесины – 1.87–1.99 мкм (см. таблицу; рис. 5 б). Относительная ширина коры березы 0.02.

Во втором фитоценозе береза плосколистная формирует древесный ярус вместе с ольхой волосистой. Березы одноствольные, прямые, высотой от 16 до 20 м, диаметр стволов не более 44 см при возрасте от 77 до 85 лет (рис. 2 а; таблица). Кроны с незначительными повреждениями нижних ветвей занимают половину высоты деревьев. Перидерма серо-белого цвета с коричневыми и розоватыми пятнами от покрывающих поверхность ствола лишайников. У основания и по стволу локальными участками образуется мелкочешуйчатая корка темно-серого цвета. Вся корка имеет раневое происхождение, в том числе в местах отпавших ветвей. У большинства деревьев в основании ствола имеется прикорневая поросль. Ширина коры березы плосколистной в рассматриваемом фитоценозе составляет в среднем от 8.34 до 9.68 мкм (рис. 5 а). Доля ширины внутренней части коры в общей ширине коры 72 %, а внешней – 28 %. Скорость ежегодного прироста коры в этом местообитании в среднем 0.1–0.12 мкм, древесины 1.88–2.24 мкм (рис. 5 б). Относительная ширина коры равна 0.02 (см. таблицу).

На охотском побережье о. Сахалин береза плосколистная участвует в дубовом вейниково-высокотравном сообществе с участием лиственницы Каяндера. В этих условиях она представлена одноствольным или многоствольным низкорослым деревом высотой 3.5–4.5 м, со значительным искривлением ствола у основания или менее выраженным искривлени-

ем по всей его высоте (рис. 2 с). В основании стволов имеются капы и сувели. Диаметр основных скелетных осей деревьев достигает 20 см, их возраст 73–80 лет, а дополнительно формирующихся скелетных осей – 45 лет. Стволы покрыты перидермой светло-розового цвета, и у комля локальными участками сформирована корка бурого цвета (рис. 4 б).

Стволы с выраженной эксцентricностью 2.21. Крона флагообразная, повреждена на 30–50 % за счет усыхания крупных ветвей со стороны моря. В условиях морского побережья ширина коры березы плосколистной меньше нормы в предгорье западного склона Сусунайского хребта в 2 раза, при этом возраст рассматриваемых деревьев находится в одном диапазоне (см. таблицу; рис. 5 а). Процентное соотношение ширины внутренней и внешней коры к общей ширине коры в условиях морского побережья соответствует типичным местообитаниям. Скорость ежегодного прироста коры в условиях морского побережья меньше нормы в 2 раза; а древесины – на 49 % (рис. 5 б). Относительная ширина коры в рассматриваемых условиях несколько больше значений в типичных условиях (см. таблицу).

На юго-западной границе современного эруптивного центра ЮСГВ береза плосколистная участвует в сложении березово-ольхового бамбучково-высокоствольного леса и формирует древесный ярус совместно с березой каменной и ольхой волосистой. Береза плосколистная представлена одноствольными деревьями высотой 10–12 м, с диаметром стволов 12.4–13.6 см и возрастом 49–55 лет (рис. 2 б). Крона деревьев сформирована в верхней трети ствола, повреждена на 10–15 %. Стволы деревьев покрыты перидермой светло-бурого цвета с белыми пятнами, корка отсутствует (рис. 4 с). Ширина коры деревьев на 27 % меньше, чем в норме на Сусунайской низменности при близких значе-



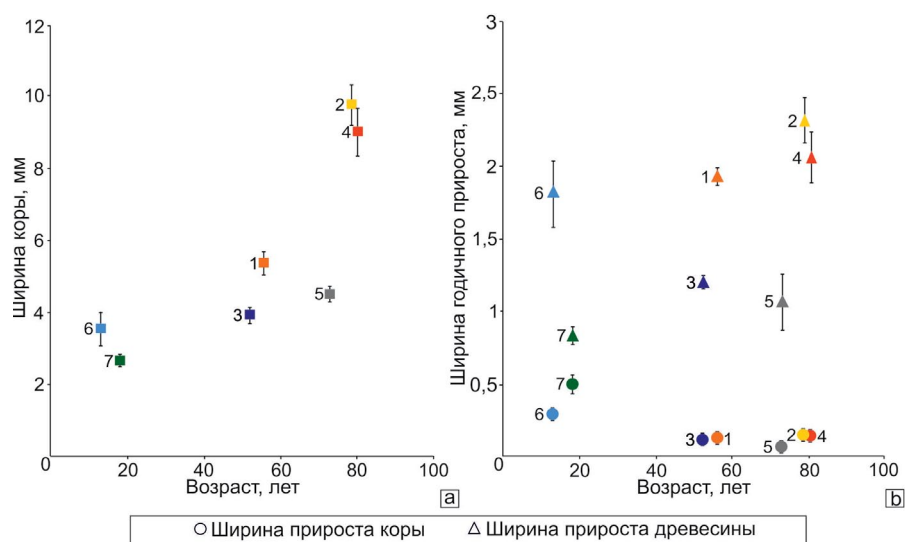
**Рис. 4.** Поверхность коры, спилы стволов и стволиков *Betula platyphylla* в исследованных местообитаниях: (а) предгорье западного склона Сусунайского хребта, подножье горы Большевик, о. Сахалин; (б) охотское побережье вблизи оз. Русское, о. Сахалин; (с) юго-западная граница современного эруптивного центра Южно-Сахалинского грязевого вулкана, о. Сахалин; (д) левобережье р. Алат в ландшафтах Южно-Сахалинского грязевого вулкана, о. Сахалин; (е) среднее течение ручья Кислый вблизи Нижнеменделеевских источников, влк. Менделеева, о. Кунашир; (ф) на берегу оз. Кипящее, в 150 м от юго-восточного участка Центрального Восточного сольфатарного поля, кальдера влк. Головнина, о. Кунашир.

**Fig. 4.** Bark surface, stem and trunk sections of the *Betula platyphylla* in study habitats: (a) the foothills of the western slope of the Susunai Range, the foothills of Mount Bolshevik on Sakhalin Island; (b) the Okhotsk coast near Russkoye Lake, Sakhalin Island; (c) southwestern boundary of the modern eruptive center of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano, Sakhalin Island; (d) left bank of the Alat River in the landscapes of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano, Sakhalin Island; (e) the middle flow of the Kislyy stream near the Nizhne-mendelevskiy springs, Mendelev volcano, Kunashir Island; (f) on the shore of Kipyashcheye Lake, 150 m from the southeastern part of the Central Eastern solfataric field, the caldera of Golovnin volcano, Kunashir Island.

ниях возраста деревьев (см. таблицу; рис. 5 а). Соотношение ширины внутренней и внешней коры и общей ширины коры идентично соотношению в типичных условиях. Скорость ежегодного прироста коры меньше нормы на 30 %, скорость ежегодного прироста древесины – на 37 % (см. таблицу; рис. 5 б).

В ландшафтах ЮСГВ береза плосколистная описана еще в одном сообществе – березово-бамбучковом с участием высокотравья, которое располагается в 500 м на северо-запад от современного эруптивного центра на левом берегу р. Алат. Береза плосколистная там формирует древесный ярус вместе с березой каменной. Рассматриваемый вид в этом сообществе представлен крупными одноствольными деревьями, ствол которых на высоте 10–12 м раздваивается. Деревья высотой до 20 м с диаметром стволов до 40 см в возрасте 76–80 лет. Крона деревьев раскидистая, сформирована в верхней трети ствола с незначительными повреждениями (см. таблицу). Ствол берез покрыт перидермой белосерого цвета, отслаивающейся тонкими лентами, в нижней части ствола фрагментарно представлена крупночешуйчатая корка (рис. 4 d). Ширина коры деревьев не отличается от таковой в норме (см. таблицу; рис. 5 а). Процентное отношение внутренней и внешней ширины коры к общей ширине коры, а также скорость ежегодного прироста коры и древесины в данных условиях соответствуют типичным (рис. 5 б). Относительная ширина коры березы плосколистной в двух рассматриваемых местообитаниях на ЮСГВ немного больше, чем в нормальных условиях (см. таблицу).

На о. Кунашир в кальдере влк. Головнина береза плосколистная участвует в формировании несомкнутого кедровостланиково-багульниково-кустарникового сообщества на побережье внутрикальдерного оз. Кипящее на гидротермально-измененных породах сольфатарного поля. В наших сборах она представлена низкорослым многоствольным молодым деревом, с двумя живыми и тремя отмершими стволами, прижатыми к почве и часто искривленными, с группами спящих почек в прикорневой зоне (рис. 2 d). На двух отмерших стволах по одному побегу формирования. Стволики с выраженной эксцентричностью, равной 1.82. Высота такой жизненной формы



**Рис. 5.** Макропризнаки коры и древесины стволов *Betula platyphylla* в различных экологических условиях Сахалина и Курильских островов: (а) ширина коры, (б) ширина годичного прироста коры и древесины. Местообитания: (1) северо-западная часть Сусунайской долины в междуречье притоков р. Сусуя – р. Магомедка и р. Пута, о. Сахалин; (2) предгорье западного склона Сусунайского хребта, подножье горы Большевик, о. Сахалин; (3) юго-западная граница современного эруптивного центра ЮСГВ, о. Сахалин; (4) левобережье р. Алат, ландшафт ЮСГВ, о. Сахалин; (5) охотское побережье вблизи оз. Русское, о. Сахалин; (6) среднее течение ручья Кислый вблизи Нижнеменделеевских источников, влк. Менделеева, о. Кунашир; (7) на берегу оз. Кипящее, в 150 м от юго-восточного участка Центрального Восточного сольфатарного поля, кальдера влк. Головнина, о. Кунашир.

**Fig. 5.** Macro-characteristics of the bark and wood of *Betula platyphylla* stems under the various environmental conditions of Sakhalin and the Kuril Islands: (a) bark thickness; (b) width of bark and wood growth rate. Habitats: (1) northwestern part of the Susunay Valley between the tributaries of the Susuya River – the Magomedka River and the Puta River, Sakhalin Island; (2) the foothills of the western slope of the Susunai Range, the foothills of Mount Bolshevik, Sakhalin Island; (3) southwestern boundary of the modern eruptive center of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano, Sakhalin Island; (4) left bank of the Alat River in the landscapes of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano, Sakhalin Island; (5) Okhotsk coast near Russkoye Lake, Sakhalin Island; (6) the middle flow of the Kislyy stream near the Nizhnemendeleevskie springs, Mendeleev volcano, Kunashir Island; (7) on the shore of Kipyashcheye Lake, 150 m from the southeastern part of the Central Eastern solfataric field, the caldera of Golovnin volcano, Kunashir Island.

березы не превышает 2.5 м (рис. 2 е). Скелетные оси диаметром до 3.7 см, возрастом до 22 лет. Стволики покрыты отслаивающейся тонкими лентами перидермой буро-серого цвета, корка отсутствует (рис. 4 е). Крона повреждена на 40–60 % за счет усыхания части скелетных осей.

На влк. Менделеева береза плосколистная участвует в сложении елово-пихтового бамбучкового леса с примесью ольховника Максимовича (*Duschekia maximowiczii* (Callier) Rouza) в непосредственной близости от Нижнеменделеевских источников. Здесь березы представлены низкорослыми одноствольными или многоствольными молодыми (возраст 12–15 лет) деревьями, с группами спящих почек в прикорневой зоне, высотой до 4 м, с диаметром стволов до 7 см. Поверхности стволов на 10 % поражены термальными и химическими ожогами. На стволе раны, затянутые перидермой. Перидерма бурого цвета, отслаивающаяся тонкими лентами (рис. 4 ф). Крона повреждена на 50–60 % за счет усыхания части скелетных осей, на листьях в нижней части кроны обнаружены ожоговые поражения (см. таблицу). В ходе экспедиций, проведенных с 2006 по 2019 г., нами не было найдено здесь деревьев березы плосколистной старше 25 лет. Можно предположить, что стволы березы в 20–25 лет усыхают, а в прикорневой зоне из спящих почек формируются новые скелетные оси. Это же явление мы наблюдали в ландшафтах влк. Головнина, где береза плосколистная также представлена низкорослой многоствольной экологической формой с группами спящих почек в прикорневой зоне. Ширина коры берез в ландшафтах вулканов Головнина и Менделеева меньше нормы в связи с небольшим возрастом деревьев (см. таблицу). Ширина внутренней коры по отношению к общей ширине коры составляет 82–85 %. По сравнению с нормой у молодых особей березы плосколистной в этих условиях процентное соотношение ширины внутренней коры к общей ширине коры увеличено, а ширины внешней коры – уменьшено на 8–10 %. Скорость ежегодного прироста коры больше нормы на влк. Головнина в 1.5 раза, а на влк. Менделеева в 2.7 раза (рис. 5 а). Скорость ежегодного прироста древесины на влк. Головнина меньше нормы в 2.3 раза, а на влк. Менделеева соответствует норме. Коэф-

фициент эксцентricности ствола в условиях вулканов больше нормы на 19–21 % (рис. 5 б). Относительная ширина коры также больше нормы (см. таблицу).

## Обсуждение результатов

В результате анализа собранного материала выявлено, что береза плосколистная на обследованных участках в условиях Сахалина и Кунашира может формировать первый ярус, а в форме низкорослого одноствольного или многоствольного дерева с различными искривлениями ствола и стволиков занимать подчиненное положение в лесных сообществах или встречаться единично среди кустарниковых группировок. Так, на юго-западной границе современного эруптивного центра ЮСГВ, где береза плосколистная отобрана в максимальном приближении к грязевому полю вулкана, в возрасте 49–55 лет высота деревьев рассматриваемого вида ниже, чем в типичных условиях. Здесь береза плосколистная произрастает на грязевулканической брекчии, образовавшейся после крупных извержений вулкана 1959, 1966 и 1979 гг., которая спустя годы сохраняет щелочность с содовым засолением, повышенное содержание редкоземельных и тяжелых металлов [56]. Щелочность почвенного раствора определяется высоким содержанием основных солей, в частности карбонатов и гидрокарбонатов. Соли повышают осмотическое давление почвенного раствора и создают условия физиологической засухи для растений. При этом увеличиваются значения соотношения связанной и свободной воды и повышается осмотический потенциал растительной клетки [57]. Мы полагаем, что в таких условиях в многолетнем режиме у древесных растений, в том числе березы плосколистной, замедлен фотосинтез и синтез структурных углеводов и белков.

На охотском побережье, где наблюдаются сильные ветра, туманы с моря и засоленность субстрата и воздуха, береза плосколистная представлена низкорослым деревом до 4.5 м высотой (см. таблицу). Близкая экологическая форма березы плосколистной наблюдается также вблизи газогидротермальных проявлений вулканов Менделеева и Головнина, которые характеризуются выделением сернистого газа и паров воды с примесью углекислого

газа, азота, серосодержащих и других веществ. В условиях морского побережья и газогидротермальной деятельности вулканов отчетливо выражена эксцентричность стволов и стволиков, за счет различной ширины годичных приростов древесины по окружности (см. таблицу). Эксцентричность скелетных осей может быть обусловлена неравномерным или однонаправленным воздействием негативных абиотических факторов, связанных с экспозицией склона, направлением преобладающих ветров и других микроклиматических факторов. В этих условиях у березы плосколистной наблюдаются также значительные повреждения (40–60 %) и деформация кроны, из-за воздействия сильных ветров и химически агрессивных веществ и паров в данных местообитаниях.

Структурные неспецифические аномалии – прикорневые капы и сувели – в местообитаниях на охотском побережье юга Сахалина формируются у березы плосколистной в сравнительно молодом возрасте. В кальдере Головнина и на склонах влк. Менделеева на Кунашире при достижении ею большего возраста образуются группы спящих почек в прикорневой зоне, которые в последующем могут преобразоваться в капы. У близкого вида березы повислой образование прикорневых капов связывают с процессами старения дерева [58, 59], а также с проявлением яркой адаптивной стратегии выживания в условиях крайних физиологических ограничений, в результате чего сформировалась самостоятельная экологическая разновидность березы повислой – береза карельская (*Betula pendula* var. *carelica* (Merckl.) Namet-Ahti) [59, 60].

Таким образом, чем напряженнее экологическая обстановка, тем сильнее изменяется, по сравнению с типичным, внешний облик (габитус) березы плосколистной, вплоть до смены жизненной формы. Такая же реакция на стрессовые условия местообитания проявляется и у другого вида березы, широко представленного на юге Сахалина и Курильских островов – березы каменной, на что указано в работе Н.Е. Кабанова [61]. Кабанов писал, что неблагоприятные для березы каменной климатические условия, такие как низкие температуры, сильные ветра, частые туманы, навалы снега, приводят к искривленности стволов, а в оптимальных экологических условиях она всегда является деревом

первой величины [61]. Подобная реакция березы каменной отмечена и в наших исследованиях [38, 39]. В условиях кальдеры влк. Ксудач на п-ове Камчатка береза каменная изменяет свою жизненную форму на кустарниковую [38, 39]. Такие глубокие изменения проявляются и в структуре коры [40].

В исследуемых стрессовых условиях у деревьев березы плосколистной старше 50 лет наблюдалось уменьшение ширины коры, за исключением образцов с левого берега р. Алат в ландшафте ЮСГВ. В условиях охотского побережья Сахалина ширина коры в 2 раза меньше нормы. При этом процентное соотношение внутренней и внешней коры в рассматриваемых условиях соответствует типичным местообитаниям. В местообитаниях у магматических вулканов Головнина и Менделеева у молодых особей березы плосколистной наблюдается увеличение внутренней части коры и, следовательно, уменьшение внешней по сравнению с типичными условиями. Мы предполагаем, что у молодых особей березы плосколистной происходит активное нарастание вторичной флоэмы. Увеличение ширины непроводящей флоэмы было выявлено у березы каменной в молодом возрасте в условиях воздействия термальных Голубых озер влк. Баранского на о. Итуруп [40]. К увеличению ширины коры у березы плосколистной в стрессовых условиях может приводить и развитие запасающей паренхимы вторичной флоэмы в коре. Существенное изменение обмена веществ и усиление функции запасаания под влиянием стрессовых экологических условий было отмечено у березы карельской [59]. Подобное предположение в отношении березы плосколистной требует дополнительных исследований структуры коры.

Поскольку ширина коры березы плосколистной изменяется под воздействием стрессовых экологических факторов, она может выступать в качестве интегрированного параметра для оценки реакции древесного растения на стрессовые условия среды. Как уже говорилось выше, по данным о структуре коры можно судить об эколого-физиологическом состоянии деревьев в условиях природного стресса (пожары, наводнения и затопления, температурный лимит в высокогорьях и др.). Активно ширина коры используется как признак, структурирующий многие древесные сообщества растений в подверженных пожарам экосистемах. J.G. Pausas [29] отмечает, что по

данным о ширине коры, как важном функциональном признаке растений (plant functional trait), может быть оценена значительная доля изменчивости растений экосистем Земли. Н. Bruelheide [62] также показал, что структурные характеристики растений и особенности строения тканей и органов растений являются ключом к пониманию и прогнозированию адаптации экосистем в условиях утраты биоразнообразия и глобальных изменений.

Относительная ширина коры березы плосколистной в исследованных местообитаниях изменяется неоднозначно. В условиях ландшафтов ЮСГВ и морского побережья увеличение относительной ширины коры по сравнению с нормой небольшое. А у образцов, собранных в ландшафтах магматических вулканов, данный показатель больше нормы в 4 раза (см. таблицу). Вероятно, с изменением жизненной формы до низкорослого дерева с малой продолжительностью жизни прирост древесины уменьшается. К увеличению относительной ширины коры у березы плосколистной в стрессовых условиях, как уже говорилось, может приводить и развитие запасающей паренхимы вторичной флоэмы в коре [59].

Показатель ежегодного прироста коры березы плосколистной значительно уменьшен в условиях охотского морского побережья. Влажный засоленный морской воздух является причиной засоления впоследствии и почвенного субстрата, что в свою очередь ведет к физиологической засухе у растений [20, 21]. Уменьшение ежегодного прироста коры наблюдается и у образцов, собранных у юго-западной границы грязевого поля ЮСГВ, где субстрат грязевого поля и прилегающих территорий характеризуется содовым засолением. Такая же реакция прироста коры на воздействие стрессовых факторов характерна и для березы каменной в условиях морского побережья и на ландшафтах ЮСГВ [38].

В ландшафтах магматических вулканов у образцов березы плосколистной, наоборот, наблюдается увеличение ежегодного прироста коры по сравнению с нормой. Наибольший ежегодный прирост коры отмечен в условиях термальных источников ручья Кислый на влк. Менделеева – в 2.7 раза больше нормы. В условиях газогидротермальных проявлений вулканов Менделеева и Головнина береза плосколистная представлена низкорослыми одноствольными или многоствольными де-

ревьями до 22 лет. Можно предположить, что ежегодное нарастание коры у молодых особей идет интенсивнее, а в более зрелом возрасте величина ежегодного прироста коры уменьшается. Кроме того, береза плосколистная относится к быстрорастущим видам [2]. Вероятно, в условиях газогидротермальных проявлений есть условия для рывков роста в течение онтогенеза, которые у березы плосколистной генетически определены и являются ее адаптивной стратегией и конкурентным преимуществом [4, 7] в напряженных условиях среды. Сходная тенденция к увеличению скорости прироста коры, вторичной флоэмы и ее структурных компонентов была выявлена нами в условиях газогидротермальных источников на влк. Баранского на о. Итуруп у березы каменной именно в молодом возрасте – 10–15 лет [40]. Подобный структурный ответ коры отмечен также для южноазиатской лианы – токсикодендрона восточного (*Toxicodendron orientale* Greene) в условиях газогидротермальных проявлений влк. Менделеева [63]. У низкорослых многоствольных деревьев березы плосколистной дополнительные скелетные оси образуются из побегов возобновления [64], прорастающих из спящих почек в прикорневой части стволов сравнительно молодых берез в экстремальных местообитаниях. Процесс формирования таких экологических форм у березы плосколистной, мы полагаем, реализуется в условиях природного стресса как ростовой скачок.

Годичный прирост древесины у березы плосколистной в исследуемых условиях ниже нормы в среднем на 40 %, за исключением особей, взятых на левом берегу р. Алат на ЮСГВ, где годичный прирост древесины берез не отличается от прироста в типичных условиях произрастания. Наименьший годичный прирост древесины отмечен в условиях Центрального Восточного сольфатарного поля оз. Кипящее в кальдере Головнина – он в 2.4 раза меньше по сравнению с нормой (см. таблицу). Сокращение приростов древесины приводит к существенному уменьшению диаметра ствола и стволиков с возрастом (см. таблицу). Такая же тенденция изменения годичного прироста древесины свойственна и березе каменной: у нее в экстремальных местообитаниях средний годичный прирост древесины уменьшается в среднем в 1.5 раза [38, 40].

Как упомянуто, особи березы плосколистной, взятые на левом берегу р. Алат на ЮСГВ, по рассматриваемым макроскопическим признакам (ширина коры и величина ее прироста, годичный прирост древесины) не отличаются от особей, обитающих в нормальных условиях. Исследуемый фитоценоз с березой плосколистной произрастает на старовозрастных грязевулканических отложениях, не затронутых задокументированными извержениями последнего столетия [13, 65, 66]. Эти старовозрастные брекчии значительно переработаны лесной растительностью и, вероятно, близки к типичным для юга Сахалина.

Для более детального исследования структурного отклика березы плосколистной на воздействия среды необходимо провести микроструктурный анализ коры для разных возрастных состояний деревьев.

## Заключение

*Betula platyphylla* исследована в условиях среднегорных массивов, морских побережий, газогидротермальных проявлений магматических вулканов и грязевулканических отложений на юге Сахалина и Курильских островах. Для березы плосколистной, произрастающей в этих стрессовых экологических условиях, характерно формирование низкорослой многоствольной жизненной формы со значительными повреждениями и деформациями кроны, искривленными эксцентричными стволами и структурными аномалиями – капями и сувелями.

Реакция коры березы плосколистной на стрессовые условия среды проявляется уменьшением ее ширины у деревьев старше 50 лет по сравнению с одноствольными долгоживущими деревьями в типичных условиях. Структурный отклик березы плосколистной на воздействие стрессовых факторов выражается также в уменьшении величины ежегодного прироста коры у возрастных деревьев. Наиболее существенные изменения в этом плане проявляются у особей в условиях охотского морского побережья, где ширина коры и годичный прирост ее уменьшаются в 2 раза.

Тенденция изменения годичного прироста древесины березы плосколистной в условиях влияния стрессовых факторов аналогична. Наименьший годичный прирост древесины отмечен в условиях кальдеры влк. Головинна на

о. Кунашир – в 2.4 раза меньше нормы. Сокращение приростов древесины приводит к существенному изменению жизненной формы.

Годичный прирост коры березы плосколистной в исследованных местообитаниях имеет разнонаправленную реакцию и выражается как типичным для экстремальных условий уменьшением, так и увеличением. В условиях газогидротермальных источников магматических вулканов годичный прирост коры до 2.7 раза выше нормы, что, вероятно, определяется молодым возрастом деревьев, а именно 10–20 лет. Полученные нами данные дополнительно обосновывают адаптивную значимость жизненной стратегии березы плосколистной как быстрорастущего дерева.

Данные структурного анализа стволов березы плосколистной в различных экологических условиях демонстрируют, что ширина коры и величина ее ежегодного прироста могут являться функциональными показателями (plant functional trait) экосистем контрастных природных условий.

## Список литературы

1. Воробьев Д.П. 1968. *Дикорастущие деревья и кустарники Дальнего Востока*. Л.: Наука, 277 с.
2. Усенко Н.В. 1984. *Деревья, кустарники и лианы Дальнего Востока*. Хабаровск: Хабаровское кн. изд-во, 270 с.
3. Соловьев К.П. 1958. *Кедрово-широколиственные леса и хозяйство в них*. Хабаровск: Хабаровское кн. изд-во, 368 с.
4. Агеев А.С., Клинов А.П., Попов Н.А., Розенберг В.А., Васильев Н.Г., Манько Л.И. 1969. *Леса Сахалинской области*. В кн.: *Леса СССР*. М.: Наука, т. 4: 668–700.
5. Алексеенко А.Ю., Бруслова Е.В., Выводцев Н.В., Громыко С.А., Гуков Г.В., Гуль Л.П., Ефремов Д.Ф., Замалеев В.К., Ковалев А.П. 2009. *Современное состояние лесов российского Дальнего Востока и перспективы их использования*. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 470 с.
6. Шейнгауз А.С. 2005. *Лесной комплекс Дальнего Востока России: аналитический обзор*. Хабаровск: ДВО РАН, 160 с.
7. Нешатаева В.Ю. 2009. *Растительность полуострова Камчатка*. М.: КМК, 537 с.
8. Кораблев А.П., Нешатаева В.Ю., Головнева Л.Б. 2014. Вулканогенная динамика растительности. В кн.: *Растительный покров вулканических плато Центральной Камчатки (Ключевская группа вулканов)*. М.: КМК, с. 231–316.
9. Нешатаева В.Ю. 2007. Динамика растительности Камчатки под влиянием современного вулканизма (на примере Ключевской группы вулканов). В кн.: *Актуальные проблемы геоботаники: лекции, Петрозаводск, 24–29 сентября 2007 года*. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, с. 408–418.
10. Гришин С.Ю., Перепелкина П.А., Бурдуковский М.Л. 2019. Начало сукцессий растительности на лавовых потоках Толбачинского извержения 2012–2013 гг. (Камчатка). *Экология*, 3: 226–229. <https://doi.org/10.1134/S036705971903003X>

11. Гришин С.Ю., Перепелкина П.А., Бурдуковский М.Л., Лазарев А.Г. **2021**. Пеплопад вулкана Шивелуч (Камчатка) 29 августа 2019 г. и его воздействие на растительность. *Известия Русского географического общества*, 153(5): 34–37. <https://doi.org/10.31857/S0869607121050049>
12. Кораблев А.П., Нешатаева В.Ю. **2016**. Первичные вулканогенные сукцессии растительности лесного пояса на плато Толбачинский дол (Камчатка). *Изв. РАН. Серия биологическая*, 4: 366–376. <https://doi.org/10.7868/S0002332916040056>
13. Корзников К.А. **2015**. Растительные сообщества грязевого вулкана Магунтан (о. Сахалин). *Бюл. Московского общества испытателей природы. Отдел биологический*, 120(1): 61–68.
14. Korablev A., Smirnov V., Neshataeva V., Kuzmin I., Nekrasov T. **2020**. Plant dispersal strategies in primary succession on the Tolbachinsky Dol volcanic plateau (Russia). *J. of Vegetation Science*, 31(6): 954–966. <https://doi.org/10.1111/jvs.12901>
15. Манько Ю.И., Сидельников А.Н. **1989**. Влияние вулканизма на растительность. Владивосток: ДВО АН СССР, 163 с.
16. Манько Ю.И. **1980**. Вулканизм и динамика растительности. *Ботанический журнал*, 65(4): 457–469.
17. Корзников К.А. **2015**. Растительный покров грязевых вулканов о. Сахалин: дис. ... канд. биол. наук. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова.
18. Kopanina A.V. **2019**. Vegetation of the Yuzhno-Sakhalinsky mud volcano as an indicator of activity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 324(1): 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012032>
19. Воробьев Д.П. **1963**. Растительность Курильских островов. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 92 с.
20. Терлецкая А.Т. **2013**. Растительный покров Дальнего Востока. Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского гос. ун-та, 116 с.
21. Березина Н.А. **2009**. Экология растений. М.: ИЦ «Академия», 400 с.
22. Schweingruber F.H. **2007**. *Wood structure and environment*. Berlin: Springer-Verlag, 279 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-48548-3>
23. Williams V.L. **2007**. Relationship between bark thickness and diameter at breast height for six tree species used medicinally in South Africa. *South African Association of Botanists*, 73: 449–465.
24. Sonmez T. **2007**. Effect of aspect, tree age and tree diameter on bark thickness of *Picea orientalis*. *Scandinavian J. of Forest Research*, 22: 193–197.
25. Carlon Allende T., Macias J.L., Mendoza M.E., Villanueva Diaz J. **2020**. Evidence of volcanic activity in the growth rings of trees at the Tacana Volcano, Mexico-Guatemala border. *Canadian J. of Forest Research*, 50(1): 65–72. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0214>
26. Боровикова М.Г. **2013**. Изменчивость ширины годичных слоев стволовой древесины и коры березы пушистой. *Вестник КрасГАУ*, 2: 76–80.
27. Hempson G.P., Midgley J.J., Lawes M.J., Vickers K.J., Kruger L.M. **2014**. Comparing bark thickness: testing methods with bark – stem data from two South African fire-prone biomes. *J. of Vegetation Science*, 25: 1247–1256. <https://doi.org/10.1111/jvs.12171>
28. Corvalan P., Naulin P., Contreras A. **2019**. Variacion del espesor de corteza en el perfil fustal de *Nothofagus obliqua* en la precordillera de Maule, Chile. *Interciencia*, 44: 644–648.
29. Pausas J.G. **2015**. Bark thickness and fire regime. *Functional Ecology*, 29: 315–327. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12372>
30. Kidd K.R., Varner J.M. **2019**. Differential relative bark thickness and aboveground growth discriminates fire resistance among hardwood sprouts in the southern Cascades, California. *Trees*, 33: 267–277. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1775-z>
31. Wang G.G., Wang S.R. **2011**. Does frequent burning affect longleaf pine (*Pinus palustris*) bark thickness. *Canadian J. of Forest Research*, 41(7): 1562–1565. <https://doi.org/10.1139/X11-074>
32. Do Vale A.T., Elias P.S. **2014**. Bark thermal protection level of four tree species and the relationship between bark architecture and heat transfer. *Ciencia Florestal, Santa Maria*, 24(4): 979–987. <https://doi.org/10.1590/1980-509820142404017>
33. Midgley J.J., Lawes M.J. **2016**. Relative bark thickness; towards standardised measurement and analysis. *Plant Ecology*, 21: 677–681. <https://doi.org/10.1007/s11258-016-0587-8>
34. Midgley J.J. **2019**. Evidence from Cape Proteaceae that high relative bark thickness is correlated with high bark thickness growth rates. *South African J. of Botany*, 124: 36–38. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.04.021>
35. Эверт Р.Ф. **2016**. *Анатомия растений Эзау. Меристемы, клетки и ткани растений: строение, функции и развитие*. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 600 с.
36. Пастори З., Горбачева Г.А., Санаев В.Г., Мохачине И.Р., Борчок З. **2020**. Состояние и перспективы использования древесной коры. *Лесной вестник*, 24(5): 74–88. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-5-74-88>
37. Копанина А.В., Лебедева Е.В., Власова И.И. **2018**. Особенности восстановления растительности после извержения 1907 г. кальдеры Ксудач на юге Камчатского полуострова. *Изв. РАН. Серия географическая*, 6: 57–69. <https://doi.org/10.1134/S2587556618060092>
38. Тальских А.И., Копанина А.В., Власова И.И. **2021**. Структурные особенности коры *Betula ermanii* (Betulaceae) в ландшафтах морских побережий и активных вулканов Дальнего Востока России. *Растительные ресурсы*, 57(2): 124–144. <https://doi.org/10.31857/S0033994621020096>
39. Kopanina A.V., Lebedeva E.V., Vlasova I.I., Talskikh A.I. **2020**. Structural traits of woody plants and geomorphological conditions to the vegetation recovery at Ksudach caldera (Southern Kamchatka) since the explosive eruption in 1907. *J. of Mountain Science*, 17(7): 1613–1635. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5583-8>
40. Kopanina A.V., Talskikh A.I., Vlasova I.I., Kotina E.L. **2022**. Age-related pattern in bark formation of *Betula ermanii* growing in volcanic environments from southern Sakhalin and Kuril Islands (Northeast Asia). *Trees*, 36: 915–939. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02257-x>
41. Недолужко В.А., Скворцов А.К. **1996**. Сем. Березовые. Betulaceae. В кн.: *Сосудистые растения советского Дальнего Востока*. СПб.: Наука, т. 8: 13–24.
42. Коропачинский И.Ю., Милютин Л.И. **2006**. *Естественная гибридизация древесных растений*. Новосибирск: ГЕО, 223 с.
43. Коропачинский И.Ю. **2016**. *Арборифлора Сибири*. Новосибирск: ГЕО, 578 с.
44. Скворцов А.К. **2002**. Новая система рода *Betula* L. – Береза. *Бюл. Московского общества испытателей природы. Отдел биологический*, 107(5): 73–76.
45. Wu Z., Raven P.H., Hong D. (ed) **1999**. *Betula* Linnaeus, Sp. Pl. 2: 982. 1753. In: *Flora of China*, 4: 304–313.

46. Недолужко В. А. **1995.** Конспект дендрофлоры российского Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 208 с.
47. Серегин А.П. (ред.) **2022.** Цифровой гербарий МГУ: электронный ресурс. М.: МГУ. URL: <https://plant.depo.msu.ru/> (дата обращения 05.08.2022).
48. Баркалов В.Ю. **2009.** Флора Курильских островов. Владивосток: Дальнаука, 468 с.
49. Шемякина А.В., Дегтярева А.Ю., Выводцев Н.В., Тагильцев Ю.Г., Цюпко В.А., Колесникова Р.Д. **2015.** Дальневосточные представители рода *Betula* L.: распространение, экология, испытание новых продуктов. *Вестник Тихоокеанского государственного университета*, 36(1): 35–44.
50. Данилин И.М. **2009.** Структура послепожарных березняков на южном пределе распространения. *Лесоведение*, 3: 20–31.
51. Серебряков И.Г. **1964.** Жизненные формы высших растений и их изучение. В кн.: *Полевая геоботаника*. М.; Л.: Наука, т. 3: 146–205.
52. Барыкина Р.П., Веселова Т.Д., Девятков А.Г., Джалилова Х.Х., Ильина Г.М., Чубатова Н.В. **2004.** *Справочник по ботанической микротехнике: Основы и методы*. М.: Изд-во МГУ, 312 с.
53. Angyalossy V., Pace M.R., Evert R.F., Marcati C.R., Oskolski A.A., Terrazas T., Kotina E., Lens F., Mazzoni-Viveiros S.C., Angeles G., Machado S.R., Crivellaro A., Rao K.S., Junikka L., Nikolaeva N., Baas P. **2016.** IAWA List of Microscopic Bark Features. *IAWA Journal*, 37(4): 517–615. <http://dx.doi.org/10.1163/22941932-20160151>
54. Зайцев Г.Н. **1973.** Методика биометрических расчетов. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М.: Наука, 256 с.
55. Минько А.А. **2004.** Статистический анализ в MSExcel. М.: Диалектика, 448 с.
56. Ершов В.В., Копанина А.В. **2017.** Химический состав водных вытяжек из почв грязевулканических ландшафтов. В кн.: *География: развитие науки и образования. Ч. I. Коллективная монография по материалам ежегодной Междунар. науч.-практ. конф. LXX Герценовские чтения, посвящ. году экологии в России, 220-летию Герценовского университета, 85-летию факультета географии, 145-летию со дня рождения проф. Владимира Петровича Буданова, Санкт-Петербург, РГПУ им. А. И. Герцена, 20–23 апреля 2017 года*. СПб., с. 142–147.
57. Яковец О.Г. **2010.** Фитофизиология стресса: курс лекций. Минск: БГУ, 103 с.
58. Коровин В.В. **2002.** Структурные аномалии стебля древесных растений. М.: Московский гос. ун-т леса, 259 с.
59. Новицкая Л.Л. **2008.** Карельская береза: механизмы роста и развития структурных аномалий. Петрозаводск: Verso, 144 с.
60. Николаева Н.Н., Воробьев В.В. **2016.** Роль тканей коры в создании рельефа поверхности ствола *Betula pendula* var. *carelica*. *Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник*, 20(4): 25–28.
61. Кабанов Н.Е. **1972.** Каменноберезовые леса в ботанико-географическом и лесоводственном отношении. М.: Наука, 136 с.
62. Bruelheide H., Dengler J., Purschke O. et al. **2018.** Global trait – environment relationships of plant communities. *Nature Ecology & Evolution*, 2: 1906–1917. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0699>
63. Kopanina A.V., Vlasova I.I. **2019.** Structural changes of bark of the woody liana *Toxicodendron orientale* Greene (Anacardiaceae) in the extreme environments of gashydrothermal volcanic activity. *Botanica Pacifica*, 8(2): 3–17. <https://doi.org/10.17581/bp.2019.08212>
64. Мазуренко М.Т., Хохряков А.П. **1977.** Структура и морфогенез кустарников. М.: Наука, 160 с.
65. Никитенко О.А., Ершов В.В. **2020.** Гидрогеохимическая характеристика проявлений грязевого вулканизма на острове Сахалин. *Геосистемы переходных зон*, 4(3): 321–335. <http://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.3.321-335.336-350>
66. Kopanina A.V., Shvidskaya K.A. **2021.** Possibility of using satellite-based monitoring for large-scale mapping and research of dynamics of mud volcanic landscapes. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 946: 012040. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012040>

## References

1. Vorob'yev D.P. **1968.** [Wild trees and shrubs of the Far East]. Leningrad: Nauka, 277 p. (In Russ.).
2. Usenko N.V. **1984.** [Trees, shrubs and lianas of the Far East]. Khabarovsk: Khabarovskoye kn. izd-vo, 270 p. (In Russ.).
3. Solov'yev K.P. **1958.** [Cedar-broadleaved forests and management in them]. Khabarovsk: Khabarovskoye kn. izd-vo, 368 p. (In Russ.).
4. Ageyenko A.C., Klintsov A.P., Popov H.A., Rozenberg V.A., Vasil'yev N.G., Man'ko L.I. **1969.** [Forests of the Sakhalin region]. In: [Forests of the USSR]. Moscow: Nauka, vol. 4, p. 668–700. (In Russ.).
5. Alekseenko A.Yu., Brusova E.V., Vyvodtsev N.V., Gromyko S.A., Gukov G.V., Gul L.P., Efremov D.F., Zmaleev V.K., Kovalev A.P. **2009.** [The current state of the forests of the Russian Far East and the prospects for their use]. Khabarovsk: Dal'NIILKH, 470 p. (In Russ.).
6. Sheingauz A.S. **2005.** [Forest sector of the Russian Far East: An analytical survey]. Khabarovsk: DVO RAN, 160 p. (In Russ.).
7. Neshataeva V.Yu. **2009.** [Vegetation of the Kamchatka Peninsula]. Moscow: KMK, 537 p. (In Russ.).
8. Korablev A.P., Neshataeva V.Yu., Golovneva L.B. **2014.** [Volcanogenic dynamics of vegetation]. In: [Vegetation cover of the volcanic plateaus of Central Kamchatka (Klyuchevskaya group of volcanoes)]. Moscow: KMK, 231–316. (In Russ.).
9. Neshataeva V.Yu. **2007.** [Vegetation dynamics of Kamchatka under the influence of modern volcanism (on the example of the Klyuchevskaya group of volcanoes)]. In: [Actual problems of geobotany: Lectures, Petrozavodsk, September 24–29, 2007]. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of RAS, p. 408–418. (In Russ.).
10. Grishin S.Y., Perepelkin P.A., Burdukovskii M.L. **2019.** Beginning of vegetation succession on lava flows from the 2012–2013 eruption of Tolbachik volcano, Kamchatka. *Russian J. of Ecology*, 50(3): 300–303. <https://doi.org/10.1134/s1067413619030032>
11. Grishin S.Yu., Perepelkina P.A., Burdukovsky M.L., Lazarev A.G. **2021.** Ashfall of the Shiveluch volcano (Kamchatka) on August 29, 2019 and its impact on vegetation. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva = Proceedings of the Russian geographical society*, 153(5): 34–37. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.31857/S0869607121050049>
12. Korablev A.P., Neshataeva V.Yu. **2016.** Primary plant successions of forest belt vegetation on the Tolbachinsky Dol volcanic plateau (Kamchatka). *Izv. RAN. Seriya biologicheskaya = Biology Bulletin*, 4: 366–376. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.7868/S000232916040056>

13. Korznikov K.A. **2015**. Plant communities of the Maguntan mud volcano (Sakhalin Island). *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel biologicheskii = Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological series*, 120(1): 61–68. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Korablev A., Smirnov V., Neshataeva V., Kuzmin I., Nekrasov T. **2020**. Plant dispersal strategies in primary succession on the Tolbachinsky Dol volcanic plateau (Russia). *J. of Vegetation Science*, 31(6): 954–966. <https://doi.org/10.1111/jvs.12901>
15. Man'ko Yu.I., Sidel'nikov A.N. **1989**. [The influence of volcanism on vegetation]. Vladivostok: DVO AN SSSR, 163 p. (In Russ.).
16. Man'ko Yu.I. **1980**. [Volcanism and vegetation dynamics]. *Botanicheskiy zhurnal = Botanical J.*, 65(4): 457–469. (In Russ.).
17. Korznikov K.A. **2015**. *Rastitel'nyy pokrov gryazevykh vulkanov o. Sakhalin* [Vegetation cover of mud volcanoes of Sakhalin Island]: thesis for a Cand. degree (Biol.). Moscow, Lomonosov Moscow State University. (In Russ.).
18. Kopanina A.V. **2019**. Vegetation of the Yuzhno-Sakhalinsky mud volcano as an indicator of activity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 324(1): 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012032>
19. Vorob'yev D.P. **1963**. [Vegetation of the Kuril Islands]. Moscow; Leningrad: Izdatel'stvo AN SSSR, 92 p. (In Russ.).
20. Terletskaya A.T. **2013**. [Vegetation cover of the Far East]. Khabarovsk: Izdatel'stvo Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta, 116 p. (In Russ.).
21. Berezina N.A. **2009**. [Plant ecology]. Moscow: Academy Publ. Center, 400 p. (In Russ.).
22. Schweingruber F.H. **2007**. *Wood structure and environment*. Berlin: Springer-Verlag, 279 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-48548-3>
23. Williams V.L. **2007**. Relationship between bark thickness and diameter at breast height for six tree species used medicinally in South Africa. *South African Association of Botanists*, 73: 449–465.
24. Sonmez T. **2007**. Effect of aspect, tree age and tree diameter on bark thickness of *Picea orientalis*. *Scandinavian J. of Forest Research*, 22: 193–197.
25. Carlon Allende T., Macias J.L., Mendoza M.E., Villanueva Diaz J. **2020**. Evidence of volcanic activity in the growth rings of trees in the Tacana Volcano, Mexico-Guatemala. *Canadian J. of Forest Research*, 50(1): 65–72.
26. Borovikova M.G. **2013**. The year layer width variability of the fluffy birch stem wood and bark. *Vestnik KrasGAU = Bulletin of KSAU*, 2: 76–80. (In Russ., abstr. in Engl.).
27. Hempson G.P., Midgley J.J., Lawes M.J., Vickers K.J., Kruger L.M. **2014**. Comparing bark thickness: testing methods with bark – stem data from two South African fire-prone biomes. *J. of Vegetation Science*, 25: 1247–1256. <https://doi.org/10.1111/jvs.12171>
28. Corvalan P., Naulin P., Contreras A. **2019**. Variacion del espesor de corteza en el perfil fustal de *Nothofagus obliqua* en la precordillera de Maule, Chile. *Interciencia*, 44: 644–648.
29. Pausas J.G. **2015**. Bark thickness and fire regime. *Functional Ecology*, 29: 315–327. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12372>
30. Kidd K.R., Varner J.M. **2019**. Differential relative bark thickness and aboveground growth discriminates fire resistance among hardwood sprouts in the southern Cascades, California. *Trees*, 33: 267–277. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1775-z>
31. Wang G.G., Wangen S.R. **2011**. Does frequent burning affect longleaf pine (*Pinus palustris*) bark thickness. *Canadian J. of Forest Research*, 41(7): 1562–1565. <https://doi.org/10.1139/X11-074>
32. Do Vale A.T., Elias P.S. **2014**. Bark thermal protection level of four tree species and the relationship between bark architecture and heat transfer. *Ciencia Florestal, Santa Maria*, 24(4): 979–987. <https://doi.org/10.1590/1980-509820142404017>
33. Midgley J.J., Lawes M.J. **2016**. Relative bark thickness; towards standardised measurement and analysis. *Plant Ecology*, 21: 677–681. <https://doi.org/10.1007/s11258-016-0587-8>
34. Midgley J.J. **2019**. Evidence from Cape Proteaceae that high relative bark thickness is correlated with high bark thickness growth rates. *South African J. of Botany*, 124: 36–38. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.04.021>
35. Evert R.F. **2016**. *Esau's plant anatomy. Meristems, cells and tissues of the plants body: their structure, function, and development*. Moscow: BINOM, Knowledge Laboratory, 600 p. (In Russ.).
36. Pasztory Z., Gorbacheva G.A., Sanaev V.G., Mohacsine I.R., Borcsok Z. **2020**. Status and prospects of tree bark use. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 24(5): 74–88. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-5-74-88>
37. Kopanina A.V., Lebedeva E.V., Vlasova I.I. **2018**. Features of vegetation restoration after the eruption of 1907 Ksudach caldera in the south of the Kamchatka Peninsula. *Izv. RAN. Seriya geograficheskaya*, 6: 57–69. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.1134/S2587556618060092>
38. Talskikh A.I., Kopanina A.V., Vlasova I.I. **2021**. Structural features of *Betula ermanii* (Betulaceae) in coastal and active volcanic landscapes of the Russian Far East. *Rastitel'nyye resursy*, 57(2): 124–144. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.31857/S0033994621020096>
39. Kopanina A.V., Lebedeva E.V., Vlasova I.I., Talskikh A.I. **2020**. Structural traits of woody plants and geomorphological conditions to the vegetation recovery at Ksudach caldera (Southern Kamchatka) since the explosive eruption in 1907. *J. of Mountain Science*, 17(7): 1613–1635. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5583-8>
40. Kopanina A.V., Talskikh A.I., Vlasova I.I., Kotina E.L. **2022**. Age-related pattern in bark formation of *Betula ermanii* growing in volcanic environments from southern Sakhalin and Kuril Islands (Northeast Asia). *Trees*, 36: 915–939. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02257-x>
41. Nedoluzhko V.A., Skvortsov A.K. **1996**. [Fam. Betulaceae]. In: [Vascular plants of the Soviet Far East]. St.-Petersburg: Nauka, 8: 13–24. (In Russ.).
42. Koropachinskiy I.Yu., Milyutin L.I. **2006**. [Natural hybridization of woody plants]. Novosibirsk: GEO, 223 p. (In Russ.).
43. Koropachinskiy I.Yu. **2016**. [Arboriflora of Siberia]. Novosibirsk: GEO, 578 p. (In Russ.).
44. Skvortsov A.K. **2002**. A new system of the genus *Betula*. *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel biologicheskii = Bull. of Moscow Society of Naturalists. Biological series*, 107(5): 73–76. (In Russ., abstr. in Engl.).
45. Wu Z., Raven P. H., Hong D. (ed.) **1999**. *Betula* Linnaeus, Sp. Pl. 2: 982. 1753. In: *Flora of China* 4: 304–313.
46. Nedoluzhko V.A. **1995**. [Synopsis of the dendroflora of the Russian Far East]. Vladivostok: Dal'nauka, 208 p. (In Russ.).
47. Seregin A.P. (ed.) **2022**. *Moscow Digital Herbarium*: Electronic resource. Moscow: Moscow State University. URL: <https://plant.depo.msu.ru/> (accessed 05.08.2022).

48. Barkalov V.Yu. **2009**. *Flora of the Kuril Islands*. Vladivostok: Dal'nauka, 468 p. (In Russ., abstr. in Engl.).
49. Shemyakina A.V., Degtyareva A.Yu., Vyvadtsev N.V., Tagiltsev Yu.G., Tsyupko V.A., Kolesnikova R.D. **2015**. Far-Eastern representatives of the genus *Betula* L.: distribution, ecology, test of new products. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 36(1): 35–44. (In Russ., abstr. in Engl.).
50. Danilin I.M. **2009**. The structure of post-fire birch forests at their southern range. *Lesovedeniye*, 3: 20–31. (In Russ., abstr. in Engl.).
51. Serebryakov I.G. **1964**. [Life forms of higher plants and their study]. In: *[Field Geobotany]*. Moscow; Leningrad: Nauka, vol. 3: 146–205. (In Russ.).
52. Barykina R., Veselova T., Devyatov A., Dzhililova Kh., Iljina G., Chubatova N. **2004**. *[Manual on botanical microtechnique: Basic principles and methods]*. Moscow: Publ. House MSU, 312 p. (In Russ.).
53. Angyalossy V., Pace M.R., Evert R.F., Marcatti C.R., Oskolski A.A., Terrazas T., Kotina E., Lens F., Mazzoni-Viveiros S.C., Angeles G., Machado S.R., Crivellaro A., Rao K.S., Junikka L., Nikolaeva N., Baas P. **2016**. IAWA List of Microscopic Bark Features. *IAWA Journal*, 37(4): 517–615. <http://dx.doi.org/10.1163/22941932-20160151>
54. Zaitsev G.N. **1973**. *[Technique of biometric calculations. Mathematical statistics in experimental botany]*. Moscow: Nauka, 256 p. (In Russ.).
55. Min'ko A.A. **2004**. *[Statistical analysis in MS Excel]*. Moscow: Dialectics, 448 p. (In Russ.).
56. Ershov V.V., Kopanina A.V. **2017**. [The chemical composition of water extracts from the soils of mud volcanic landscapes]. In: *[Geography: development of science and education. Pt I. Collective monograph on materials of the annual Intern. scientific and practical conf. LXX Gertsensky readings, to the year of ecology in Russia, to the 220th anniversary of Gertsensky university, to the 85th anniversary of faculty of geography, to the 145th anniversary since the birth of professor Vladimir Petrovich Budanov, St. Petersburg, RSPU of A.I. Herzen, on April 20–23, 2017]*. Saint Petersburg, p. 142–147. (In Russ.).
57. Yakovets O.G. **2010**. *[Phytophysiology of stress: a course of lectures]*. Minsk: BGU, 103 p. (In Russ.).
58. Korovin V.V. **2002**. *[Structural anomalies in the stem of woody plants]*. Moscow: Moscow State Forest University, 259 p. (In Russ.).
59. Novitskaya L.L. **2008**. *Karelian Birch: mechanisms of growth and development of structural abnormalities*. Petrozavodsk: Verso, 144 p. (In Russ.).
60. Nikolaeva N.N., Vorobiev V.V. **2016**. Role of the bark tissues complex in formation of the trunk surface relief in *Betula pendula* var. *carelica*. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik = Moscow State Forest University bulletin – Forestry bulletin*, 20(4): 25–28. (In Russ., abstr. in Engl.).
61. Kabanov N.E. **1972**. *[Botanical-geographic and silvicultural aspects of Erman's birch forests]*. Moscow: Nauka, 136 p. (In Russ.).
62. Bruehlheide H., Dengler J., Purschke O. et al. **2018**. Global trait – environment relationships of plant communities. *Nature Ecology & Evolution*, 2: 1906–1917. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0699>
63. Kopanina A.V., Vlasova I.I. **2019**. Structural changes of bark of the woody liana *Toxicodendron orientale* Greene (Anacardiaceae) in the extreme environments of gas-hydrothermal volcanic activity. *Botanica Pacifica*, 8(2): 3–17. <https://doi.org/10.17581/bp.2019.08212>
64. Mazurenko M.T., Khokhryakov A.P. **1977**. *[Structure and morphogenesis of shrubs]*. Moscow: Nauka, 160 p. (In Russ.).
65. Nikitenko O.A., Ershov V.V. **2020**. Hydrogeochemical characteristic of mud volcanism manifestations on Sakhalin Island. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(3): 321–350. <https://doi.org/10.30730/ptrz.2020.4.3.321-335.336-350> (In Russ. & Engl.).
66. Kopanina A.V., Shvidskaya K.A. **2021**. Possibility of using satellite-based monitoring for large-scale mapping and research of dynamics of mud volcanic landscapes. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 946: 012040. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012040>

## Об авторов

**Тальских Анастасия Игоревна** (<https://orcid.org/0000-0003-0488-2824>), научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, [anastasiya\\_talsk@mail.ru](mailto:anastasiya_talsk@mail.ru)

**Копанина Анна Владимировна** (<https://orcid.org/0000-0001-5354-3584>), кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории экологии растений и геоэкологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, [anna\\_kopanina@mail.ru](mailto:anna_kopanina@mail.ru)

**Власова Инна Ивановна** (<https://orcid.org/0000-0002-9365-266X>), кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, [iivlasova@gmail.com](mailto:iivlasova@gmail.com)

## About Authors

**Talskih, Anastasiya I.** (<https://orcid.org/0000-0003-0488-2824>), Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, [anastasiya\\_talsk@mail.ru](mailto:anastasiya_talsk@mail.ru)

**Kopanina, Anna V.** (<https://orcid.org/0000-0001-5354-3584>), Candidate of Sciences (Biology), Leading Researcher, Leader of the laboratory of plant ecology and geoeology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, [anna\\_kopanina@mail.ru](mailto:anna_kopanina@mail.ru)

**Vlasova, Inna I.** (<https://orcid.org/0000-0002-9365-266X>), Candidate of Sciences (Biology), Senior Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, [iivlasova@gmail.com](mailto:iivlasova@gmail.com)

Поступила 23.08.2022

После доработки 16.11.2022

Принята к публикации 05.12.2022

Received 23 August 2022

Revised 16 November 2022

Accepted 5 December 2022

© Автор 2022 г. Открытый доступ.  
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author 2022. Open access.  
Content is available under Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 504.73:504.5

<https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.380-387>  
<https://www.elibrary.ru/qpbfvu>

## Напочвенные лишайники термальных местообитаний южных Курильских островов

А. К. Ежкин

E-mail: [ezhkin@yandex.ru](mailto:ezhkin@yandex.ru)

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

**Реферат.** В работе приводятся результаты исследования напочвенных лишайников термальных местообитаний южных Курильских островов, включая особенности их распространения на островах. Всего при обследовании термальных полей на островах Итуруп и Кунашир было выявлено 4 вида, обитающих на почве: *Cladonia graciliformis*, *C. granulans*, *C. vulcani*, *C. furcata*. Первые три вида ближе всех селятся к активным фумаролам и имеют наибольшие показатели частоты встречаемости на данных местообитаниях.

**Ключевые слова:** лишайники, толерантные виды, сольфатарная активность, современный вулканизм, Дальний Восток России

## Epigeic lichens in thermal habitats on the Southern Kuriles

Aleksander K. Ezhkin

E-mail: [ezhkin@yandex.ru](mailto:ezhkin@yandex.ru)

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

**Abstract.** The paper presents the results of studying soil lichens in areas of thermal habitats on the Kuril Islands, including the features of lichen distribution on the isles. Totally four species of epigeic lichens were found when studying the thermal fields on Kunashir and Iturup isles: *Cladonia graciliformis*, *C. granulans*, *C. vulcani*, and *C. furcata*. First three species are closest to active fumaroles and have the highest rates of occurrence frequency for these habitats.

**Keywords:** lichens, tolerant species, solphataric activity, modern volcanism, Russian Far East

**Для цитирования:** Ежкин А.К. Напочвенные лишайники термальных местообитаний южных Курильских островов. *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 4, с. 380–387. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.380-387>; <https://www.elibrary.ru/qpbfvu>

**For citation:** Ezhkin A.K. Epigeic lichens in thermal habitats on the Southern Kuriles. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 4, pp. 380–387. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.380-387>; <https://www.elibrary.ru/qpbfvu>

Ландшафты и растительность в районах с вулканической активностью имеют свои отличительные черты. Это связано с негативным воздействием активных вулканов на окружающую среду [1, 2]. Стрессогенный характер таких местообитаний создает неблагоприятные условия для большинства фоновых видов. Однако для специфичных видов, устойчивых к фумарольным газам, вулкан обеспечивает благоприятные условия для поселения и жизнедеятельности. Основные загрязняющие вещества этих местообитаний – серосодержащие газы и тяжелые металлы [3, 4]. Лишайники – одни из немногих организмов, которые могут обитать вблизи активных фумарол, выдержи-

вать сильное воздействие выбросов и высокую температуру. Специальные работы, посвященные лишайникам, с точным указанием на виды, обитающие в районах термальных проявлений на Дальнем Востоке России, были выполнены на Камчатке [5, 6]. В публикациях А.Г. Микулина, посвященных лишайникам Кроноцкого заповедника, указаны два вида, обитающие на почве вблизи горячих источников – *Cladonia granulans* Vain. и *C. vulcani* Savicz. [7, 8]. На островах Итуруп и Кунашир в окрестностях активных вулканов также были проведены исследования особенностей произрастания эпифитных и эпиксильных лишайников в местах проявления сольфатарной активности

[9, 10]. Отдельные виды напочвенных лишайников отмечены для термальных полей ряда вулканов на этих островах [11, 12, 13]. Тем не менее термальные местообитания до сих пор остаются одними из наиболее интересных и слабоизученных в отношении криптогамных организмов, в особенности лишайников.

Цель настоящих исследований – изучить видовой состав и особенности распространения лишайников, обитающих на почве на термальных полях южных Курильских островов – Итуруп и Кунашир.

### Район исследований

Лишайники были изучены в окрестностях трех вулканов – Менделеева, Головнина (о. Кунашир) и Баранского (о. Итуруп) (рис. 1). Обследованы два сольфатарных поля влк. Менделеева – северо-западное и северо-восточное; Голубые озера в окрестностях влк. Баранского и два его сольфатарных поля – старозаводское и верхнее; озера Горячее и Кипящее в окрестностях влк. Головнина (рис. 2). В составе сольфатарных газов вулканов преобладают  $\text{CO}_2$ , участвуют  $\text{HCl}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  и редкие газы [14]. Помимо газов отмечено присутствие тяжелых металлов  $\text{Hg}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Pb}$  [15, 16, 17]. Термальная вода в источниках

на сольфатарных полях исследуемых вулканов ультракислая, сильноминерализованная, хлоридно-сульфатная со сложным катионным составом [18, 19, 20]. Схожий химический состав гидротерм сольфатарных полей отмечен и на других вулканах Курильских островов [21, 22].

Древесная растительность на исследуемых сольфатарных полях и в окрестностях термальных выходов представлена в основном

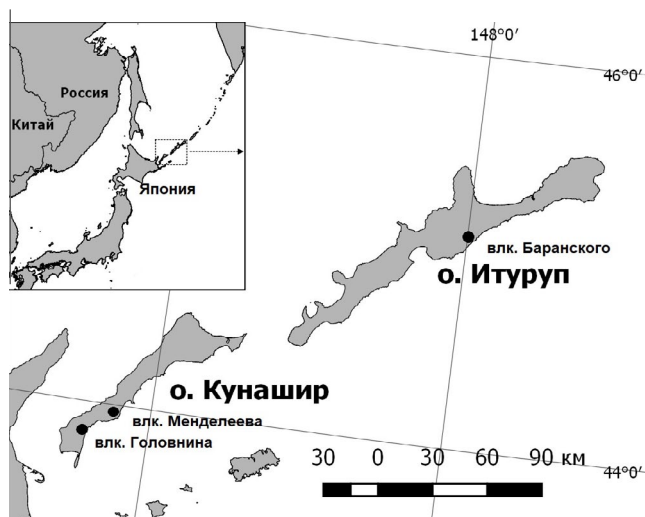


Рис. 1. Карта проведения работ. Точками отмечены объекты, где проводились работы.

Fig. 1. Map of work area. The objects, where the work was carried out, are marked with dots.

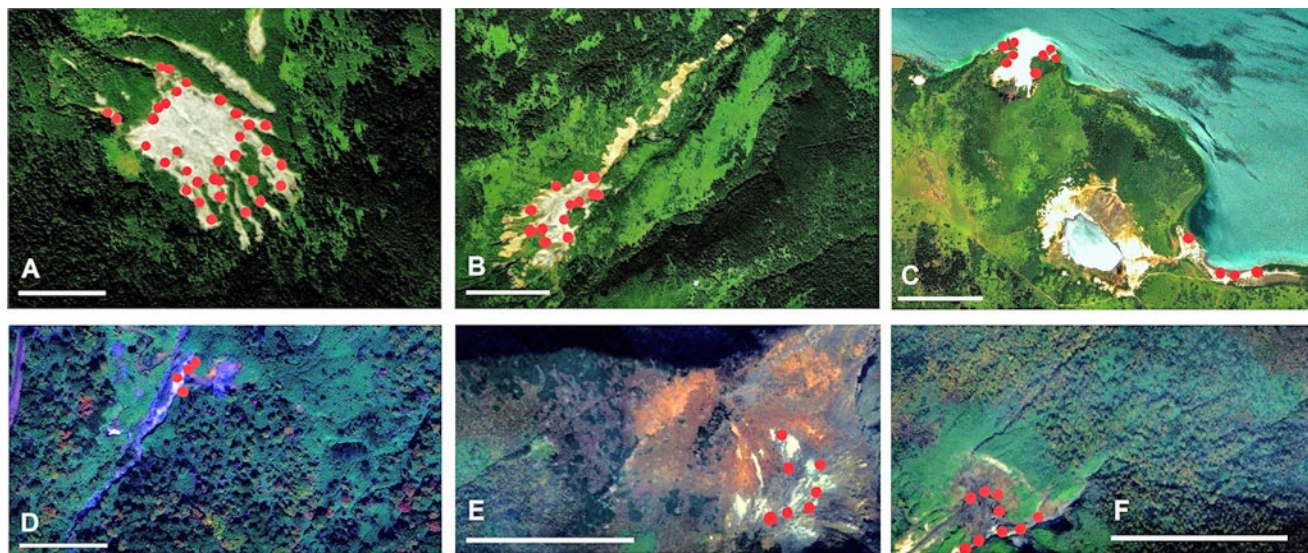


Рис. 2. Схема термальных полей на южных Курильских островах, где проводились исследования. Точками отмечены места сборов лишайников: (А) северо-западное сольфатарное поле влк. Менделеева, (В) северо-восточное сольфатарное поле влк. Менделеева, (С) озера Горячее и Кипящее влк. Головнина, (D) Голубые озера в окрестностях влк. Баранского, (Е) верхнее сольфатарное поле влк. Баранского, (F) старозаводское сольфатарное поле влк. Баранского. Размер масштабной линейки 400 м.

Fig. 2. The scheme of thermal fields in the Southern Kuril Islands, where the study was carried out. The areas, where lichens were collected, are marked with dots: (A) northwest solfataric field of Mendeleyev volcano, (B) northeast solfataric field of Mendeleyev volcano, (C) Goryachee and Kipyashee lakes of Golovnin volcano, (D) Golubye Lakes in the surroundings of Baransky volcano, (E) upper solfataric field of Baransky volcano, (F) Starozavodskoye solfataric field of Baransky volcano. Size of scale line is 400 m.

кедровым стлаником *Pinus pumila* (Pall.) Regel, который селится вдоль оврагов и по краю полей, образуя микрозону, где единичными экземплярами встречается ель Глена *Picea glehnii* (F.Schmidt) Mast. (влк. Менделеева) и довольно часто рябина смешанная *Sorbus commixta* Hedl. Вокруг микрозоны кедрового стланика, в зависимости от места в исследуемых районах, находятся участки темнохвойного леса с елью Глена, елью аянской *Picea ajanensis* Fisch.&Carr. и пихтой сахалинской *Abies sachalinensis* (F.Schmidt) Mast., разреженные каменноберезняки с *Betula ermanii* Cham., а также небольшие дубовые рощи с *Quercus crispula* Blume. Стоит отметить довольно сильную нарушенность растительности некоторых местообитаний в связи с разработкой геотермальных месторождений и добычи серы. Климат на исследуемых островах типично морской, характерный для умеренных широт, с незначительным влиянием муссонов, обилием атмосферных осадков (до 1100–1400 мм/год), высокой влажностью (средняя относительная влажность воздуха 80 %), мягкой зимой и прохладным летом, муссонным режимом ветров. Средняя годовая температура составляет 4–5 °C [23].

### Материалы и методы

Полевые работы были проведены в летние месяцы 2012–2017 гг. Сбор лишайников осуществлялся маршрутным методом с почвы на сольфатарных полях вблизи активных фумарол до границы распространения высших сосудистых растений, а также вдоль берегов термальных источников. Для подсчета частоты встречаемости видов были заложены на почве учетные площадки размером 1 м<sup>2</sup>. На каждой учетной площадке отмечалось присутствие конкретного вида лишайника. Частота встречаемости рассчитана для каждой исследованной локации – сольфатарного поля или выходов термальных источников. Частота встречаемости видов оценена по 4-балльной шкале: редко – 1–3 находки; спорадически – 4–10 находок; часто – более 10 находок; очень часто – более 50. Было собрано более 300 образцов лишайников и заложено не менее 85 учетных площадок на всех исследуемых

местообитаниях. Обработка и определение материалов выполнены в лаборатории экологии растений и геоэкологии Института морской геологии и геофизики ДВО РАН. Идентификация лишайников проведена традиционными лихенологическими методиками [24, 25]. Названия таксонов приводятся согласно базе данных Index Fungorum\*. В статье использованы общедоступные спутниковые снимки Google Map.

### Результаты и обсуждение

По результатам исследований термальных местообитаний на южных Курильских островах был выявлен видовой состав напочвенных лишайников: *Cladonia granulans* Vain., *C. graciliformis* Zahlbr., *C. vulcani* Savicz. и *C. furcata* (Hudson) Schrader (рис. 3). Все 4 вида относятся к одной жизненной форме – кустистые прямостоящие.

Ближе всех к активным фумаролам, на расстоянии 40–50 м, селятся три вида: *Cladonia granulans*, *C. graciliformis* и *C. vulcani*, нередко образуя сплошной ковер из лишайников на почве со 100%-м покрытием на субстрате, очень часто под пологом кедрового стланика и курильской сазы (рис. 4). Данные виды лишайников также активно заселяют берега горячих источников. Все три вида очень часто растут вместе, близки морфологически, их довольно трудно отличить друг от друга в полевых условиях. Частота встречаемости данных видов имеет значение как «часто» или «очень часто» почти на всех исследуемых локациях.

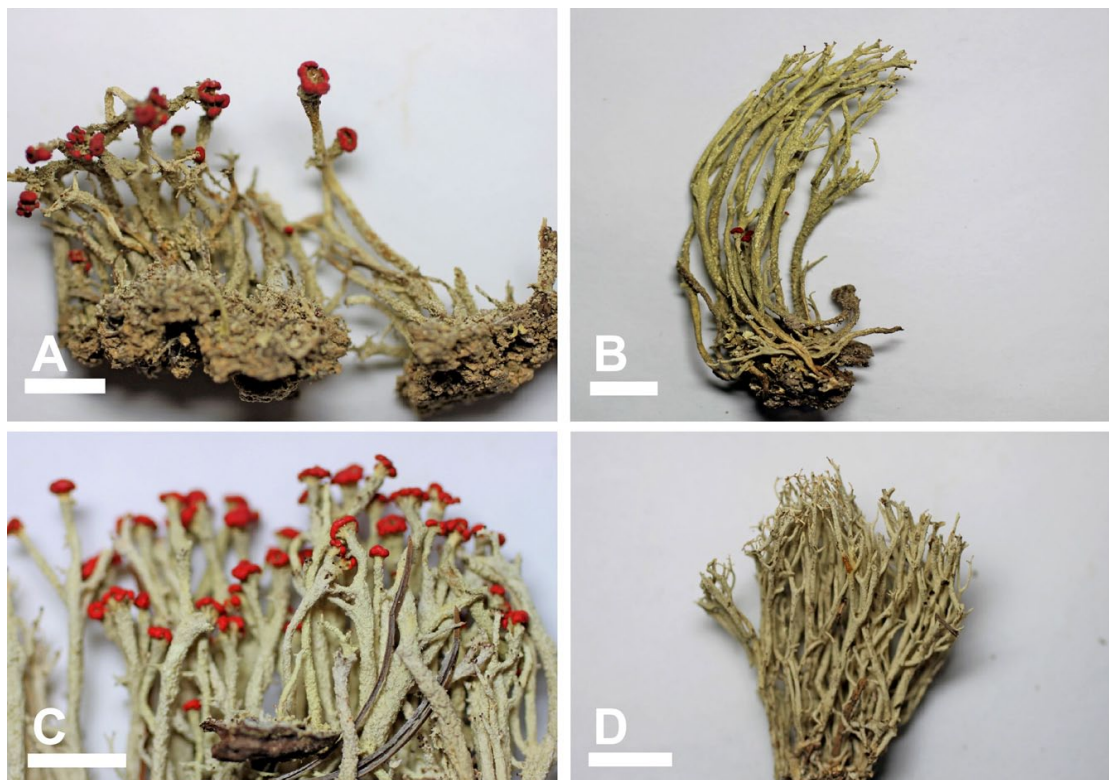
*Cladonia granulans* (рис. 3 А) отмечен на всех исследуемых сольфатарных полях. Ранее вид уже отмечался на о. Кунашир для кальдеры влк. Головнина [13] и на о. Итуруп без конкретного местонахождения [26]. Вид имеет горизонтальное слоевище, которое состоит из несоредированных желтоватых чешуек до 1 см в диаметре, и подеции (вертикальная часть таллома) до 4 см высотой, несущие неясные и неправильные или четкие правильной формы сцифы. Подеции желтовато-сероватые, покрытые в нижней части гладким или бугорчатым коровым слоем, в верхней части цельный коровой слой отсутствует и представлен изидиевидными зернышками и мелкими чешуйками. Апотеции и пикнидии красные по краям сциф. Вид встречается

\* Index Fungorum. 2016. URL: <http://www.indexfungorum.org> (accessed 31.05.2022).

на термальных вулканических почвах, реже на тундровых и альпийских, заходит в пояс камменноберезовых лесов и стлаников. Вид приведен для Камчатского края, Азии и Северной Америки [4, 6, 27].

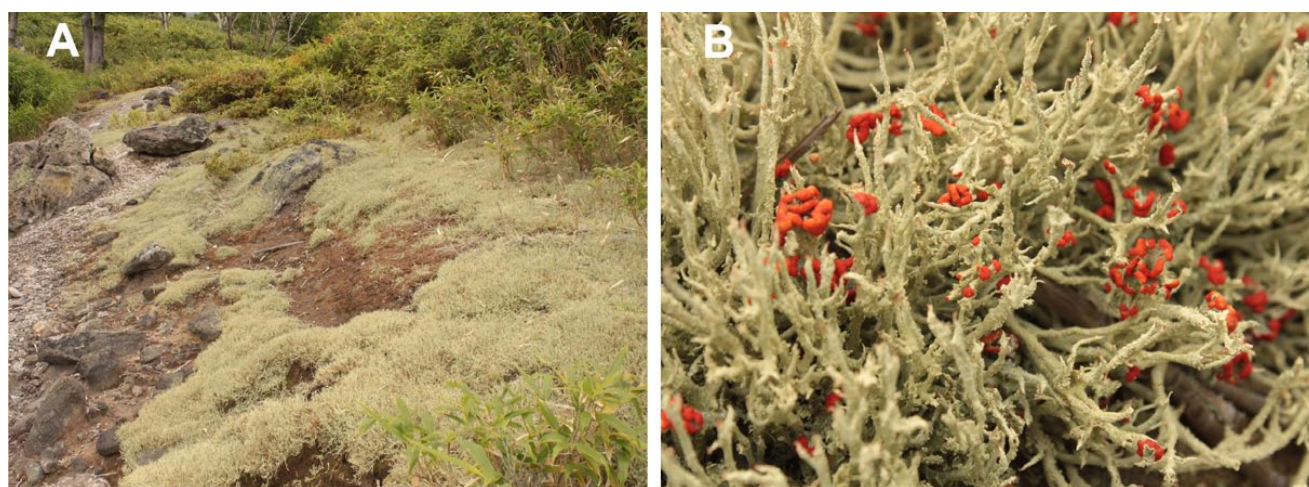
*Cladonia graciliformis* (рис. 3 В, рис. 4) отмечен на всех исследуемых сольфатарных

полях. Ранее вид уже отмечался на южных Курильских островах: на Итурупе – влк. Баранского, на Кунашире – вулканы Менделеева, Тятя, Головнина [11, 13, 28]. Вид имеет горизонтальное слоевище, состоящее из пальчаторассеченных серых, снизу оранжеватых чешуек до 8 мм в диаметре. Подеции стройные,



**Рис. 3.** Фото слоевищ лишайников: (А) *Cladonia granulans*, (В) *C. graciliformis*, (С) *C. vulcani*, (D) *C. furcata*. Размер масштабной линейки 1 см.

**Fig. 3.** Photos of lichen thallus: (A) *Cladonia granulans*, (B) *C. graciliformis*, (C) *C. vulcani*, (D) *C. furcata*. Size of scale line is 1 cm.



**Рис. 4.** (А) Сплошное покрытие лишайника *Cladonia graciliformis* на почве вблизи Голубых озер в окрестностях влк. Баранского (о. Итуруп); (В) *C. graciliformis* при близком увеличении на этой же локации.

**Fig. 4.** (A) A continuous coverage of lichen *Cladonia graciliformis* on soil near the Golubye Lakes in the surroundings of Baransky volcano (Iturup Island); (B) *C. graciliformis* at close magnification at the same location.

тонкие, зеленовато-желтые до 7 см высотой, иногда искривленные, на концах разделены на 2–3 веточки, с небольшими филлокладиями в нижней части, с узкими сцифами и красными апотециями. Вид встречается на термальных участках вблизи активных фумарол и горячих источников. Отмечен в Камчатском крае, Азии и Северной Америке [27, 28].

*Cladonia vulcani* (рис. 3 С) встречен на всех исследуемых сольфатарных полях. Ранее вид уже был отмечен на о. Кунашир для вулканов Головнина, Тятя и Менделеев и о. Итуруп – на хребте Грозный [11–13]. Вид имеет горизонтальное слоевище, состоящее из прижатых к субстрату, со временем исчезающих мелких желтоватых чешуек до 3 мм в диаметре. Подеции дихотомически ветвящиеся, до 5 см высотой, желтоватые, без сциф или с очень узкими сцифами. Поверхность подециев в верхней части лишена коры, зернистая или зернистосоредиозная. Апотеции и пикнидии красные, развиваются на концах апикальных веточек. Вид отличается от *C. granulans* отсутствием сциф и содержанием тамноловой кислоты. *C. vulcani* встречается в кальдерах вулканов, на термальных участках вокруг фумарол и горячих источников. Вид отмечен в Камчатском крае, Азии и Северной Америке [4, 28].

*Cladonia furcata* (рис. 3 D) – также характерный для термальных местообитаний на южных Курильских островах вид, обычно селится на расстоянии 150–200 м до активных фумарол, на измененных почвах термальных полей, часто под кедровым стлаником, образуя сплошной ковер из слоевищ с покрытием на субстрате до 100 %. Ранее вид уже

отмечался на о. Кунашир для окрестностей влк. Тятя [12, 13]. Вид имеет изначально чешуйчато-кустистое слоевище, затем становится кустистым, так как базальные чешуйки скоро исчезают. Подеции до 8 см высотой и до 3 мм в диаметре, оливково-буроватые или коричневые, искривленные или лежащие, иногда не прикрепленные к субстрату, на концах с толстоватыми тупыми или шиловидными веточками, рыхло дихотомически ветвящиеся, обычно с продырявленными пазухами, часто с короткими колючками. Апотеции коричневые на концах тупых или шиловидных «веточек». Аридный вид с евразо-африканским распространением. Обычно произрастает в открытых, степных и остепненных местообитаниях, на сухих лугах, на почве, богатой карбонатами, а также на песчаной почве, на замшелых скалах. Встречается в европейской части России, на Южном Урале, Кавказе, в Южной Сибири и юге Дальнего Востока, Африке, Северной и Южной Америке, Австралии [27].

Результаты исследований показали, что набор напочвенных видов лишайников, заселяющих термальные поля на Курильских островах, сильно ограничен. Характерная особенность зарастания таких местообитаний небольшим количеством видов объясняется способностью выдерживать экстремальные условия среды – фумарольные газы, измененный химический состав и высокие температуры субстрата. Высокий процент проективного покрытия этих видов на субстрате объясняется отсутствием конкурентов, способных заселять специфичные местообитания с агрессивной средой.

**Таблица.** Распределение видов лишайников на изученных локациях с указанием степени встречаемости на площадках  
**Table.** Distribution of lichen species in the studied locations, indicating the degree of occurrence at the sites

| Локация                                                                      | <i>C. granulans</i> | <i>C. graciliformis</i> | <i>C. vulcani</i> | <i>C. furcata</i> |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|
| Северо-западное сольфатарное поле влк. Менделеева (о. Кунашир)               | +++                 | +++                     | ++                | ++                |
| Северо-восточное сольфатарное поле влк. Менделеева (о. Кунашир)              | +++                 | +++                     | +++               | ++                |
| Берег озера Горячее влк. Головнина вблизи термального источника (о. Кунашир) | +++                 | +++                     | +–                | –                 |
| Голубые озера в окрестностях влк. Баранского (о. Итуруп)                     | +++                 | +++                     | –                 | –                 |
| Старозаводское сольфатарное поле влк. Баранского (о. Итуруп)                 | +++                 | +++                     | +–                | +–                |
| Верхнее сольфатарное поле влк. Баранского (о. Итуруп)                        | +++                 | ++                      | –                 | –                 |

*Примечание.* Степень встречаемости: +++ очень часто, ++ часто, +– спорадически, – не встречается.

*Note.* Degree of occurrence: +++ very often, ++ often, +– sporadically, – does not occur

Наибольшие показатели покрытия и встречаемости вблизи активных фумарол на почве имеют два вида – *Cladonia granulans* и *C. graciliformis*. *C. vulcani* активно заселяет вулканические местообитания, в основном сольфатарные поля, но не так агрессивно, как *C. granulans* и *C. graciliformis*. Только на северо-восточном сольфатарном поле влк. Менделеева вид *C. vulcani* доминирует и встречается с высоким проективным покрытием на субстрате. В местах термальной активности все эти три вида лишайника так же активно заселяют и другие субстраты кроме почвы – камни, валеж и корни деревьев на расстоянии 40–50 м от активных фумарол и вдоль берегов термальных источников. Эти виды заметно уменьшают свое господство на измененных вулканических почвах с удалением от источников воздействия – активных фумарол на сольфатарных полях и термальных выходов – на расстоянии 200–250 м, где высшие сосудистые растения начинают доминировать. При этом стоит отметить полное отсутствие данных видов лишайников в обычных условиях на Курильских островах, т.е. для них характерна строгая приуроченность к термальным местообитаниям. Данные виды являются облигатными термофилами и могут служить индикаторами для подобных местообитаний.

Кроме указанных трех видов, на расстоянии 150–200 м от активных фумарол почти на всех исследованных локациях обнаружен *Cladonia furcata*. Вид заселяет участки измененной вулканической почвы, как правило, под пологом кедрового стланика с высоким и очень высоким проективным покрытием на субстрате. При этом вид является обычным на юге Дальнего Востока, включая острова Сахалинской области, встречается в различных типах леса на почве, валеже, корневых лапах [26].

## Выводы

Результаты исследования показали, что видовой состав лишайников, обитающих на почве на термальных полях и по берегам термальных источников исследованных вулканов на южных Курильских островах, ограничен четырьмя видами: *Cladonia granulans*, *C. graciliformis*, *C. vulcani*, *C. furcata*. Все 4 вида относятся к одной жизненной форме – кустистые прямостоящие. Ближе всех к активным

фумаролам, на расстоянии 40–50 м, селятся три вида: *Cladonia granulans*, *C. graciliformis* и *C. vulcani*. Два вида: *Cladonia granulans* и *C. graciliformis* – имеют наибольшие показатели частоты встречаемости на сольфатарных полях и по берегам термальных источников. Распространение лишайников на термальных полях приурочено к микрозоне кедрового стланика. На расстоянии 150–200 м от активных фумарол почти на всех исследованных локациях отмечен вид *Cladonia furcata*, который совместно с вышеуказанными лишайниками формирует лишайниковый покров на почве. На расстоянии 200–250 м от активных фумарол, где высшие сосудистые растения начинают доминировать, господство этих лишайников практически резко прекращается.

## Список литературы

1. Манько Ю.И., Сидельников А.Н. 1989. Влияние вулканизма на растительность. Владивосток: ДВО АН СССР, 161 с.
2. Жарков Р.В., Побережная Т.М. 2008. Влияние сольфатарно-гидротермальной деятельности вулканов на компоненты ландшафтов (влк. Менделеева, о-в Кунашир, Курильские острова). Вестник ДВО РАН, 1: 53–58.
3. Fahselt D. 1995. Growth form and reproductive character of lichens near active fumaroles in Japan. *Symbiosis*, 18(3): 211–231.
4. Shimizu A. 2004. Community structure of lichens in the volcanic highlands of Mt. Tokachi, Hokkaido, Japan. *The Bryologist*, 107(2): 141–151. [https://doi.org/10.1639/0007-2745\(2004\)107\[0141:csolit\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1639/0007-2745(2004)107[0141:csolit]2.0.co;2)
5. Трасе Х.Х. 1963. О растительности окрестностей горячих ключей и гейзеров долины реки Гейзерной полуострова Камчатки. В кн.: Исследование природы Дальнего Востока, Таллин: АН ЭССР, с. 112–146.
6. Кузнецова Е.С., Гимельбрант Д.Е. 2006. Лишайники окрестностей термоминеральных источников верхнего течения рек Анавай и Крерук (Быстринский природный парк, центральная Камчатка). Труды Камчатского филиала Тихоокеанского института географии ДВО РАН, 6: 24–35.
7. Микулин А.Г. 1986. К лишайнофлоре Кроноцкого государственного заповедника (Камчатская область). В кн.: Флора и систематика споровых растений Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, с. 137–150.
8. Микулин А.Г. 1988. Высокогорные лишайники Кроноцкого государственного заповедника (Камчатка). В кн.: Растительный мир высокогорных экосистем СССР. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, с. 149–158.
9. Ежкин А.К., Кордюков А.В. 2016. Особенности изменения параметров эпифитного лишайникового покрова в окрестностях вулкана Менделеева (о. Кунашир, Южные Курилы). Бюл. Ботанического сада-института ДВО РАН, 15: 23–25. URL: <http://botsad.ru/media/cms/3615/23-25.pdf>
10. Ежкин А.К. 2019. Лишайники древесных субстратов в местах проявления сольфатарной активности на Южных Курильских островах. Геосистемы переходных зон, 3(2): 256–263. doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.256-263

11. Трасс Х.Х. 1979. Новые и интересные таксоны из семейства *Cladoniaceae* в лишенофлоре СССР. *Folia Cryptogamica Estonica*, 11: 1–6. URL: <https://ojs.utlib.ee/index.php/FCE/issue/view/951/40>
12. Бредкина Л.И., Добрыш А.А., Макарова И.И., Титов А.Н. 1992. К флоре лишайников острова Кунашир (Курильские острова). *Новости систематики низших растений*, 28: 90–94. URL: [https://www.binran.ru/files/journals/NSNR/1992\\_28/NSNR\\_1992\\_28\\_Bredkina\\_et\\_al.pdf](https://www.binran.ru/files/journals/NSNR/1992_28/NSNR_1992_28_Bredkina_et_al.pdf)
13. Чабаненко С.И. 1999. Лишайники Курильского заповедника (остров Кунашир). В кн.: *Исследование растительного покрова российского Дальнего Востока*. Владивосток, с. 221–228. (Труды ботанических садов ДВО РАН; т. 1).
14. Мархинин Е.К., Стратула Д.С. 1977. *Гидротермы Курильских островов*. М.: Наука, 212 с.
15. Чердынцев В.В. 1973. *Ядерная вулканология*. М.: Наука, 208 с.
16. Лебедев Л.М., Никитина И.Б. 1977. Особенности состава и металлоносность гидротерм аппаратов вулканов (на примере вулканов Менделеева и Головнина). *Современные гидротермы и минералообразование*. М.: Наука, с. 5–25.
17. Лебедев Л.М., Никитина И.Б., Пляшкун И.А., Любомилова Г.В. 1977. Об изменении концентраций рудных компонентов в кислых сульфатно-хлоридных гидротермах вулкана Менделеева во времени. *Современные гидротермы и минералообразование*. М.: Наука, с. 33–38.
18. Жарков Р.В. 2014. *Термальные источники Южных Курильских островов*. Владивосток: Дальнаука, 378 с.
19. Bragin I.V., Chelnokov G.A., Kharitonova N.A. 2019. Geochemistry of thermal springs at Baransky volcano, Southern Kuriles (Russia). *Environmental Earth Sciences*, 78(3): 1–10.
20. Zharkov R.V. 2020. Active volcanoes and thermal springs of Kunashir Island (Russia). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 459(1): 022039. DOI: 10.1088/1755-1315/459/2/022039
21. Дегтерев А.В., Козлов Д.Н., Романюк Ф.А., Жарков Р.В., Рыбин А.В. 2018. Состояние вулкана Берутарубе в 2017 г. (о. Итуруп, Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 2(4): 386–391. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.386-391>
22. Жарков Р.В. 2020. Термопроявления вулкана Эбеко (о. Парамушир, Курильские острова) и их рекреационно-туристский потенциал. *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 514–525. <https://doi.org/10.30730/gtr.z.2020.4.4.514-525>
23. *Южные Курильские острова (природно-экономический очерк)*. 1992. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, Сахалинский фонд культуры, 156 с.
24. Окснер А.Н. 1974. *Определитель лишайников СССР*. Вып. 2. *Морфология, систематика и географическое распространение*. Л.: Наука, 284 с.
25. Андреев М.П. (ред.) 2014. *Флора лишайников России: Биология, экология, разнообразие, распространение и методы изучения лишайников*. Москва; Санкт-Петербург: Тов-во науч. изданий КМК, 392 с.
26. Чабаненко С.И. 2002. *Конспект флоры лишайников юга российского Дальнего Востока*. Владивосток: Дальнаука, 232 с.
27. Трасс Х.Х. 1978. Сем. *Cladoniaceae*. В кн.: *Определитель лишайников СССР*. Л.: Наука, вып. 5, с. 7–70.
28. Чабаненко С.И. 2005. Лишайники. В кн.: *Красная книга Сахалинской области: Растения*. Южно-Сахалинск: Сахалин. кн. изд-во, с. 261–298.

## References

1. Man'ko Yu.I., Sidel'nikov A.N. 1989. [The influence of volcanism on vegetation]. Vladivostok: DVO AN SSSR, 161 p. (In Russ.).
2. Zharkov R.V., Poberezhnaya T.M. 2008. [The influence of the solfataric-hydrothermal activity of volcanoes on landscape components (Mendelev volcano, Kunashir Island, Kuril Islands)]. *Vestnik DVO RAN*, 1: 53–58. (In Russ.).
3. Fahselt D. 1995. Growth form and reproductive character of lichens near active fumaroles in Japan. *Symbiosis*, 18(3): 211–231.
4. Shimizu A. 2004. Community structure of lichens in the volcanic highlands of Mt. Tokachi, Hokkaido, Japan. *The Bryologist*, 107(2): 141–151. [https://doi.org/10.1639/0007-2745\(2004\)107\[0141:csolit\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1639/0007-2745(2004)107[0141:csolit]2.0.co;2)
5. Trass Kh.Kh. 1963. [On the vegetation of the vicinities of hot springs and geysers of the Valley of the Geysers in Kamchatka Peninsula]. In: *Issledovanie prirody Dal'nego Vostoka*. Tallin: AN ESSR, p. 112–146. (In Russ.).
6. Kuznetsova E.S., Gimel'brant D.E. 2006. [Lichens in vicinity of hot springs of the Anavgaj and Kreruk rivers (Bystrinsky Nature Park, Central Kamchatka)]. *Trudy Kamchatskogo filiala Tikhookeanskogo instituta geografii DVO RAN*, 6: 24–35. (In Russ.).
7. Mikulin A.G. 1986. [To lichen flora of the Kronotsky State Reserve (Kamchatka Region)]. In: *[Flora and taxonomy of spore plants of the Far East]*, Vladivostok: DVNTs AN SSSR, p. 137–150. (In Russ.).
8. Mikulin A.G. 1988. [High-mountain lichens of the Kronotsky State Nature Reserve (Kamchatka)]. In: *[The vegetable world of high-mountain ecosystems of USSR]*. Vladivostok: DVNTs AN SSSR, p. 149–158. (In Russ.).
9. Ezhkin A.K., Kordyukov A.V. 2016. Peculiarities of epiphytic lichen cover parameters change in surrounding of the Mendelev volcano, the Kunashir Island. *Bull. Botanicheskogo sada-instituta DVO RAN*, 15: 23–25. (In Russ., abstr. in Engl.). URL: <http://botsad.ru/media/cms/3615/23-25.pdf>
10. Ezhkin A.K. 2019. Lichens of wood substrates in areas of solfataric activity on Southern Kuriles. *Geosistemy perahodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(2): 256–263. (In Russ.). doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.256-263
11. Trass Kh.Kh. 1979. New and rare taxa of Cladoniaceae in the lichen-flora of the U.S.S.R. *Folia Cryptogamica Estonica*, 11: 1–6. (In Russ., abstr. in Engl.). URL: <https://ojs.utlib.ee/index.php/FCE/issue/view/951/40>
12. Bredkina L.I., Dobrysh A.A., Makarova I.I., Titov A.N. 1992. [To the lichen flora of Kunashir Island (Kuril Islands)]. *Novosti sistematiki nizshikh raneniy*, 28: 90–94. (In Russ.). URL: [https://www.binran.ru/files/journals/NSNR/1992\\_28/NSNR\\_1992\\_28\\_Bredkina\\_et\\_al.pdf](https://www.binran.ru/files/journals/NSNR/1992_28/NSNR_1992_28_Bredkina_et_al.pdf)
13. Chabanenko S.I. 1999. [Lichens of the Kuril Nature Reserve (Kunashir Island)]. In: *[Study of the vegetation cover of the Russian Far East]*. Vladivostok, p. 221–228. (Trudy botanicheskikh sadov DVO RAN; vol. 1). (In Russ.).
14. Markhinin E.K., Stratula D.S. 1977. *[Hydrotherms of the Kuril Islands]*. Moscow: Nauka, 212 p. (In Russ.).
15. Cherdyn'tsev V.V. 1973. *[Nuclear volcanology]*. Moscow: Nauka, 208 p. (In Russ.).
16. Lebedev L.M., Nikitina I.B. 1977. The content peculiarities and metal presence in hydrotherms of volcanic edifices (on example of Mendelev and Golovnin volcanoes). In: *[Modern hydrotherms and mineral formation]*. Moscow: Nauka, p. 5–25. (In Russ.).

17. Lebedev L.M., Nikitina I.B., Plyashkun I.A., Lyubomilova G.V. **1977**. [On changes in the concentration of ore constituents in acid-sulfate-chloride hydrotherms of Mendelev volcano in time]. In: [Modern hydrotherms and mineral formation]. Moscow: Nauka, p. 33–38. (In Russ.).
18. Zharkov R.V. **2014**. [Thermal springs of the South Kuril Islands]. Vladivostok: Dal'nauka, 378 p. (In Russ.).
19. Bragin I.V., Chelnokov G.A., Kharitonova N.A. **2019**. Geochemistry of thermal springs at Baransky volcano, Southern Kuriles (Russia). *Environmental Earth Sciences*, 78(3): 1–10.
20. Zharkov R.V. **2020**. Active volcanoes and thermal springs of Kunashir Island (Russia). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 459(1): 022039. DOI: 10.1088/1755-1315/459/2/022039
21. Degterev A.V., Kozlov D.N., Romanyuk F.A., Zharkov R.V., Rybin A.V. **2018**. The state of Berutarube volcano in 2017 (Iturup Island, Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(4): 386–391. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.386-391>
22. Zharkov R.V. **2020**. Thermal fields of the Ebeko volcano (Paramushir Island, Kuril Islands) and their recreational and tourist potential. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 514–525. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.514-525>
23. [The South Kuril Islands (environmental and economic essay)]. **1992**. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, Sakhalinskiy fond kul'tury, 156 p. (In Russ.).
24. Oksner A.N. **1974**. [Identification guide to the lichens of USSR]. Iss. 2. [Morphology, taxonomy and geographical distribution]. Leningrad: Nauka, 284 p. (In Russ.).
25. Andreev M.P. (ed.) **2014**. [The lichen flora of Russia: Biology, ecology, diversity, distribution and methods to study lichens]. Moscow; Saint Petersburg: KMK, 392 p. (In Russ.).
26. Chabanenko S.I. **2002**. [Synopsis of the lichen flora of the south of the Russian Far East]. Vladivostok: Dal'nauka, 232 p. (In Russ.).
27. Trass Kh.Kh. **1978**. Sem. Cladoniaceae. In: [Identification guide to the lichens of USSR]. Leningrad: Nauka, Iss. 5, p. 7–70. (In Russ.).
28. Chabanenko S.I. **2005**. Lichens. In: [The Red Data Book of the Sakhalin Region: Plants]. Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalin. kn. izd-vo, p. 261–298. (In Russ.).

#### Об авторе

**Ежкин Александр Константинович** (<https://orcid.org/0000-0002-2242-2250>), кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии растений и геоэкологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, [ezhkin@yandex.ru](mailto:ezhkin@yandex.ru)

#### About Author

**Ezhkin, Alexander K.** (<https://orcid.org/0000-0002-2242-2250>), Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher of the Laboratory of plant ecology and geoecology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, [ezhkin@yandex.ru](mailto:ezhkin@yandex.ru)

Поступила 04.07.2022

После доработки 24.08.2022

Принята к публикации 03.09.2022

Received 4 July 2022

Revised 24 August 2022

Accepted 3 September 2022

© Автор 2022 г. Открытый доступ.  
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author 2022. Open access.  
Content is available under Creative Commons Attribution  
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 574.62(265.53)

<https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.388-404>  
<https://www.elibrary.ru/njhetv>

## Экологические аспекты многолетнего распределения камчатского краба *Paralithodes camtschaticus* в заливе Анива (о. Сахалин)

© С. А. Низяев

E-mail: nizyaev.sa@yandex.ru

Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства  
и океанографии, Южно-Сахалинск, Россия

**Реферат.** Рассмотрены в межгодовом аспекте закономерности локализации и распределения ядер скоплений промысловых особей камчатского краба *Paralithodes camtschaticus* в зал. Анива (о. Сахалин) и возможные причины трансформации ареала данного вида в заливе. Оценена перспектива восстановления запасов этого вида в заливе с учетом произошедших изменений условий обитания. Для решения этих задач проанализированы и обобщены имеющиеся отчетные (СахНИРО) и литературные данные по траловым (ловушечным) уловам камчатского краба в этом районе. Выполнен анализ расположения основных концентраций личинок в период наиболее высокой численности объекта. По литературным источникам проанализирована функциональная структура поселений камчатского краба в зал. Анива и проведена оценка возможных проблем в реализации популяцией свойственной камчатскому крабу репродуктивной стратегии. Отмечены значительные негативные изменения в распределении и функциональной структуре данного вида краба в зал. Анива. Показано, что вплоть до 2001 г. скопления промысловых самцов камчатского краба были широко распространены и в западной, и в восточной частях зал. Анива. Обе части залива в плане воспроизводства популяции были самодостаточны, в каждой из них отмечены признаки протекания процессов производства молоди. В первую очередь это видно по распределению мест поимки немигрирующей молоди и личинок. С 2004 г. по настоящее время в восточной части зал. Анива исчезли даже единичные уловы камчатского краба. В это же время на западе залива наблюдается динамика восстановления его запасов, хотя в целом этот процесс идет ощутимо медленно. По нашему мнению, причины ухудшения условий обитания и воспроизводства камчатского краба в зал. Анива – критическая трансформация субстратов в восточной части залива, а именно резкое сокращение площади грунтов, пригодных для развития эпифауны, наличие которой является одним из условий выживания молоди краба. Такая трансформация стала возможной по причине значительного расширения (до 20 %) илистых грунтов в заливе, вызванного дампингом грунта в 2003–2006 гг. при строительстве завода сжиженного природного газа.

**Ключевые слова:** камчатский краб, распределение, воспроизводство, дампинг грунта, изменение условий обитания, трансформация ареала, залив Анива

## Ecological aspects of the perennial distribution of the Red King Crab *Paralithodes camtschaticus* in Aniva Bay (Sakhalin Island)

Sergey A. Nizyaev

E-mail: nizyaev.sa@yandex.ru

Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

**Abstract.** Regularity of localization and distribution of clusters of commercial individuals of the Red King Crab *Paralithodes camtschaticus* in Aniva Bay (Sakhalin Island) and possible reasons for the transformation of the range of this species in the bay are considered in the interannual aspect. The prospects of restoring this species in the bay have been assessed, the changes in habitat conditions being taken into account. Available reporting (SakhNIRO)

and literature data on trawl (trap) catches of the Red King Crab in this area are analyzed and summarized in order to solve these problems. The analysis of the location of the main concentrations of larvae during the period of the highest number of the object is performed. The functional structure of the Red King Crab settlements in Aniva Bay is analyzed according to literary sources, and an assessment of possible problems in the implementation of the reproductive strategy proper to the Red King Crab by the population is carried out. Significant negative changes in the distribution and functional structure of this crab species in Aniva Bay are noted. It is shown that the aggregations of commercial individuals of the Red King Crab have been widespread in both the western and eastern parts of Aniva Bay until 2001. Both parts of the bay were self-sufficient in terms of reproduction, with each showing the signs of juvenile production processes. First of all, this can be seen by the distribution of the places of catching of non-migratory juveniles and larvae. From 2004 to the present, even single catches of the Red King Crab have disappeared in the eastern part of Aniva Bay. At the same time, the dynamics of its reserve recovery is observed in the west of the bay, although in general this process is noticeably slow. We believe that the reason for the deterioration of living conditions and reproduction of the Red King Crab in Aniva Bay is a critical transformation of substrates in the eastern part of the bay, namely, a sharp reduction in the area of soils suitable for the development of epifauna, the presence of which is one of the conditions for the survival of crab juveniles. This transformation became possible due to a significant expansion (up to 20 %) of silty soils in the bay caused by soil dumping in 2003–2006 during the construction of a liquefied natural gas plant.

**Keywords:** Red King Crab, distribution, reproduction, dumping, change of living conditions, transformation of areal, Aniva Bay

**Для цитирования:** Низяев С.А. Экологические аспекты многолетнего распределения камчатского краба *Paralithodes camtschaticus* в заливе Анива (о. Сахалин). *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 4, с. 388–404. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.388-404>; <https://www.elibrary.ru/njhetv>

**For citation:** Nizyaev S.A. Ecological aspects of the perennial distribution of the Red King Crab *Paralithodes camtschaticus* in Aniva Bay (Sakhalin Island). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 4, pp. 388–404. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.388-404>; <https://www.elibrary.ru/njhetv>

### Благодарности

Автор признателен рецензентам Д.О. Алексею, В.В. Афанасьеву и Е.М. Латковской за доброжелательное отношение и критические замечания, полезные для данной работы и дальнейших исследований.

### Acknowledgements

Author is grateful to Reviewers Dmitry Alekseev, Victor Afanasiev and Elena Latkovskaya for the friendly attitude and critical comments useful for this work and further research.

## Введение

Камчатский краб *Paralithodes camtschaticus*, наряду с крабом-стригуном опилио, – наиболее изученный вид среди крабов и крабоидов Дальнего Востока. Его биология, распределение и запасы освещаются во множестве работ начиная с XIX в. Наиболее крупные промысловые популяции этого вида обитают у западной Камчатки и в Бристольском заливе. У восточного Сахалина, включая зал. Анива, в настоящее время запасы этого вида невелики (хотя в конце 1930-х годов вылов достигал здесь 1370 т [1]), а освоение целесообразно только для небольших добывающих компаний. Широкое развитие браконьерского промысла и привлечение чрезмерной мощности добывающего флота в конце XX в. оказали катастрофическое влияние на эту популяцию. Снижение промысловой численности камчатского краба в зал. Анива началось в 1996 г., в 1998 г. она снизилась в

4.8 раза по отношению к предыдущему году. Уже к 2001 г. в зал. Анива уловы камчатского краба на 98 % состояли из неполовозрелых особей [1]. Вплоть до настоящего времени идет восстановление этой популяции.

Скорость восстановления популяции и предельная численность камчатского краба в заливе в значительной мере зависит от условий его обитания. Основными факторами, необходимыми для успешного воспроизводства краба, являются достаточная площадь зон твердых грунтов с обрастателями и стабильный транспорт личинок к этим зонам. Сессильный бентос, населяющий такие зоны, является необходимым компонентом среды обитания вида [2].

В настоящей работе рассмотрена многолетняя динамика распределения промысловых скоплений камчатского краба в зал. Анива, оценены возможные причины смены мест их локализации и возможные последствия для воспроизводства вида в этом районе.

## Материал и методы

В работе использованы материалы по пространственному распределению промысловых особей камчатского краба в зал. Анива, полученные при обработке первичных материалов донных траловых (и одной ловушечной) съемок, проведенных Сахалинским филиалом Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО) за период с 1974 по 2021 г. (табл. 1). Используются результаты 14 учетных съемок, со средним количеством станций за съемку около 45. Этого достаточно для фиксирования основных тенденций в распределении скоплений объекта в заливе.

В целях обеспечения сравнимости результатов в межгодовом аспекте мы применили методический прием индексации уловов. Обработка и визуализация пространственного распределения уловов осуществлялась следующим образом.

Суммарный улов каждой съемки был представлен как 100 %, что позволило нормировать съемки, приведя их к единому знаменателю.

Этот шаг дал возможность уравнивать индексы уловов между съемками и избежать влияния различий в уровне плотности уловов между годами. Данные для картирования пространственного распределения формировались исходя из веса индекса улова каждой станции, рассчитанного относительно суммарного индекса съемки (100 %). Уловы каждой съемки делились на три группы: 1) скопления с максимальной плотностью, значения индекса перцентиля выше 90; 2) скопления средней плотности, значения перцентиля 75–90; 3) остальные уловы, значения перцентиля менее 75. Для того чтобы показать, где именно располагались основные скопления в те или иные годы, визуализировались расположение скоплений с максимальными уловами промысловых особей камчатского краба и расположение средних уловов. Это позволило отобразить (показать на картах) наиболее плотные скопления объекта без следов периферии, т.е. выявить и анализировать закономерности распределения без влияния маловероятных случаев.

**Таблица 1.** Перечень использованных в работе учетных съемок

**Table 1.** List of the record surveys used in the work

| Год  | Период съемки    | Судно, производившее съемку, исполнитель работ | Количество станций |
|------|------------------|------------------------------------------------|--------------------|
| 1974 | Июнь–июль        | НПС «Онда» (Ю.Р. Кочнев)                       | 29                 |
| 1979 | Июль–август      | СРТМ «Космический» (С.Н. Тарасюк)              | 74                 |
| 1985 | Апрель–май       | МРС (М.А. Жилина)                              | 66                 |
| 1986 | Декабрь          | СРТМ «Хива» (А.Б. Елизов)                      | 24                 |
| 1987 | Август           | СРТМ «Дончак» (М.А. Жилина)                    | 48                 |
| 1988 | Июнь–август      | СРТМ «Тимашевск» (К.Г. Галимзянов)             | 40                 |
| 1989 | Май              | СРТМ «Тимашевск» (К.Г. Галимзянов)             | 43                 |
| 1994 | Июль             | СТР «Шебунино» (Е.Р. Парина)                   | 32                 |
| 1998 | Октябрь          | НИС «Дмитрий Песков» (И.П. Смирнов)            | 32                 |
| 2001 | Сентябрь         | НИС «Дмитрий Песков» (И.П. Смирнов)            | 42                 |
| 2004 | Июнь             | НИС «Дмитрий Песков» (А.К. Клитин)             | 57                 |
| 2012 | Май              | НИС «Дмитрий Песков» (А.А. Крутченко)          | 58                 |
| 2019 | Сентябрь–октябрь | НИС «Дмитрий Песков» (А.В. Данилов)            | 48                 |
| 2021 | Октябрь–ноябрь   | НИС «Дмитрий Песков» (Д.В. Слепченко)          | 40                 |

*Примечание.* Проводились траловые съемки, за исключением ловушечной съемки 2012 г. Данные о съемках взяты из электронного архива СахНИРО.

*Note.* Trawl surveys were conducted, except for the trap survey of 2012. The data on the surveys are taken from the electronic archive of the SakhNIRO.

## Результаты и обсуждение

### Условия обитания камчатского краба в заливе Анива

Залив Анива представляет собой небольшой, сравнительно мелководный водоем с наибольшей глубиной 93 м ([http://www.smakeev.com/userfiles/science/2015.\\_rybohozyaystvennaya\\_harakteristika\\_zaliva\\_aniva.pdf](http://www.smakeev.com/userfiles/science/2015._rybohozyaystvennaya_harakteristika_zaliva_aniva.pdf)). Шельф зал. Анива плавно переходит в шельф о. Хоккайдо. Условной границей между двумя районами является прол. Лаперуза с минимальной глубиной 55 м. Побережье зал. Анива омывается водами Охотского и Японского морей. В работах середины XX в. [3, 4] для зал. Анива приводится циклоническая схема течений. Однако в более поздних публикациях по этой теме была применена диагностическая модель циркуляции вод, вычисленная на основе многолетних данных [5–7], которая показала, что в зал. Анива и прол. Лаперуза поля течений в существенной мере динамичны и демонстрируют строгую зависимость от типа региональной барической ситуации. Основным фактором сезонной изменчивости циркуляции вод в этом районе является сезонное поле ветра. Весной преобладающее направление вектора скоростей течения – против часовой стрелки (циклонический круговорот), летом – по часовой стрелке, при сохранении микроциклонического круговорота в юго-западной части залива (45°35'–46°25'), севернее скалы Камень Опасности. На существование в зал. Анива антициклонического круговорота указывают и другие авторы [8, 9]. При этом определяющее влияние на прибрежную зону оказывают приливные течения, имеющие сложный характер. Во время прилива движение вод происходит против часовой стрелки, причем в момент полной воды в районе мыса Крильон и мыса Анива течения направлены в противоположные стороны, соответственно в Японское и Охотское море. При отливе картина движения вод меняется на противоположную. Максимальная скорость суммарного течения в районе мыса Крильон составляет 2.6–2.7 м/с [10]. Небольшая по размерам зона подъема вод расположена в северной части залива. Как оказалось, циркуляция вод не является постоянной и в большой степени подчинена преобладающей в этот период розе ветров. Общее направление циркуляции

вод в заливе в апреле–июне играет основную роль при переносе личинок камчатского краба.

По данным исследований середины XX в., в зал. Анива твердые грунты расположены вдоль всей береговой линии [11]. Песчаные осадки распределены в виде полосы шириной 4–10 км, причем у западного побережья залива ее ширина возрастает, достигая в районе скалы Камень Опасности 20 км. Вся центральная часть залива заполнена илистыми осадками, что делает ее непригодной для обитания камчатского краба. Небольшие выходы коренных пород и гравия отмечены вдоль всего западного побережья залива [11].

Бентосные организмы распределены в строгом соответствии с типами грунтов как по биомассе, так и по видовому составу. Исследователями [11] в пределах залива выделено 4 сообщества: 1) морские звезды, крупные брюхоногие моллюски; 2) горгоноцефала, крупные брюхоногие моллюски и краб-стригун; 3) леда (*Nuculana pernula*) и йольдии; 4) группировка леды (*Nuculana pernula*). Названия группировок авторы дали не только по доминирующим видам, но и по индикаторным.

Сообщество, индицируемое морскими звездами и крупными брюхоногими моллюсками, распространено на песчаных грунтах мелководий (25–60 м) вдоль западного, северного и восточного берегов залива с разрывом в бухте Лососей. Показателями сообщества являются морские звезды *Asterias amurensis*, *Solaster pacificus*, *Crossaster papposus* и брюхоногие моллюски *Neptunea excelsior*, *Buccinum bayani*, *B. verkrüzeni*. Биомасса бентоса в данном сообществе достигает 688 г/м<sup>2</sup> при средней 269 г/м<sup>2</sup>. Основную долю биомассы формируют моллюски (53 %) и многощетинковые черви (33 %).

Сообщество, определяемое по офиуре-горгоноцефалу (*Gorgonocephalus caryi*), крупным брюхоногим моллюскам (*Buccinum bayani*, *Argobuccinum oregonensis*, *Neptunea excelsior*, *N. eulimata*) и крабу-стригуну (*Chionoecetes opilio*), характерно для илистых песков и илов в пределах изобат более 50 м и также вклинивается узкой полосой в бухту Лососей. Биомасса тралового бентоса в данном сообществе достигает 264 г/м<sup>2</sup> при средней 170 г/м<sup>2</sup>. Основу биомассы составляют полихеты (43 %).

Сообщество с превалированием двустворчатых моллюсков *N. pernula* и *Yoldia sp.* локализовано в южной центральной части залива и на выходе из него на глубинах свыше 60 м на илах и жидких илах. Сообщество характеризуется обилием полихет, офиур и двустворчатых моллюсков, включая такие виды, как *Lyocima fluctuosa*, *Macoma calcareo* и др. Биомасса тралово-драгировочного бентоса достигает 869 г/м<sup>2</sup> при средней 424 г/м<sup>2</sup>. Основную долю биомассы формируют моллюски (64 %).

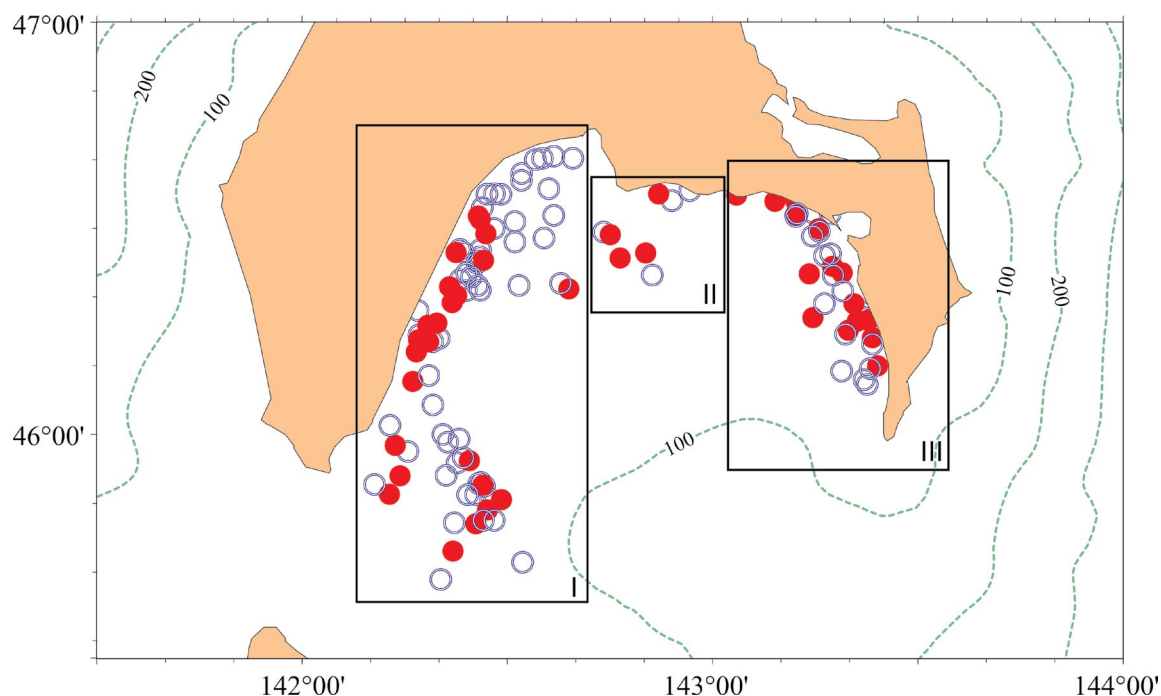
Оправданность выделения группировки леды (*Nuculana pernula*) в качестве обособленного сообщества, как показал В.А. Скалкин [12], не подтвердилась более поздними съемками.

По данным исследований 1980 г., средняя биомасса бентоса в зал. Анива была значительно ниже, чем у юго-восточного и западного побережий Сахалина. Наибольшая биомасса (223 и 282 г/м<sup>2</sup>) отмечена в северо-западной (глубина 15–30 м) и юго-восточной (глубина ≥ 90 м) частях залива<sup>1</sup>.

### Межгодовое распределение скоплений камчатского краба в зал. Анива

В доступный исследованию период (1974–2021 гг.) промысловые скопления камчатского краба были отмечены исключительно вдоль береговой линии залива, за пределами его центральной котловины. Скопления располагались дискретно, в основном отдельно в восточной и западной частях залива. Менее часто они наблюдались в его северной части, в районе, связывающем запад и восток залива и выполняющем роль транзитного (рис. 1). В этом районе отсутствуют постоянные скопления самок и молоди камчатского краба, но, судя по обнаружению здесь промысловых особей, он вполне может играть роль миграционного пути, связывающего западную и восточную части залива.

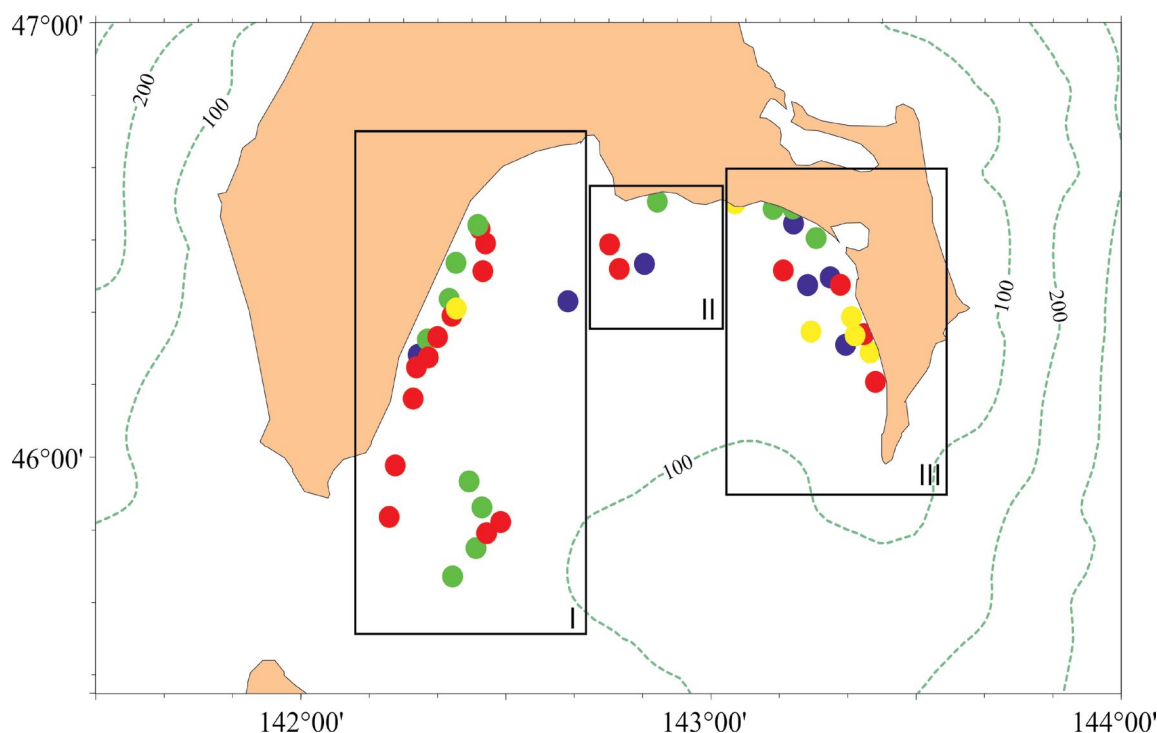
В расположении скоплений в заливе не прослеживается однозначной зависимости от сезона (рис. 2). Скопления обнаруживались круглый год во всех частях залива вдоль береговой линии.



**Рис. 1.** Освоение акватории зал. Анива промысловыми скоплениями камчатского краба (по данным 1974–2021 гг.). Залитыми кружками обозначены уловы со значением перцентиля >90, прозрачными – уловы со значением перцентиля 75–90. Районы залива: I – западный, II – северный, III – восточный.

**Fig. 1.** Development of the water area of Aniva Bay by commercial clusters of the Red King Crab (as of 1974–2021). The filled circles represent the catches with a percentile value >90, and the transparent circles represent the catches with a percentile value 75–90. Areas of the bay: I – western, II – northern, III – eastern.

<sup>1</sup> Распределение и калорийность бентоса в заливе Анива: отчет о НИИР. Исп. А.В. Алехнович, С.Л. Королев; рук. к.б.н. В.Д. Табунков; СакхТИНРО. Южно-Сахалинск, 1980. 30 с. Инв. № 4734. [Benthos distribution and calorific in Aniva Bay: report on research work. Investigators A.V. Alekhovich, S.L. Korolev; headed by Cand. Sci. (Biol.) V.D. Tabunkov; SakhTINRO. Yuzhno-Sakhalinsk, 1980. 30 p. Inv. No. 4734]



**Рис. 2.** Межгодовое распределение промысловых скоплений камчатского краба максимальной плотности в зал. Анива по календарным сезонам. Синие кружки – зима, зеленые – весна, красные – лето, желтые – осень. Районы залива: I – западный, II – северный, III – восточный.

**Fig. 2.** Interannual distribution of commercial clusters of the Red King Crab of maximum density in Aniva Bay by calendar seasons. Blue circles – winter, green – spring, red – summer, yellow – autumn. Areas of the bay: I – western, II – northern, III – eastern.

Центры скоплений в большинстве своем не совпадали, но их приуроченность к каждой из трех частей залива очевидна. Возможно, различия в распределении центров внутри каждой из частей связаны с тем, что в каждый отдельный сезон скопления приурочены к разным глубинам. Это в небольшом диапазоне меняет расположение центра скопления, не изменяя общую картину распределения промысловых особей в заливе.

Таким образом, на наш взгляд, локализация скоплений промысловых особей камчатского краба в той или иной части залива не носит сезонного характера. Скопления в любой из сезонов обнаруживались как на западе, так и на востоке залива. Поэтому поселения на западе и востоке, по нашему мнению, не являются частями единой функциональной структуры популяции камчатского краба в заливе. Единственное исключение – это отсутствие обнаружения скоплений осенью в северном районе, что свидетельствует о непостоянном нахождении здесь краба и подчеркивает характер этого района как транзитной зоны.

Анализируя динамику распределения промысловых скоплений краба по годам, можно условно выделить три основных периода по наличию/отсутствию скоплений в той или иной части залива и влиянию на них промысла (табл. 2).

Первый, с 1974 по 1987 г., характеризуется наличием плотных скоплений преимущественно в восточной части залива (рис. 3 А). В западной части скопления присутствовали, но их плотность была на уровне ниже, чем на востоке. Максимальные уловы с западной стороны отмечались крайне редко, как исключение. В целом в эти годы камчатский краб наиболее полно осваивал прибрежную акваторию залива, включая северный транзитный участок. На этом участке в данный временной отрезок промысловые скопления отмечались гораздо чаще, чем в последующие годы. Промысел в этот период в зал. Анива практически отсутствовал или был крайне незначителен по сравнению с последующим периодом.

**Таблица 2.** Схема локализации скоплений промысловых особей камчатского краба в районах зал. Анива в годы съемок

**Table 2.** Scheme of localization of the clusters of commercial individuals of the Red King Crab in the areas of Aniva Bay during survey years

| Год  | Район |    |     |
|------|-------|----|-----|
|      | I     | II | III |
| 1974 |       |    |     |
| 1979 |       |    |     |
| 1985 |       |    |     |
| 1986 |       |    |     |
| 1987 |       |    |     |
| 1988 |       |    |     |
| 1989 |       |    |     |
| 1991 |       |    |     |
| 1992 |       |    |     |
| 1993 |       |    |     |
| 1994 |       |    |     |
| 1998 |       |    |     |
| 2001 |       |    |     |
| 2004 |       |    |     |
| 2012 |       |    |     |
| 2013 |       |    |     |
| 2019 |       |    |     |
| 2021 |       |    |     |

a
  b
  c

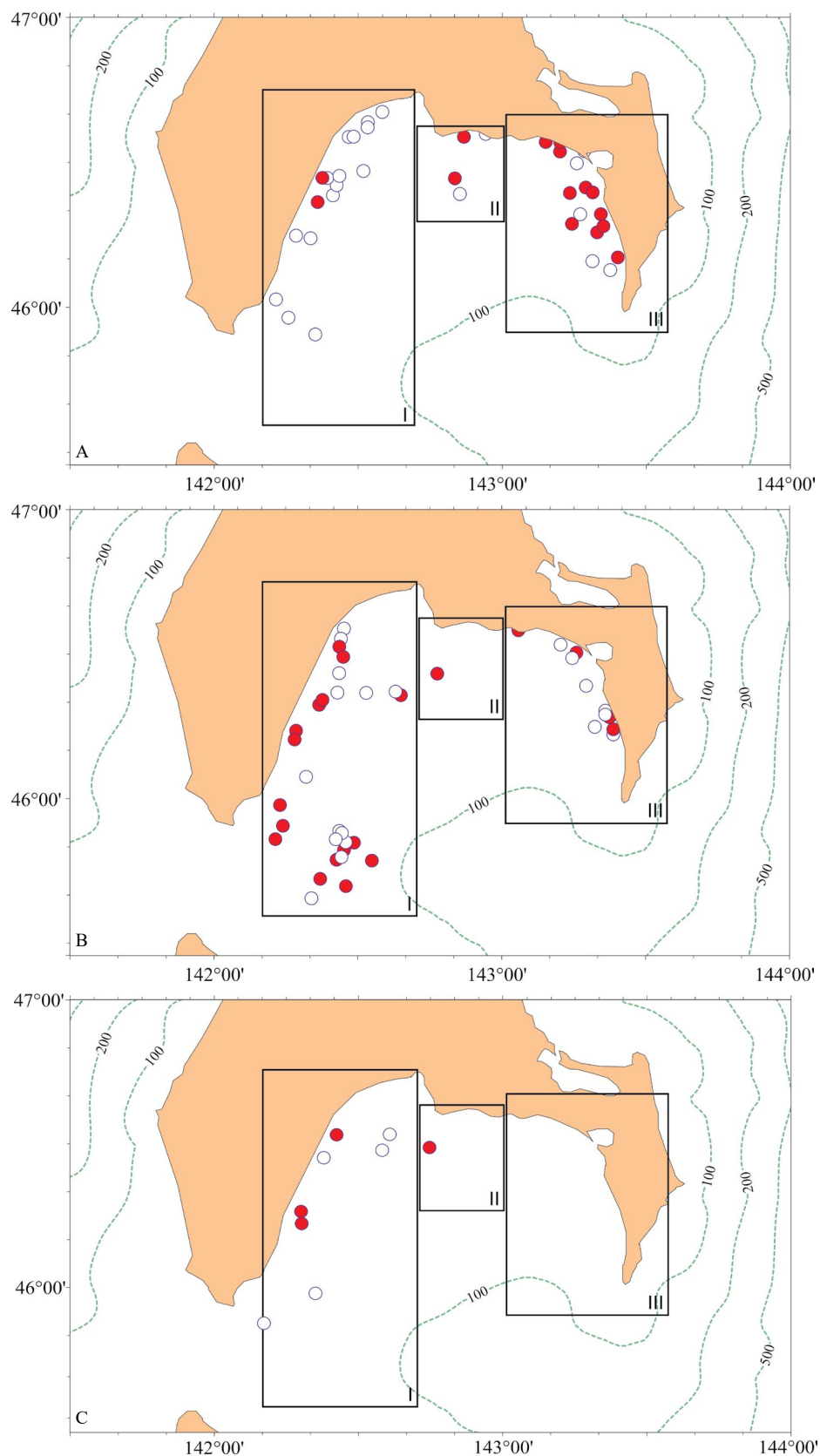
*Примечание.* Районы залива: I – западный, II – северный, III – восточный. (a) уловы со значением перцентиля <75, (b) скопления средней плотности (значение перцентиля 75–90), (c) скопления с максимальной плотностью (значение перцентиля >90).

*Note.* Areas of the bay: I – western, II – northern, III – eastern. (a) catches with a percentile value < 75, (b) clusters of mean density (percentile value is 75–90), (c) clusters of maximum density (percentile value > 90).

С 1988 до 2001 г. промысловые скопления камчатского краба обнаруживались, как и ранее, и в восточной и в западной частях залива, но образование с западной стороны скоплений с максимальной плотностью стало обычным явлением (рис. 3 В), в то время как ранее они встречались лишь изредка. Распространение максимальных скоплений камчатского краба в западную часть залива, где в предыдущий период они были крайне редки, позволяет сде-

лать предположение о дальнейшем развитии там самодостаточных поселений. Однако на рассматриваемый период пришлось наиболее интенсивное и практически бесконтрольное освоение ресурсов крабов, приведшее к их полному истощению и запрету промысла. Поэтому относительное повышение ранга скоплений в западной части залива вполне могло быть результатом не развития западного поселения, а прореживающего влияния промысла на скопления в его восточной части. Второе предположение представляется более обоснованным, если учесть, что у камчатского краба есть сложности с воспроизводством в западной части залива, на которых мы остановимся ниже. Кроме того, в этой части залива обитает крупная популяция четырехугольного волосатого краба (*Erimacrus isenbeckii*), потребляющая те же ресурсы и являющаяся территориальным и трофическим конкурентом камчатскому крабу.

Влияние промысла, уравнившее в первой половине этого периода плотности поселений камчатского краба в обеих частях залива, к 2001 г. привело к исчезновению промысловых особей в западной части залива. Это связано с почти полным истреблением промысловой части популяции камчатского краба к этому времени [1]. Факт, что промысловые особи в западной части залива были практически полностью уничтожены, объясняется пристальным интересом браконьеров к этой части залива из-за возможности вести параллельно добычу камчатского краба при промысле четырехугольного волосатого. В условиях общей деградации запасов восточная часть залива с этой точки зрения не представляла такого выбора, поэтому здесь уловы исчезли в последнюю очередь, и на несколько лет (1998, 2001 гг.) участки с этими уловами получили статус основных скоплений. В 2004 г. при проведении учетной съемки в зал. Анива не было поймано ни одной промысловой особи камчатского краба, а личинки этого вида в акватории залива полностью отсутствовали [13]. То есть к началу 2000-х годов запас камчатского краба в зал. Анива был практически полностью истреблен, и последующее восстановление группировок западной и восточной частей залива началось с равных, близких к нулю позиций.



**Рис. 3.** Расположение основных промысловых скоплений камчатского краба в зал. Анива по периодам: А – 1974–1987 гг., В – 1988–2001 гг., С – 2012–2021 гг. Залитые кружки – уловы со значением перцентиля >90, прозрачные – со значением перцентиля 75–90.

**Fig. 3.** Location of the main commercial clusters of the Red King Crab in Aniva Bay by periods: А – 1974–1987; В – 1988–2001; С – 1988–2001. Filled circles are the catches with a percentile value >90, transparent ones – with a percentile value 75–90.

Последний период, период восстановления, охвачен имеющимися данными с 2012 г. и длится по настоящее время (рис. 3 С). Начало этого периода лежит где-то между 2005 и 2011 гг., но точнее определить его начало невозможно ввиду отсутствия данных в эти годы. Для этого периода характерно расположение скоплений краба исключительно в западной части залива, а с восточной стороны отмечено его полное отсутствие. Причем по прошествии 16 лет с того года (2003), когда промысел камчатского краба в зал. Анива был прекращен по причине почти полного уничтожения объекта, биомасса промыслового стада достигла  $1019 \text{ т}^2$ . И хотя увеличение биомассы произошло исключительно в западной части залива, при отсутствии даже штучных уловов в его восточной части, можно уверенно говорить о появлении тенденции к восстановлению популяции и ее жизнеспособности.

#### ***Особенности функциональной структуры поселений камчатского краба в зал. Анива***

Известно, что возможность воспроизводства, а значит, восстановления популяции зависит от устойчивости функциональной структуры. Следует отметить, что функциональная структура популяции камчатского краба в зал. Анива не была исследована в полной мере. Даже в монографии А.К. Клитина [1], которая содержит наибольший объем информации по камчатскому крабу зал. Анива, остаются «белые пятна», т.е. недоказанные и необъяснимые представленными фактами моменты.

В частности, при рассмотрении результатов 1976 г. по распределению личинок камчатского краба в зал. Анива отмечено, что личинки стадий зоеа от I до III на протяжении всего периода развития располагались на небольшом расстоянии друг от друга в пределах бухты Лососей, а личинки стадии зоеа IV обнаружены довольно далеко на восток (рис. 4). А.К. Клитин [1] полагает, что дрейф личинок камчатского краба в юго-восточном направле-

нии вполне вероятен. Это означает, что личинки, по его мнению, принадлежат к одному пулу, т.е. общему месту выклева. Однако никаких подтверждающих это данных не предоставлено. Клитин делает ссылку на работы В.М. Пищальника [8], В.М. Пищальника и В.С. Архипкина [9], где указывается на существование у побережья зал. Анива антициклонического круговорота вод. При этом он акцентирует внимание на том, что скорости течения в северо-западной мелководной части залива, где происходит выход личинок камчатского краба в планктон, минимальны, тем самым фактически опровергая высказанный им же тезис о дрейфе личинок в восточную часть залива.

Действительно, в северной части антициклонического вихря скорость движения вод весной и осенью составляет всего 3–5 см/с [10], что никак не способствует транспорту личинок на большие расстояния за незначительный временной период. Более того, в восточной части залива скорость вод возрастает, в отдельных случаях до 26–38 см/с, но направление переноса вод меняется на северо-западное [5, 6], т.е. навстречу предполагаемому дрейфу. На поверхности структура течений определяется в основном полем ветра, сила и вектор направленности которого не имеют постоянных значений. Межгодовая устойчивость таких течений вызывает сомнения. Это не позволяет быть уверенным, что ежегодно перемещение личинок осуществляется исключительно в одни и те же районы.

Таким образом, представляется, что личинки стадий зоеа от I до III, обнаруженные в ктовой части бухты Лососей, и личинки стадий зоеа III–IV из восточной части зал. Анива принадлежат к разным личиночным пулам. Мы полагаем, они выпущены самками из разных стад, располагавшихся в западной и восточной частях залива. Кроме того, отсутствие устойчивых течений в заливе не гарантирует сноса личиночного пула на локальные участки с благоприятными условиями для подращивания молоди.

<sup>2</sup> Исследования распределения, численности, качества и воспроизводства водных биологических ресурсов, а также среды их обитания и разработки прогноза изменений указанных параметров под воздействием природных и антропогенных факторов по теме: «Особенности многолетнего распределения промыслового стада камчатского краба в заливе Анива»: отчет о НИР. 2022. Отв. исполнитель С.А. Низяев; исп. А.В. Лученков; СахНИРО. Южно-Сахалинск, 35 л. Инв. № 13288 н/а. [Studies on the distribution, abundance and reproduction of aquatic bioresources, as well as their habitat and the development of a forecast of changes in the specified parameters under the influence of natural and anthropogenic factors on the topic: «Features of interannual distribution of the harvestable stock of the Red King Crab in Aniva Bay»: Report on research work. 2022. Responsible investigator S.A. Nizyaev; executor A.V. Luchenkov; SakhNIRO. Yuzhno-Sakhalinsk, 35 sheets. Inv. No. 13288 н/а.]

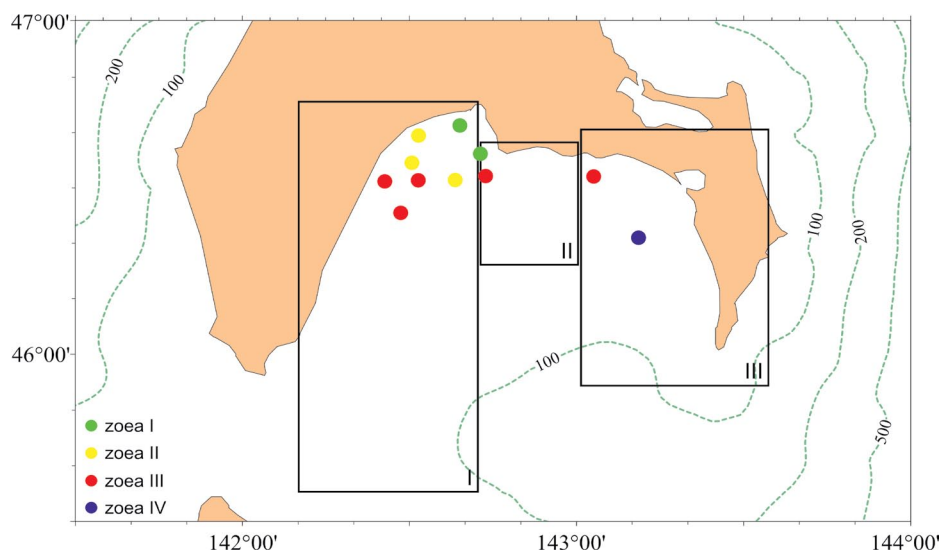


Рис. 4. Распределение личинок камчатского краба в зал. Анива (22 апреля – 1 июня 1976 г.) [1].

Fig. 4. Distribution of larvae of the Red King Crab in Aniva Bay (April 22 – June 1, 1976) [1].

Еще одним фактом, подтверждающим предположение о разном происхождении личинок бухты Лососей (стадии зоеа I–III) и личинок из восточной части зал. Анива (стадии зоеа III–IV), является расположение мест поимки немигрирующей молоди (особи с размером карапакса не более 5 см) за довольно продолжительный период с 1987 по 1998 г. (рис. 5). Мы видим, что в заливе обнаружено два вытянутых вдоль береговой линии поля молоди, которые имеют разрыв по траверзу бухты Лососей. Чем отличался этот участок от остальной части прибрежной полосы, где наблюдались уловы молоди? Только отсутствием бентосных сообществ, характерных для твердых грунтов, что является следствием сильного заиления этого участка. Такие условия критически влияют как на выживание оседающих глаукотоз, так и на развитие мальков в первые два года жизни, потому что для этих стадий требуются сложноструктурированные субстраты с обилием гидроидов, мшанок и других сидячих фильтраторов [14]. Поскольку наблюдаются два обособленных поля подращивания молоди и нет условий для стационарного обмена личинками между этими полями, то можно предполагать, что в этих частях залива обитают структурно разобщенные части возможно единой популяции. Нет сомнения в том, что между этими структурами возможен обмен взрослыми особями. Как мы уже показывали, в северном транзитном районе скопления краба периодически обнаруживаются. Причем в есте-

ственном состоянии запаса, когда отсутствуют критический промысел и его последствия, этот район осваивается крабом значительно чаще (табл. 2; рис. 3), т.е. это может служить индикатором благополучия популяции. Наличие такой возможности не дает оснований считать поселения в восточной и западной частях залива отдельными популяциями, но позволяет усомниться в необходимости существования любой из частей как условия для функционирования другой. Иными словами, при элиминации любой из этих структур вторая сможет развиваться самостоятельно.

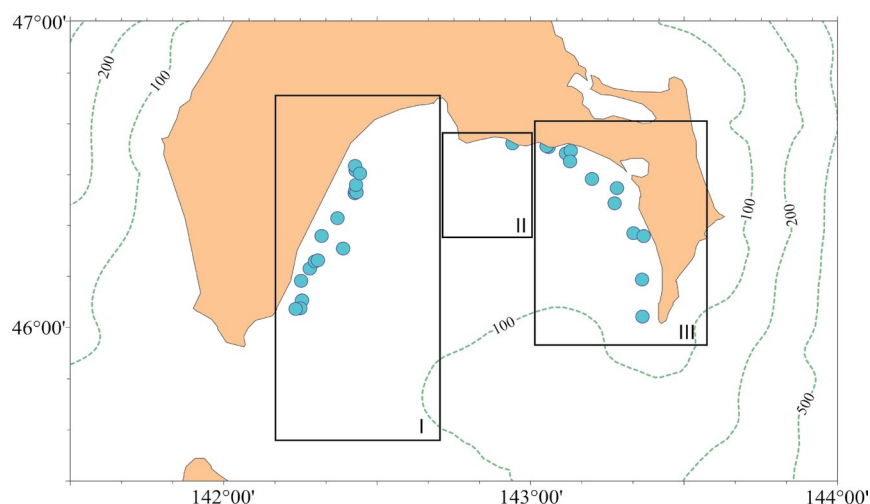
#### ***Возможные причины трансформации поселений камчатского краба в зал. Анива и условия их существования***

Фактически полное уничтожение камчатского краба в зал. Анива к началу 2000-х годов предопределило крайне низкую результативность траловых учетных работ по этому виду почти на два десятилетия. Краб обнаруживался в сравнительно небольших количествах вплоть до 2019 г., когда в западной части залива был отмечен ультравысокий улов молоди и взрослых особей. Краб был обнаружен на 6 станциях в западной части залива: на одной станции максимальный улов достигал 285 шт. за 17 мин траления, на 5 остальных – штучно. Таким образом, по истечении 16 лет после запрета промысла мы наблюдаем вполне очевидный признак восстановления западной части попу-

ляции – наличие здесь молоди камчатского краба, в то время как в восточной части краба не обнаружено даже в штучных количествах.

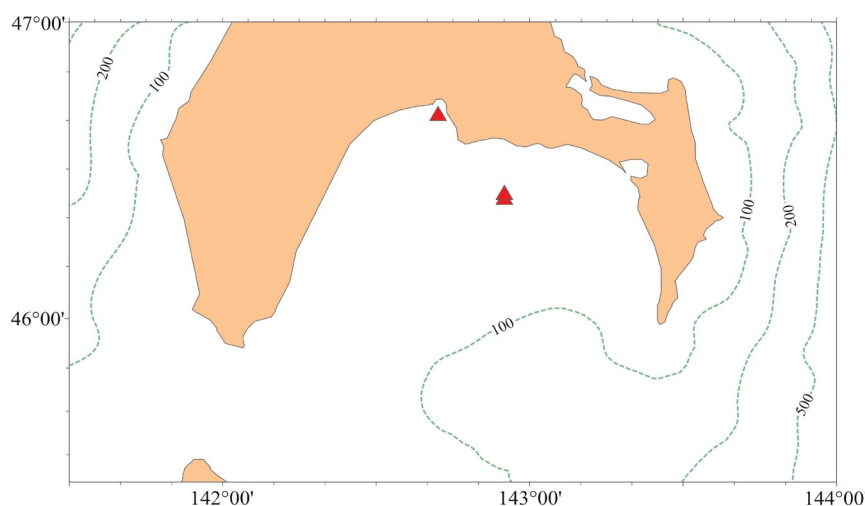
Для того чтобы попытаться объяснить такое положение дел, прежде всего стоит обратить внимание на процессы, которые имели место в пределах этой акватории и могли оказывать влияние на изменение среды. Пожалуй, наиболее ощутимым для условий обитания гидробионтов в зал. Анива был массивированный

сброс грунта в 2003–2006 гг. при строительстве завода по производству сжиженного природного газа (СПГ). Грунт сбрасывался преимущественно на полигоне с глубиной 63 м в координатах 46°24'–46°25' с.ш., 142°55' в.д. а также в значительно меньшем объеме на несанкционированном полигоне на глубине 10 м в координатах 142°42'00" с.ш. и 46°41'05" в.д. рядом с районом работ<sup>3</sup> (рис. 6). В общей сложности было сброшено более 1.5 млн м<sup>3</sup> грунта [15, 16].



**Рис. 5.** Места встречаемости немигрирующей молоди (менее 5 см по ширине карапакса) камчатского краба в зал. Анива (по данным 1987–1998 гг.) (по [1]).

**Fig. 5.** Places of occurrence of non-migratory juvenile (less than 5 cm in width of carapace) of the Red King Crab in Aniva Bay (as of 1987–1998) (by [1]).



**Рис. 6.** Места дампинга грунта в 2003–2006 гг. при строительстве завода СПГ.

**Fig. 6.** Soil dumping sites in 2003–2006 when building the LNG plant.

<sup>3</sup> Современное состояние условий среды и кормовой базы зал. Анива: отчет о НИР (промежуточный). 2015. Исп. Е.М. Латковская, В.С. Лабай, О.В. Кусайло, Ж.Р. Цхай, Т.Г. Коренева, Ю.Н. Полтев, Т.А. Могильникова, Д.С. Заварзин, Д.Р. Файзулин, В.Н. Частиков; рук. к.б.н. С.А. Низяев; СахНИРО. Южно-Сахалинск, 199 с. Инв. № 11960. [Current state of the environment and food supply of Aniva Bay: report on research work (interim). 2015. Investigators: E.M. Latkovskaya, V.S. Labay, O.V. O.V. Kusaylo, Zh.R. Tskhai, T.G. Koreneva, Yu.N. Poltev, T.A. Mogil'nikova, D.S. Zavarzin, D.R. Faizulin, V.N. Chastikov; headed by S.A. Nizyaev; SakhNIRO. Yuzhno-Sakhalinsk, 199 p. Inv. No. 11960.]

Сбрасываемый грунт представлен преимущественно разрушаемыми алевролитами. Одной из важных его характеристик, с точки зрения оценки воздействия на водные биоресурсы и среду обитания, является способность к разрушению до пелитоморфных частиц. Если объемы такого грунта велики, а место сброса подвержено влиянию активного движения вод, то сброшенные и образовавшиеся со временем тонкодисперсные донные осадки распространяются по рельефу дна, засыпая выходы крупных обломочных пород. В результате происходит изменение среды обитания, заиление донного грунта, вызывающее тотальную смену видового состава бентоса, сокращение ориентированных на твердые грунты биоценозов и расширение биоценозов, обитающих на илистых грунтах.

Естественный процесс заиления грунтов морского дна наблюдается повсеместно. Этот процесс существенно растянут во времени и в обыденном течении определяется естественным образованием (накоплением) илов, а не спонтанным их перемещением с одного участка на другой. В силу отсутствия резкого продвижения илов смена биоценозов, где идет такое замещение, имеет такой же постепенный характер.

Но трансформация грунтов в зал. Анива, по исследованиям 2005–2013 гг.<sup>4</sup>, имела характер резкого изменения, произошедшего за крайне малый срок, не более 10 лет. Если в 2005 г. сброшенный грунт локально располагался на участках дампинга, то к 2013 г. экспансия илов на 20 % расширила площадь их распространения в заливе<sup>5</sup>. По данным этих исследований, продукты разрушения алевролитов практически полностью заместили в прибрежной зоне не только жесткие грунты в виде гальки и крупных обломочных пород (рис. 7), но и существенно сократили пояс песчаных грунтов (рис. 8). Особенно заметно

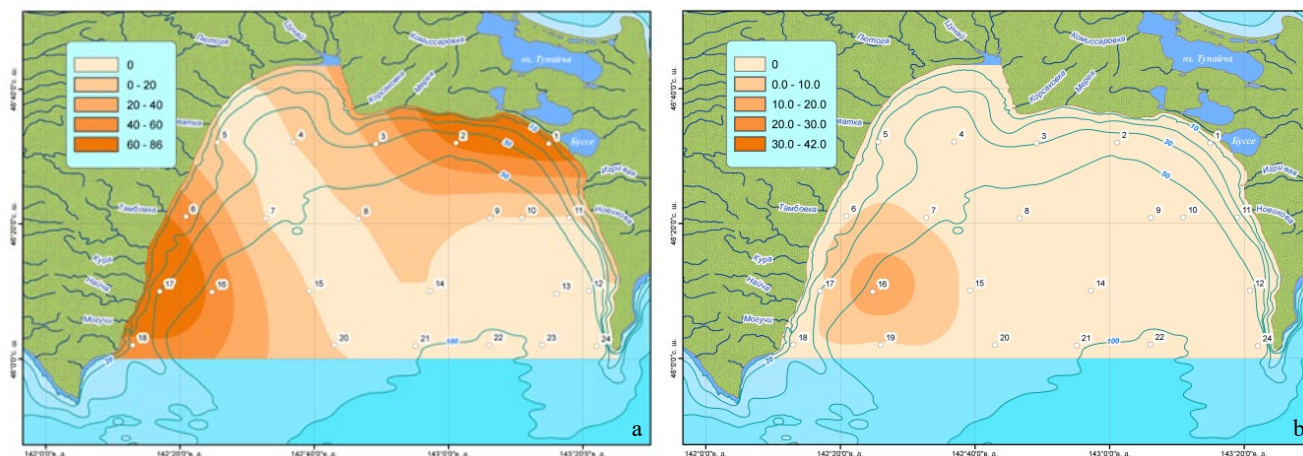
это в восточной части залива, где доля псефитов и псаммитов стала крайне низка, зато пелиты распространились максимально широко (рис. 9). Так, в 2005 г. донные грунты восточного участка были представлены относительно равными долями псефитов (32.9 %), псаммитов (37.31) и алеврито-пелитов (29.8 %). В 2013 г. в структуре грунтов фиксируются серьезные изменения. На фоне стабильного содержания псаммитов (увеличение до 38.63 %), практически полностью исчезают псефиты (0.38 %) и значительно возрастает содержание алеврито-пелитов (до 61.0 %)⁶.

Вместе с продвижением илов в сторону береговой линии отмечено смещение в том же направлении границ ареала *Nuculana pernula* [17]. Так, в районе дампинга за год произошло резкое увеличение биомассы нукуляны более чем в 35 раз [18]. Этот вид можно считать индикатором заиления водоемов, и резкое расширение его ареала в зал. Анива после дампинга грунта подтверждает, что именно это воздействие повлекло за собой все последующие изменения донных осадков и биоты. Возможно, сброшенный грунт вполне подошел в качестве субстрата для нукуляны и с распространением этого илистого субстрата к берегу произошло то резкое расширение ее ареала, которое описывается в статье [17]. Спонтанность, неестественность расширения ареала нукуляны демонстрируется его мозаичным дроблением с резким увеличением биомассы на границах ареала при ее снижении на местах традиционных скоплений. Такое перераспределение характеризуется приближением среднего значения биомассы к ее максимальным значениям. Это в полной мере объясняется поведением популяции в условиях резкого расширения жизненного пространства, когда темпы миграции особей популяции значительно превосходят возможные темпы увеличения ее численности.

<sup>4</sup> Оценка содержания загрязняющих веществ в донных осадках: Отчет о научно-исследовательской работе по оценке экологического состояния зал. Анива в 2005 г. **2007**. Исп. Е.М. Латковская, И.А. Митракович, Т.Г. Коренева; рук. к.б.н. В.И. Радченко; СахНИРО. Южно-Сахалинск, 67 с. Инв. № 10368; Современное состояние условий среды и кормовой базы зал. Анива: отчет о НИР... **2015**. [Estimation of pollutant content in bottom sediments: Report on research work on the estimation of the ecological state of Aniva Bay in 2005. **2007**. Investigators: E.M. Latkovskaya, I.A. Mitrakovich, T.G. Koreneva; headed by Cand. Sci. (Biol.) V.I. Radchenko; SakhNIRO. Yuzhno-Sakhalinsk, 67 p. Inv. No. 10368; Current state of the environment and food supply of Aniva Bay: report on research work (interim). **2015**.]

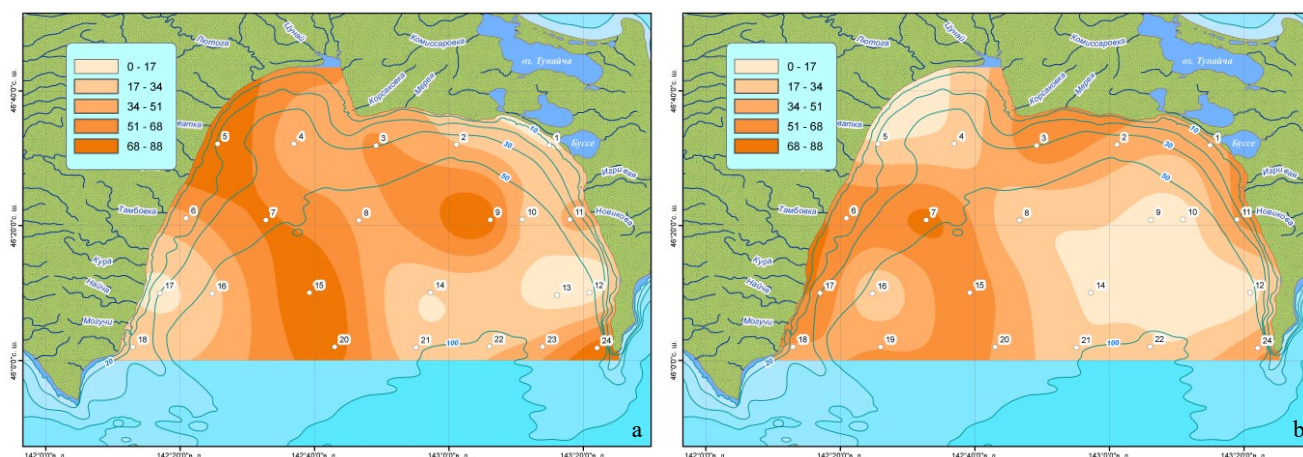
<sup>5</sup> См. указанные отчеты о НИР 2007 и 2015 гг. [See specified reports on research work of 2007 and 2015.]

<sup>6</sup> Современное состояние условий среды и кормовой базы зал. Анива: отчет о НИР... **2015**. [Current state of the environment and food supply of Aniva Bay: report on research work (interim). **2015**.]



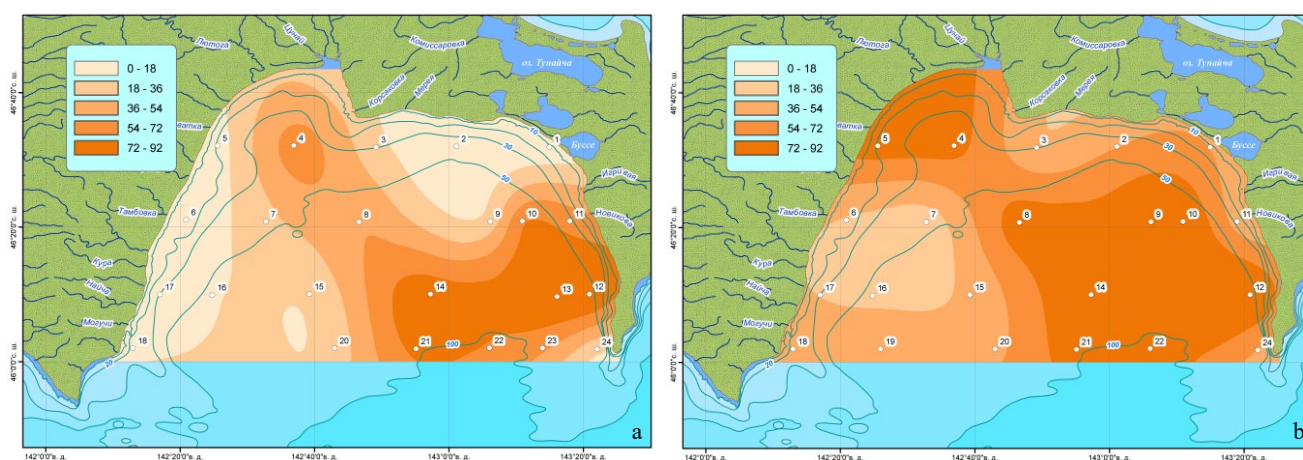
**Рис. 7.** Распределение (%) псефитов в донных отложениях зал. Анива в 2005 (а) и 2013 (б) гг. Здесь и на рис. 8, 9 данные из указанного выше отчета СакхНИРО «Современное состояние условий среды и кормовой базы зал. Анива», 2015 г. Цифры в кружках – номера станций отбора донных отложений.

**Fig. 7.** Distribution (%) of psephytes in the bottom sediments in Aniva Bay in 2005 (a) and 2013 (b). Here and in Fig. 8, 9 the data are from the above report of SakhNIRO «The current state of the environment and food supply in Aniva Bay», 2015. Numbers in circles are numbers of sediment sampling stations.



**Рис. 8.** Распределение (%) псаммитов в донных отложениях зал. Анива в 2005 (а) и 2013 (б) гг.

**Fig. 8.** Distribution (%) of psammytes in the bottom sediments in Aniva Bay in 2005 (a) and 2013 (b).



**Рис. 9.** Распределение (%) алевито-пелитов в донных отложениях зал. Анива в 2005 (а) и 2013 (б) гг.

**Fig. 9.** Distribution (%) of silty pelites in the bottom sediments in Aniva Bay in 2005 (a) and 2013 (b).

Произошедшее замещение жестких грунтов пелитами коренным образом видоизменило местные биотопы, сделав невозможным существование видов, жизненный цикл которых частично или полностью связан с сообществами обрастателей. Камчатский краб как раз является таким видом, часть жизненного цикла которого критическим образом зависит от развития сессильного бентоса [2]. Отсутствие таких биотопов делает невозможным воспроизводство популяции камчатского краба в восточной части залива, но не препятствует проникновению туда взрослых особей из западной части.

Другим значимым фактором, определяющим современное существование камчатского краба в зал. Анива, является состояние кормового бентоса, которое тесно связано с происходящей в заливе трансформацией грунтов. Падение биомассы кормового бентоса в заливе в целом происходило и ранее, до дампинга, на протяжении длительного периода: с 200 г/м<sup>2</sup> в 1949 г. до 74 г/м<sup>2</sup> в 1980 г.<sup>7</sup>, что делает этот процесс в целом присущим данному водоему и подчеркивает естественность его характера. Причем считается, что эта тенденция продолжалась и после 1980 г., поскольку в 2005 г. этот показатель достиг 38 г/м<sup>2</sup>, т.е. уменьшился почти в 2 раза<sup>8</sup>.

Однако аналогичных данных по состоянию кормовой биомассы непосредственно перед дампингом нет, поэтому утверждение об исключительно естественных причинах падения биомассы не может рассматриваться как единственно верная версия. Вполне вероятно, что до 2003 г., до дампинга, средняя величина кормовой биомассы если и отличалась от таковой в 1980 г., то не так кардинально, как в 2005 г. И важно, что после 2005 г. в зал. Анива наблюдалось не дальнейшее падение биомассы кормового бентоса, аналогичное наблюдавшейся с 1949 г. тенденции, а, напротив, восстановление (до 47 г/м<sup>2</sup> по состоянию на 2013 г.)<sup>9</sup>. Поэтому наиболее вероятно, что провал до столь низкого значения в 2005 г. вызван последствиями какого-то масштабного воздей-

ствия, а затем началось закономерное восстановление биомассы до уровня текущей нормы. Других масштабных воздействий на природную среду залива, кроме дампинга грунта, не отмечено.

Таким образом, мы полагаем, что причиной, повлекшей изменения в биомассе кормового бентоса, является именно дампинг грунта, вектор воздействия которого совпадает с направлением распространения илов, от моря к берегу. Замещение жестких грунтов пелитами, безусловно, должно привести к тотальной смене биоценозов. Перифитон и сопутствующие ему организмы в условиях резкого поглощения илами отмирают, демонстрируя резкий спад биомассы кормового бентоса, а на их месте закономерно развивается эндобентос, представленный преимущественно грунтоедом [18]. Эти процессы объясняют, почему с 2005 по 2013 г. обнаружился тренд на восстановление биомассы на фоне многолетней тенденции ее снижения.

Нам этот аспект интересен и с точки зрения обеспеченности пищей крабовых популяций. Во-первых, оба потребителя кормового бентоса твердых грунтов – камчатский и четырехугольный волосатый крабы – пока территориально ограничены западной частью залива [19] и вынуждены конкурировать, поскольку спектр их питания во многом совпадает [20, 21]. Увеличивающиеся запасы нукуляны и сопутствующие ей в этих биоценозах гидробионты для этих видов краба в основной массе недоступны. Во-вторых, неизвестно, что происходит с биомассой кормового бентоса на жестких грунтах, имеется ли там тенденция к росту или рост осуществляется только за счет восстановления сообществ на мягких грунтах. Если биомасса кормового бентоса на жестких грунтах уменьшилась в соответствии с сокращением площади распространения этих грунтов, то это дополнительно может быть причиной низких темпов восстановления популяции. Из положительных моментов такой ситуации можно указать на расширение благоприятных условий для популяции краба-стригуна опи-

<sup>7</sup> Распределение и калорийность бентоса в заливе Анива: отчет о НИР. 1980. Исп. А.В. Алехнович, С.Л. Королев; рук. к.б.н. В.Д. Табунков; СахТИНРО. Южно-Сахалинск, 30 с. Инв. № 4734 н/а. [Benthos distribution and calorific in Aniva Bay: report on research work. 1980. Investigators A.V. Alekhovich, S.L. Korolev; headed by Cand. Sci. (Biol.) V.D. Tabunkov; SakhTINRO. Yuzhno-Sakhalinsk, 30 p. Inv. No.4734]

<sup>8,9</sup> Современное состояние условий среды... отчет о НИР... 2015. [Current state of the environment... report on research work... 2015.]

лио, что, возможно, будет способствовать для него увеличению емкости среды.

Таким образом, проблемы с кормовой базой могут являться одной из причин низкой восстановительной способности камчатского краба в зал. Анива.

Еще одной безусловно чувствительной особенностью биологии камчатского краба является привязка процесса оседания личиночного пула к имеющимся условиям в этом районе. Как видно на рис. 4, значительная часть личинок (вплоть до стадии зоеа III) концентрируется в кутовой части бухты Лососей, а их перенос на юг вдоль западного берега в оставшееся до завершения личиночного развития время довольно проблематичен. Дно кутовой части мелководной бухты Лососей сплошь покрыто илистыми отложениями, которые делают эту акваторию непригодной для оседания личинок и выживания молоди. Именно об этом свидетельствует отсутствие здесь случаев имки мальков камчатского краба (см. рис. 5), хотя на этом участке предположительно оседает значительная часть личиночного пула. Оседание личинок в этом районе и их последующая закономерная элиминация приводят к невосполнимой утрате части репродуктивных усилий здешней популяции, что отрицательно влияет на ее воспроизводство и, соответственно, замедляет восстановление.

## Заключение

Исследования показали, что на протяжении большей части доступного для изучения периода, с 1974 вплоть до 2001 г., скопления промысловых самцов камчатского краба были широко представлены как в западной, так и в восточной частях зал. Анива. Прямой зависимости мест их обнаружения от сезона года не выявлено. Как в восточной, так и в западной частях залива до 2001 г. были отмечены характерные признаки наличия условий для воспроизводства краба, позволяющие поселениям обеих частей независимо друг от друга продуцировать пополнение. Это подтверждается распределением как личинок, так и мигрирующей молоди. С 2012 г. по настоящее время в восточной части залива отсутствуют даже единичные уловы камчатского краба. Предположительно, по причине значительно-го распространения алевроито-пелитов в связи

с дампингом грунта при строительстве завода СПГ в 2003–2006 гг. преимущественно в восточной части залива катастрофически сократились площади псефитов. Взаимосвязанное с этим процессом замещение биоценозов с широким развитием эпифауны биоценозами илистых грунтов привело к изменению среды обитания, она стала в восточной части залива неподходящей для воспроизводства камчатского краба.

Таким образом, на современном этапе мы наблюдаем трансформацию пространственной структуры популяции камчатского краба в зал. Анива, во многом, на наш взгляд, являющуюся следствием влияния на среду дампинга грунта, осуществленного в 2003–2006 гг. Произошедшие изменения среды ставят под сомнение пригодность условий для воспроизводства камчатского краба в восточной части залива, а следовательно, позволяют говорить о сокращении площади его обитания. Это подтверждается отсутствием здесь даже единичных траловых уловов камчатского краба в 2012–2021 гг., хотя ранее, до 1988 г., восточная часть популяции была основной, наиболее жизнеспособной формой его существования в зал. Анива: в конце 1930-х годов вылов достигал здесь 1370 т. Последнее десятилетие западная часть залива остается единственным местом обитания популяции данного вида краба. Но этот район в меньшей мере, чем восточный, подходит для камчатского краба. Здесь популяция сталкивается с различными естественными условиями, отрицательно влияющими на темпы воспроизводства. Произошедшая трансформация популяции камчатского краба зал. Анива носит долговременный характер, связана с ограничением жизненного пространства и ведет к значительному снижению предельного роста запаса относительно его исторической величины.

Имеющихся данных для окончательных выводов недостаточно. Требуются дальнейшие детальные исследования в этом направлении. Необходимо выполнение в современных условиях личиночной и мальковой съемки, а также траловой микросъемки, чтобы показать освоение популяцией западной части залива и количественно оценить проблемы, связанные с воспроизводством. В настоящее время отсутствует современная информация по составу и

расположению грунтов в зал. Анива, мы имеем очень слабое представление об изменениях, коснувшихся донных биоценозов и в целом состояния кормовой базы бентосоядных гидробионтов. Интересно было бы провести анализ на предмет выявления видов с судьбой, сходной с судьбой камчатского краба, чей биотоп был нарушен и которым в результате дампинга грунта нанесен существенный урон. Это довольно затратная, но чрезвычайно важная тема определения фактических результатов антропогенного воздействия на водоем и его обитателей. Кроме того, следует отметить, что к настоящему времени ситуация могла измениться и мог начаться процесс восстановления биотопов.

Дампинг можно рассматривать как своеобразный натурный эксперимент, который мы не смогли бы воспроизвести в лабораторных условиях. В настоящее время мы наблюдаем очередную фазу проявления его последствий, но мы обязаны воспользоваться предоставленной нам возможностью изучить все потенциальные последствия подобных явлений с точки зрения фундаментальной и прикладной науки.

## Список литературы

1. Клитин А.К. **2003**. Камчатский краб у берегов Сахалина и Курильских островов: биология, распределение и функциональная структура ареала. М.: Национальные рыбные ресурсы, 252 с.
2. Feder H., McCumbu K., Paul A.J. **1980**. The food of postlarval king crab, *Paralithodes camtschatica*, in Kachemak Bay, Alaska. *Crustaceana*, 39(3): 315–318. <https://doi.org/10.1163/156854080x00788>
3. Истошин Ю.В. **1952**. Течения у берегов Южного Сахалина. *Труды Центрального института прогнозов*, Гидрометеиздат, 44: 140–165.
4. Леонов А.К. **1960**. Региональная океанография. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 765 с.
5. Будаева В.Д., Макаров В.Г., Мельникова И.Ю. **1980**. Диагностические расчеты стационарных течений в заливе Анива и проливе Лаперуза. *Труды ДВНИГМИ*, 87: 66–78.
6. Budaeva V.D., Makarov V.G. **1996**. Modeling of the typical water circulations in the La Perouse Strait and Aniva Gulf Region. *PICES Scientific Report*, 6: 17–20.
7. Будаева В.Д., Макаров В.Г. **2000**. Моделирование типовых циркуляций вод в заливе Анива и проливе Лаперуза. В кн.: *Гидрометеорологические особенности шельфовой зоны морей Тихого океана (Японское, Охотское, Южно-Китайское)*. СПб.: Гидрометеиздат, с. 24–28. (Труды ДВНИГМИ; 140).
8. Пищальник В.М. **1997**. Опыт создания компьютеризованного гидролого-гидрохимического атласа Сахалинского шельфа. В кн.: *Экология морей России. Комплексные исследования экосистемы Охотского моря*. М.: ВНИРО, с. 67–78.

9. Пищальник В.М., Архипкин В.С. **1999**. Сезонные вариации геострофической циркуляции вод в шельфовой зоне острова Сахалин. В кн.: *XI Всерос. конф. по промысловой океанологии*: тез. докл. Калининград; Москва: ВНИРО, с. 34–35.
10. Морошкин К.В. **1966**. *Водные массы Охотского моря*. М.: Наука, 68 с.
11. *Атлас океанографических основ рыбопромысловых карт Южного Сахалина и Южных Курильских островов*. Т. 1. **1955**. Л.: ЗИН АН СССР: ТИНРО, 89 с.
12. Скалкин В.А. **1970**. Характеристика некоторых группировок бентоса залива Анива (Охотское море). *Зоологический журнал*, 49(9): 1405–1408.
13. Абрамова Е.В., Клитин А.К. **2005**. Распределение личинок промысловых крабов в заливе Анива (Охотское море) весной 2004 г. *Труды СахНИРО*, 7: 59–70.
14. Борисов Р.Р., Паршин-Чудин А.В., Ковачева Н.П. **2012**. Роль освещенности и положения субстрата в процессе оседания глаукотэ камчатского краба *Paralithodes camtschaticus* (Tilesius, 1815) (Decapoda: Lithodidae). *Биология моря*, 38(5): 389–394.
15. *Дноуглубительные работы и размещение вынутаго грунта в заливе Анива*. Дополнение к ОВОС. **2005**. Сахалин Энерджи Инвестмент Компани ЛТД, 87 с. <http://www.sakhalinenergy.ru/media/user/libraryeng/jap/h12ru.pdf>
16. Афанасьев В.В. **2018**. Геоморфологические аспекты проблемы выбора участков для строительства заводов СПГ на побережье дальневосточных морей. *Проблемы региональной экологии*, 5: 128–133. doi:10.24411/1728-323X-2019-15128
17. Лабай В.С., Кочнев Ю.Р. **2008**. Долговременные изменения сообщества *Nuculana pernula* как индикатор глобальных изменений бентоса сублиторали нижнебореальной части Охотского моря. *Труды СахНИРО*, 10: 173–182.
18. Лабай В.С., Печенева Н.В. **2005**. Сезонная динамика обилия макробентоса сублиторали залива Анива. *Труды СахНИРО*, 7: 317–363.
19. Клитин А. К., Крутченко А.А. **2004**. Некоторые особенности сезонного распределения четырехугольного волосатого краба (*Erimacrus isenbeckii*) у западного побережья Сахалина. *Изв. ТИНРО*, 138: 242–257.
20. Клитин А.К., Тарвердиева М.И. **2006**. Питание камчатского краба *Paralithodes camtschaticus* у западного побережья Сахалина (по материалам съемки в июле 1995 г.) *Труды СахНИРО*, 8: 192–215.
21. Тарвердиева М.И., Крутченко А.А. **2006**. Питание четырехугольного волосатого краба (*Erimacrus isenbeckii*) у западного побережья о. Сахалин. *Изв. ТИНРО*, 147: 148–156.

## References

1. Klitin A.K. **2003**. [Red King Crab off the coast of Sakhalin and Kuril Islands: biology, distribution and functional structure of the range]. Moscow: Natsional'nye rybnye resursy, 252 p. (In Russ.).
2. Feder H., McCumbu K., Paul A.J. **1980**. The food of postlarval king crab, *Paralithodes camtschatica*, in Kachemak Bay, Alaska. *Crustaceana*, 39(3): 315–318. <https://doi.org/10.1163/156854080x00788>
3. Istoshin Yu.V. **1952**. [Currents off the coast of South Sakhalin]. *Trudy Tsentral'nogo instituta prognozov, Gidrometeoizdat*, 44: 140–165. (In Russ.).
4. Leonov A.K. **1960**. [Regional oceanography]. Ch. 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 765 p. (In Russ.).

5. Budaeva V.D., Makarov V.G., Mel'nikova I.Yu. **1980**. [Diagnostic calculations of stationary currents in Aniva Bay and La Pérouse Strait]. *Trudy DVNIGMI [Transactions of FERHR]*, 87: 66–78. (In Russ.).
6. Budaeva V.D., Makarov V.G. **1996**. Modeling of the typical water circulations in the La Perouse Strait and Aniva Gulf Region. *PICES Scientific Report*, 6: 17–20.
7. Budaeva V.D., Makarov V.G. **2000**. [Simulation of typical water circulations in Aniva Bay and La Pérouse Strait]. In: *Gidrometeorologicheskie osobennosti shel'fovoy zony morey Tikhogo okeana (Yaponskoe, Okhotskoe, Yuzhno-Kitayskoe)*. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, p. 24–28. (Trudy DVNIGMI; 140). (In Russ.).
8. Pishchal'nik V.M. **1997**. [Experience in creating hydrological and hydrochemical atlas of the Sakhalin shelf]. In: *[Ecology of Russian seas. Complex studies of the Sea of Okhotsk ecosystem]*. Moscow: VNIRO, p. 67–78. (In Russ.).
9. Pishchal'nik V.M., Arkhipkin V.S. **1999**. [Seasonal variations of geostrophic water circulation in the shelf zone of Sakhalin Island]. In: *XI Vserossiyskaya konferentsiya po promyslovoy okeanologii: tez. dokl.* Kaliningrad; Moscow: VNIRO, p. 34–35. (In Russ.).
10. Moroshkin K.V. **1966**. *Vodnye massy Okhotskogo morya [Water mass of the Sea of Okhotsk]*. Moscow: Nauka, 68 p. (In Russ.).
11. Atlas *okeanograficheskikh osnov rybopoiskovoy karty Yuzhnogo Sakhalina i Yuzhnykh Kuril'skikh ostrovov [Atlas of the oceanographical fundamentals for fish-searching map of South Sakhalin and South Kuril Islands]*. **1955**. Vol. 1. Leningrad: Zool. In-t AN SSSR: TINRO, 89 p. (In Russ.).
12. Skalkin V.A. **1970**. [Characteristics of some benthos communities in Aniva Bay (the Sea of Okhotsk)]. *Zoologicheskii zhurnal*, 49(9): 1405–1408. (In Russ.).
13. Abramova E.V., Klitin A.K. **2005**. Distribution of larvae of commercial crabs in Aniva Bay (Sea of Okhotsk) in spring 2004. *Transactions of the SakhNIRO*, 7: 59–70. (In Russ.).
14. Borisov R.R., Parshin-Chudin A.V., Kovacheva N.P. **2012**. The effects of illuminance and substrate location on the settlement of glaucothoe of the red king crab *Paralithodes camtschaticus* (Tilesius, 1815) (Decapoda: Lithodidae). *Russian J. of Marine Biology*, 38(5): 400–405.
15. *Dnoughlubitel'nye raboty i razmeshchenie vynutogo grunta v zalive Aniva [Dredging operations and soil spreading in Aniva Bay]*. Dopolnenie k OVOS. **2005**. Sakhalin Enerdzhi Investment Kompani LTD, 87 p. (In Russ.). <http://www.sakhalinenergy.ru/media/user/libraryeng/jap/h12ru.pdf>
16. Afanas'ev V.V. **2018**. Geomorphological aspects of the issue of selecting sites for the construction of LNG plants along the coastlines of the Far Eastern seas. *Problemy regional'noy ekologii = Regional Environmental Issues*, 5: 128–133. (In Russ.). doi:10.24411/1728-323X-2019-15128
17. Labay V.S., Kochnev Yu.R. **2008**. Long-term changes in the community *Nuculana pumila* as the indicator of global benthic changes in sublittoral zone of the low-boreal part of the Okhotsk Sea. *Transactions of the SakhNIRO*, 10: 173–182. (In Russ.).
18. Labay V.S., Pecheneva N.V. **2005**. Seasonal dynamics of macrobenthos abundance in the Aniva Bay sublittoral zone. *Transactions of the SakhNIRO*, 7: 317–363. (In Russ.).
19. Klitin A.K., Krutchenko A.A. **2004**. Seasonal distribution of horsehair crab (*Erimacrus isenbeckii*) offshore of western Sakhalin Island. *Izvestiya TINRO = Transactions of the Pacific Research Institute of Fisheries and Oceanography*, 138: 242–257.
20. Klitin A.K., Tarverdieva M.I. **2006**. Feeding of red king crab *Paralithodes camtschaticus* along the western Sakhalin coast (by the materials of survey in July 1995). *Transactions of the SakhNIRO*, 8: 192–215.
21. Tarverdieva M.I., Krutchenko A.A. **2006**. Feeding of horsehair crab (*Erimacrus isenbeckii*) at the western coast of Sakhalin Island. *Izvestiya TINRO = Transactions of the Pacific Research Institute of Fisheries and Oceanography*, 147: 148–156.

#### Об авторе

**Низяев Сергей Александрович** (<https://orcid.org/0000-0001-7426-1535>), кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории промысловых гидробионтов, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО), Южно-Сахалинск, [nizyaev.sa@yandex.ru](mailto:nizyaev.sa@yandex.ru)

#### About Author

**Nizyaev, Sergey A.** (<https://orcid.org/0000-0001-7426-1535>), Candidate of Sciences (Biology), Leading Researcher of the Laboratory of commercial invertebrates, Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (SakhNIRO), Yuzhno-Sakhalinsk, [nizyaev.sa@yandex.ru](mailto:nizyaev.sa@yandex.ru)

Поступила в редакцию 30.09.2022  
После рецензирования 31.10.2022  
Принята к публикации 03.11.2022

Received 30 September 2022  
Revised 31 October 2022  
Accepted 3 November 2022

**Тематический указатель материалов, опубликованных в журнале  
«Геосистемы переходных зон» в 2022 г. (том 6)**

| Автор(ы). Название                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Номер:<br>страницы |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| <b>Геофизика. Сейсмология</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                    |
| Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Фролов Д.И. Геодинамические GNSS наблюдения на Курильских островах <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.287-294.295-302">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.287-294.295-302</a>                                                                                                                                              | 4: 287–302         |
| Богомолов Л.М., Сычева Н.А. Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции, предвестники и проблемы <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.145-164.164-182">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.145-164.164-182</a>                                                                                                                                | 3: 145–182         |
| Сафонов Д.А., Семёнова Е.П. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2021 году <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.085-099">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.085-099</a>                                                                                                                                                                              | 2: 85–99           |
| <b>Региональная геология. Геотектоника и геодинамика</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                    |
| Никитенко О.А., Еришов В.В., Жарков Р.В., Устюгов Г.В. Динамика физико-химических параметров термоминеральных вод Дагинского месторождения (до проведения реконструкции источников 2019–2020 гг.) <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.183-194">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.183-194</a>                                                             | 3: 183–194         |
| Костров Ю.В., Каменев П.А., Дегтярев В.А. Структурно-геологическое изучение зоны влияния центральной части Западно-Сахалинского разлома <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.005-012">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.005-012</a>                                                                                                                       | 1: 5–12            |
| <b>Вулканология</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                    |
| Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Активность вулканов Курильских островов в 2020–2021 гг. <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.195-205">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.195-205</a>                                                                                                                                                                          | 3: 195–205         |
| Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Эксплозивная активность вулкана Чикирачки в январе–октябре 2022 г. (о. Парамушир, Северные Курильские острова) <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.328-338">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.328-338</a>                                                                                                                   | 4: 328–338         |
| Дегтерев А.В., Козлов Д.Н., Хубаева О.Р., Хомчановский А.Л. Экспедиция по изучению новых термальных проявлений на о. Итуруп в 2022 г. <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.130-135">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.130-135</a>                                                                                                                         | 2: 130–135         |
| Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Активность вулкана Чикирачки (о. Парамушир, северные Курильские острова) в январе–феврале 2022 г. <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.013-018.018-023">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.013-018.018-023</a>                                                                                                                | 1: 13–23           |
| <b>Геоморфология и палеогеография</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                    |
| Лящевская М.С., Ганзей Л.А. Динамика растительности юга Приморья при климатической ритмике малого ледникового периода <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.206-217">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.206-217</a>                                                                                                                                         | 3: 206–217         |
| Микишин Ю.А., Горбунов А.О., Гвоздева И.Г., Черепанова М.В. Палеоклиматы, растительность и геохронология ландшафтно-климатических изменений на побережье юго-западной окраины Сахалина в среднем–позднем голоцене <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.218-236">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.218-236</a>                                             | 3: 218–236         |
| Романюк Ф.А., Козлов Д.Н., Жарков Р.В. Первые результаты полевых работ 2021 г. на группе Новиковских Карьерных озёр (о. Сахалин): морфология и морфометрические параметры котловин <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.237-245">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.237-245</a>                                                                            | 3: 237–245         |
| Разжигина Н.Г., Ганзей Л.А., Арсланов Х.А., Пишеничникова Н.Ф. Береговые дюны острова Уруп (Курильские острова, северо-западная Пацифика): архив изменений палеоклимата и природной среды (На англ. яз.) <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.100-113">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.100-113</a>                                                      | 2: 100–113         |
| Корнюшенко Т.В., Разжигина Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Кудрявцева Е.П., Пискарева Я.Е., Прокопец С.Д. Признаки трансформации геосистем при освоении Южного Приморья в средневековье: городище Стеклануха-2 <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.024-042">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.024-042</a>                                          | 1: 24–42           |
| Мохова Л.М., Кудрявцева Е.П. Субфоссильные спорово-пыльцевые спектры как отражение высотной поясности Южного Сихотэ-Алиня <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.043-053">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.043-053</a>                                                                                                                                     | 1: 43–53           |
| <b>Океанология</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                    |
| Шевченко Г.В., Цой А.Т. Пространственная структура приливов у юго-западного побережья Камчатки по данным береговых наблюдений и спутниковой альтиметрии <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.246-255">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.246-255</a>                                                                                                       | 3: 246–255         |
| Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Борисов А.С., Зарочинцев В.С., Кириллов К.В. Особенности возбуждения сейш в акватории вблизи Поронайска (о. Сахалин) <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.114-123">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.114-123</a>                                                                                                              | 2: 114–123         |
| Борисов А.С. Характеристики морского волнения в порту города Холмск (о. Сахалин) <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.054-059">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.054-059</a>                                                                                                                                                                              | 1: 54–59           |
| <b>Геоинформатика</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                    |
| Булгаков Р.Ф. Моделирование напряженно-деформированного состояния земной коры о. Сахалин: влияние гидроизостазии <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.303-315.316-327">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.303-315.316-327</a>                                                                                                                              | 4: 303–327         |
| Булгаков Р.Ф. Моделирование вертикальных смещений в результате мантийной конвекции на профиле через Охотское море <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.124-129">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.124-129</a>                                                                                                                                             | 2: 124–129         |
| <b>Экология. Геоэкология</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                    |
| Вацерионова Е.О., Копанина А.В., Власова И.И. Кора ассимиляционных побегов кустарника спиреи Бовера ( <i>Spiraea beauverdiana</i> S.K. Schneid.): структурные изменения в условиях вулканогенного стресса на южных Курильских островах и полуострове Камчатка <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.339-359">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.339-359</a> | 4: 339–359         |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Тальских А.И., Копанина А.В., Власова И.И. Особенности структурного отклика коры и древесины березы плосколистной ( <i>Betula platyphylla</i> , <i>Betulaceae</i> ) в ландшафтах морских побережий, магматических и грязевых вулканов Сахалина и Курильских островов <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.360-379">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.360-379</a> | 4: 360–379 |
| Ежкин А.К. Напочвенные лишайники термальных местообитаний южных Курильских островов <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.380-387">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.380-387</a>                                                                                                                                                                                  | 4: 380–387 |
| Низяев С.А. Экологические аспекты многолетнего распределения промыслового стада камчатского краба в заливе Анива (о. Сахалин) <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.388-404">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.388-404</a>                                                                                                                                        | 4: 388–404 |
| Швидская К.А., Копанина А.В. Крупномасштабное картографирование растительности Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающего ландшафта (о. Сахалин) по спутниковым данным <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.256-276">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.256-276</a>                                                                                       | 3: 256–276 |
| Полтев Ю.Н., Коренева Т.Г., Марыжихин В.Е. Содержание микроэлементов в некоторых видах беспозвоночных из залива Терпения Охотского моря <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.277-282">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.277-282</a>                                                                                                                              | 3: 277–282 |
| Полтев Ю.Н., Коренева Т.Г., Марыжихин В.Е., Сырбу И.В. Содержание микроэлементов в дальневосточной мойве <i>Mallotus catervarius</i> (Pisces: Osmeridae) из прибрежных вод юго-западной части о. Сахалин <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.136-140">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.136-140</a>                                                             | 2: 136–140 |
| Коренева Т.Г., Сизгарева Л.Е. Пигменты в донных отложениях зал. Анива (Охотское море) <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.060-073">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.060-073</a>                                                                                                                                                                                | 1: 60–73   |

### Topical index of articles published in the journal “Geosystems of Transition Zones” in 2022 (Volume 6)

| Author(s). Title                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Issue:<br>Pages |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Geophysics. Seismology</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |
| Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I. Geodynamic GNSS observations on the Kuril Islands (In Russ. & Engl.) <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.287-294.295-302">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.287-294.295-302</a>                                                                                                     | 4: 287–302      |
| Bogomolov L.M., Sycheva N.A. Earthquake predictions in XXI century: prehistory and concepts, precursors and problems (In Russ. & Engl.) <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.145-164.164-182">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.145-164.164-182</a>                                                                            | 3: 145–182      |
| Safonov D.A., Semenova E.P. Seismicity of the South Far East of Russia in 2021. <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.085-099">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.085-099</a>                                                                                                                                                    | 2: 85–99        |
| <b>Regional geology. Geotectonics and geodynamics</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                 |
| Nikitenko O.A., Ershov V.V., Zharkov R.V., Ustyugov G.V. Dynamics of the physicochemical characteristics of the thermomineral waters of the Daginsky field (before the reconstruction of the springs in 2019–2020) <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.183-194">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.183-194</a>                 | 3: 183–194      |
| Kostrov Yu.V., Kamenev P.A., Degtyarev V.A. Structural and geological study of the zone of influence of the central part of the West Sakhalin fault <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.005-012">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.005-012</a>                                                                                | 1: 5–12         |
| <b>Volcanology</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                 |
| Degterev A.V., Chibisova M.V. The explosive activity of Chikurachki volcano in January–October 2022 (Paramushir Island, Northern Kuriles) <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.328-338">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.328-338</a>                                                                                          | 4: 328–338      |
| Degterev A.V., Chibisova M.V. Volcanic activity of the Kuril Islands in 2020–2021 <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.195-205">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.195-205</a>                                                                                                                                                  | 3: 195–205      |
| Degterev A.V., Kozlov D.N., Hubaeva O.R., Khomchanovskiy A.L. Expedition to study new thermal manifestations on Iturup Island in 2022 <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.130-135">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.130-135</a>                                                                                              | 2: 130–135      |
| Degterev A.V., Chibisova M.V. The activity of Chikurachki volcano (Paramushir Isl., Northern Kuriles) in January–February of 2022 (In Russ. & Engl.) <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.013-018.018-023">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.013-018.018-023</a>                                                               | 1: 13–23        |
| <b>Geomorphology and Palaeogeography</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                 |
| Lyashchevskaya M.S., Ganzey L.A. Dynamic of vegetation of the southern Primorye during the climatic rhythm of the Little Ice Age <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.206-217">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.206-217</a>                                                                                                   | 3: 206–217      |
| Mikishin Yu.A., Gorbunov A.O., Gvozdeva I.G., Cherepanova M.V. Palaeoclimates, vegetation and geochronology of landscape-climatic evolution on the coast of the southwestern margin of Sakhalin in the Middle–Late Holocene <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.218-236">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.218-236</a>        | 3: 218–236      |
| Romanyuk F.A., Kozlov D.N., Zharkov R.V. First results of field work in 2021 on the group of Novikovskiy Karyernye lakes (Sakhalin Island): morphology and morphometric parameters of basins <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.237-245">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.237-245</a>                                       | 3: 237–245      |
| Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Arslanov Kh.A., Pshenichnikova N.F. Coastal dunes of Urup Island (Kuril Islands, North-Western Pacific): palaeoclimatic and environmental archive (In Engl.) <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.100-113">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.100-113</a>                                         | 2: 100–113      |
| Kornyushenko T.V., Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Kudryavtseva E.P., Piskareva Y.E., Prokopets S.D. Evidence of geosystems transformation during Medieval development of South Primorye: Steklyanukha-2 fortress <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.024-042">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.024-042</a> | 1: 24–42        |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Mokhova L.M., Kudryavtseva E.P.</i> Subfossil pollen spectra as evidence of the altitudinal zonation of the Southern Sikhote-Alin <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.043-053">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.043-053</a>                                                                                                                                           | 1: 43–53   |
| <b>Oceanology</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |            |
| <i>Shevchenko G.V., Tsoy A.T.</i> Spatial structure of the tides near the southwestern coast of Kamchatka according to coastal observations and satellite altimetry data <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.246-255">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.246-255</a>                                                                                                       | 3: 246–255 |
| <i>Kovalev D.P., Kovalev P.D., Borisov A.S., Zarochintsev V.S., Kirillov K.V.</i> Features of seiche excitation in the water area near Poronaisk (Sakhalin Island). <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.114-123">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.114-123</a>                                                                                                            | 2: 114–123 |
| <i>Borisov A.S.</i> Sea wave characteristics in the port of Kholmsk (Sakhalin Island) <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.054-059">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.054-059</a>                                                                                                                                                                                          | 1: 54–59   |
| <b>Geoinformatics</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |            |
| <i>Bulgakov R.F.</i> Modeling of the stress-strain condition of the Earth's crust of Sakhalin Island: impact of hydroisostasy (In Russ. & Engl.) <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.303-315.316-327">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.303-315.316-327</a>                                                                                                               | 4: 303–327 |
| <i>Bulgakov R.F.</i> Vertical motion modeling as a result of mantle convection on the Sea of Okhotsk profile <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.124-129">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.124-129</a>                                                                                                                                                                   | 2: 124–129 |
| <b>Ecology. Geoecology</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |            |
| <i>Vatserionova E.O., Kopanina A.V., Vlasova I.I.</i> Bark of assimilation shoots of the Beauverd spirea shrub ( <i>Spiraea beauverdiana</i> S.K. Schneid.): structural changes under the conditions of volcanic stress in the South Kuril Islands and the Kamchatka Peninsula <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.339-359">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.339-359</a> | 4: 339–359 |
| <i>Talskih A.I., Kopanina A.V., Vlasova I.I.</i> Features of the structural response of the bark and wood of birch ( <i>Betula platyphylla</i> , Betulaceae) in the landscapes of sea coasts, magmatic and mud volcanoes of Sakhalin and the Kuril Islands <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.360-379">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.360-379</a>                     | 4: 360–379 |
| <i>Ezhkin A.K.</i> Soil lichens in thermal habitats on Southern Kuriles <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.380-387">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.380-387</a>                                                                                                                                                                                                        | 4: 380–387 |
| <i>Nizyaev S.A.</i> Ecological aspects of the interannual dynamics of the distribution of aggregations of the Red King Crab in Aniva Bay (Sakhalin Island) <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.388-404">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.4.388-404</a>                                                                                                                     | 4: 388–404 |
| <i>Shvidskaya K.A., Kopanina A.V.</i> Large-scale mapping of the vegetation of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and the adjacent landscape (Sakhalin Island) using satellite data <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.256-276">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.256-276</a>                                                                                             | 3: 256–276 |
| <i>Poltev Yu.N., Koreneva T.G., Maryzhikhin V.E.</i> The content of trace elements in some invertebrate species from the Terpeniya Bay, the Sea of Okhotsk <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.277-282">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.277-282</a>                                                                                                                     | 3: 277–282 |
| <i>Poltev Yu.N., Koreneva T.G., Maryzhikhin V.E., Syrbu I.V.</i> The content of trace elements in the Pacific capelin <i>Mallotus catervarius</i> (Pisces: Osmeridae) from the coastal waters of the southwestern part of Sakhalin Island <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.136-140">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.136-140</a>                                      | 2: 136–140 |
| <i>Koreneva T.G., Sigareva L.E.</i> Pigments in the bottom sediments of Aniva Bay (Sea of Okhotsk) <a href="https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.060-073">https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.060-073</a>                                                                                                                                                                             | 1: 60–73   |

### Авторский указатель публикаций в журнале «Геоисотемы переходных зон» в 2022 г. (том 6)

| Автор(ы). Название                                                                                                                                                                                                                                            | Номер:<br>страницы |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Арсланов Х.А. см. Разжигаетева Н.Г.                                                                                                                                                                                                                           |                    |
| Богомолов Л.М., Сычева Н.А. Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции, предвестники и проблемы                                                                                                                                                | 3: 145–182         |
| Борисов А.С. см. Ковалев Д.П.                                                                                                                                                                                                                                 |                    |
| Борисов А.С. Характеристики морского волнения в порту города Холмск (о. Сахалин)                                                                                                                                                                              | 1: 54–59           |
| Булгаков Р.Ф. Моделирование напряженно-деформированного состояния земной коры о. Сахалин: влияние гидроизостазии                                                                                                                                              | 4: 303–327         |
| Булгаков Р.Ф. Моделирование вертикальных смещений в результате мантийной конвекции на профиле через Охотское море                                                                                                                                             | 2: 124–129         |
| Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Фролов Д.И. Геодинамические GNSS наблюдения на Курильских островах                                                                                                                                                              | 4: 287–302         |
| Вацерионова Е.О., Копанина А.В., Власова И.И. Кора ассимиляционных побегов кустарника спиреи Бовера ( <i>Spiraea beauverdiana</i> S.K. Schneid.): структурные изменения в условиях вулканогенного стресса на южных Курильских островах и полуострове Камчатка | 4: 339–359         |
| Власова И.И. см. Вацерионова Е.О.                                                                                                                                                                                                                             |                    |
| Власова И.И. см. Вацерионова Е.О.; см. Тальских А.И.                                                                                                                                                                                                          |                    |
| Ганзей Л.А. см. Корнюшенко Т.В.; см. Ляцевская М.С.; см. Разжигаетева Н.Г.                                                                                                                                                                                    |                    |
| Гвоздева И.Г. см. Микишин Ю.А.                                                                                                                                                                                                                                |                    |
| Горбунов А.О. см. Микишин Ю.А.                                                                                                                                                                                                                                |                    |
| Гребенникова Т.А. см. Корнюшенко Т.В.                                                                                                                                                                                                                         |                    |
| Дегтерев А.В., Козлов Д.Н., Хубаева О.Р., Хомчановский А.Л. Экспедиция по изучению новых термальных проявлений на о. Итуруп в 2022 г.                                                                                                                         | 2: 130–135         |
| Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Активность вулкана Чикурачки (о. Парамушир, северные Курильские острова) в январе–феврале 2022 г.                                                                                                                                | 1: 13–23           |
| Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Активность вулканов Курильских островов в 2020–2021 гг.                                                                                                                                                                          | 3: 195–205         |
| Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Эксплозивная активность вулкана Чикурачки в январе–октябре 2022 г. (о. Парамушир, Северные Курильские острова)                                                                                                                   | 4: 328–338         |
| Дегтярев В.А. см. Костров Ю.В.                                                                                                                                                                                                                                |                    |

|                                                                                                                                                                                                                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Ежкин А.К. Напочвенные лишайники термальных местообитаний южных Курильских островов                                                                                                                                                                          | 4: 380–387 |
| Ершов В.В. см. Никитенко О.А.                                                                                                                                                                                                                                |            |
| Жарков Р.В. см. Никитенко О.А.; см. Романюк Ф.А.                                                                                                                                                                                                             |            |
| <b>Зарочинцев В.С. см. Ковалев Д.П.</b>                                                                                                                                                                                                                      |            |
| Каменев П.А. см. Костров Ю.В.                                                                                                                                                                                                                                |            |
| <b>Кириллов К.В. см. Ковалев Д.П.</b>                                                                                                                                                                                                                        |            |
| Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Борисов А.С., Зарочинцев В.С., Кириллов К.В. Особенности возбуждения сейш в акватории вблизи Поронайска (о. Сахалин)                                                                                                             | 2: 114–123 |
| <b>Ковалев П.Д. см. Ковалев Д.П.</b>                                                                                                                                                                                                                         |            |
| Козлов Д.Н. см. Дегтерев А.В.; см. Романюк Ф.А.                                                                                                                                                                                                              |            |
| Копанина А.В. см. Вацерионова Е.О.; см. Тальских А.И.; см. Швидская К.А.                                                                                                                                                                                     |            |
| Коренева Т.Г. см. Полтев Ю.Н. (№ 2 и № 3)                                                                                                                                                                                                                    |            |
| Коренева Т.Г., Сигарева Л.Е. Пигменты в донных отложениях зал. Анива (Охотское море)                                                                                                                                                                         | 1: 60–73   |
| Корнюшенко Т.В., Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Кудрявцева Е.П., Пискарева Я.Е., Прокопец С.Д.                                                                                                                                             | 1: 24–42   |
| Признаки трансформации геосистем при освоении Южного Приморья в средневековье: городище Стеклянуха-2                                                                                                                                                         |            |
| Костров Ю.В., Каменев П.А., Дегтерев В.А. Структурно-геологическое изучение зоны влияния центральной части Западно-Сахалинского разлома                                                                                                                      | 1: 5–12    |
| Кудрявцева Е.П. см. Корнюшенко Т.В.; см. Мохова Л.М.                                                                                                                                                                                                         |            |
| Ляцеская М.С., Ганзей Л.А. Динамика растительности юга Приморья при климатической ритмике малого ледникового периода                                                                                                                                         | 3: 206–217 |
| Марыжихин В.Е. см. Полтев Ю.Н. (№ 2 и № 3)                                                                                                                                                                                                                   |            |
| Микишин Ю.А., Горбунов А.О., Гвоздева И.Г., Черепанова М.В. Палеоклиматы, растительность и геохронология ландшафтно-климатических изменений на побережье юго-западной окраины Сахалина в среднем–позднем голоцене                                            | 3: 218–236 |
| Мохова Л.М., Кудрявцева Е.П. Субфоссильные спорово-пыльцевые спектры как отражение высотной поясности Южного Сихотэ-Алиня                                                                                                                                    | 1: 43–53   |
| Низяев С.А. Экологические аспекты многолетнего распределения промыслового стада камчатского краба в заливе Анива (о. Сахалин)                                                                                                                                | 4: 388–404 |
| Никитенко О.А., Ершов В.В., Жарков Р.В., Устюгов Г.В. Динамика физико-химических параметров термоминеральных вод Дагинского месторождения (до проведения реконструкции источников 2019–2020 гг.)                                                             | 3: 183–194 |
| Пискарева Я.Е. см. Корнюшенко Т.В.                                                                                                                                                                                                                           |            |
| Полтев Ю.Н., Коренева Т.Г., Марыжихин В.Е. Содержание микроэлементов в некоторых видах беспозвоночных из залива Терпения Охотского моря                                                                                                                      | 3: 277–282 |
| Полтев Ю.Н., Коренева Т.Г., Марыжихин В.Е., Сырбу И.В. Содержание микроэлементов в дальневосточной мойве <i>Mallotus catenarius</i> (Pisces: Osmeridae) из прибрежных вод юго-западной части о. Сахалин                                                      | 2: 136–140 |
| Прокопец С.Д. см. Корнюшенко Т.В.                                                                                                                                                                                                                            |            |
| Прытков А.С. см. Василенко Н.Ф.                                                                                                                                                                                                                              |            |
| Пшеничникова Н.Ф. см. Разжигаева Н.Г.                                                                                                                                                                                                                        |            |
| Разжигаева Н.Г. см. Корнюшенко Т.В.                                                                                                                                                                                                                          |            |
| Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Арсланов Х.А., Пшеничникова Н.Ф. Береговые дюны острова Уруп (Курильские острова, северо-западная Пацифика): архив изменений палеоклимата и природной среды (На англ. яз.).                                                    | 2: 100–113 |
| Романюк Ф.А., Козлов Д.Н., Жарков Р.В. Первые результаты полевых работ 2021 г. на группе Новиковских Карьерных озер (о. Сахалин): морфология и морфометрические параметры котловин                                                                           | 3: 237–245 |
| Сафонов Д.А., Семёнова Е.П. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2021 году                                                                                                                                                                             | 2: 85–99   |
| Семёнова Е.П. см. Сафонов Д.А.                                                                                                                                                                                                                               |            |
| Сигарева Л.Е. см. Коренева Т.Г.                                                                                                                                                                                                                              |            |
| Сырбу И.В. см. Полтев Ю.Н.                                                                                                                                                                                                                                   |            |
| Сычева Н.А. см. Богомолов Л.М.                                                                                                                                                                                                                               |            |
| Тальских А.И., Копанина А.В., Власова И.И. Особенности структурного отклика коры и древесины березы плосколистной ( <i>Betula platyphylla</i> , Betulaceae) в ландшафтах морских побережий, магматических и грязевых вулканов Сахалина и Курильских островов | 4: 360–379 |
| Устюгов Г.В. см. Никитенко О.А.                                                                                                                                                                                                                              |            |
| Фролов Д.И. см. Василенко Н.Ф.                                                                                                                                                                                                                               |            |
| Хомчановский А.Л. см. Дегтерев А.В.                                                                                                                                                                                                                          |            |
| Хубаева О.Р. см. Дегтерев А.В.                                                                                                                                                                                                                               |            |
| Цой А.Т. см. Шевченко Г.В.                                                                                                                                                                                                                                   |            |
| Черепанова М.В. см. Микишин Ю.А.                                                                                                                                                                                                                             |            |
| Чибисова М.В. см. Дегтерев А.В. (№ 1, № 3 и № 4)                                                                                                                                                                                                             |            |
| Швидская К.А., Копанина А.В. Крупномасштабное картографирование растительности Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающего ландшафта (о. Сахалин) по спутниковым данным                                                                               | 3: 256–276 |
| Шевченко Г.В., Цой А.Т. Пространственная структура приливов у юго-западного побережья Камчатки по данным береговых наблюдений и спутниковой альтиметрии                                                                                                      | 3: 246–255 |