

VI МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ПРИРОДНЫЕ КАТАСТРОФЫ»

г. Южно-Сахалинск, Сахалинская область

12–16 октября 2026 г.



Ученые и специалисты, аспиранты и студенты обсудят актуальные теоретические и прикладные проблемы, которые волнуют научное сообщество не только Дальневосточного региона России. Среди этих проблем природные катастрофы, методы оценки их опасности и риска, современные технологии геофизического мониторинга в сейсмоактивных и цунамиопасных регионах а также взаимосвязи живых организмов и геосистем.

Приглашаем желающих выступить с докладами и принять участие в обсуждении.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ОБСУЖДЕНИЙ

**Исследования Земли: ответ на вызовы природных и техногенных катастроф**

- Геологическое строение земной коры и структур различного масштаба
- Этапы и стадии развития земной коры и верхней мантии
- Вещественный состав геологических сред и объектов
- Поиск и прогнозирование месторождений полезных ископаемых

**Динамика моря и вопросы изменения климата**

- Поток вещества и энергии в гидросфере
- Генерация цунами и цунамиопасность
- Моделирование и прогноз морских опасных явлений
- Геолого-геоморфологические аспекты освоения морских побережий

**Живые системы и геологическая среда**

- Влияние природных и антропогенных факторов на живые организмы и экосистемы
- Адаптивные стратегии живых организмов
- Биологическое разнообразие и инвазии
- Анализ состояния экосистем по данным аэрокосмических исследований

**Шаг в науку: технологии и практика**

- Инженерные проекты и прототипы для мониторинга природных процессов
- Цифровые методы анализа геофизических и геоэкологических данных
- Моделирование природных опасностей и их последствий
- Междисциплинарные студенческие исследования

К началу работы конференции будут изданы тезисы докладов в авторской редакции. По материалам докладов будут опубликованы тематические выпуски журнала «Геосистемы переходных зон» (БС-2, входит в Перечень ВАК).

Регистрация участников осуществляется через форму на сайте конференции.

УСЛОВИЯ УЧАСТИЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ ВЗНОС** оплачивается при регистрации.

- Для аспирантов и молодых ученых до 35 лет **3500 РУБ.** • Для остальных участников конференции **5000 РУБ.** •
- Стоимость участия включает расходы на организацию мероприятий, кофе-брейки, оргнабор участника конференции •

**ПРОЕЗД И ПРОЖИВАНИЕ** участники конференции оплачивают самостоятельно.

Рекомендуемые гостиницы г. Южно-Сахалинска (вблизи маршрутов общественного транспорта): Lenina Hotel, Монерон, Лотос, Панорама, Командор, Юбилейная.

**ПРОГРАММА** будет разослана участникам, а также размещена на сайте конференции.

**ЭКСКУРСИИ:** осмотр достопримечательностей города Южно-Сахалинска; посещение Ботанического сада; геологическая экскурсия.

Подробная информация о сроках подачи тезисов, требованиях к их оформлению, порядке и условиях участия в конференции и экскурсионных мероприятиях будет размещена на сайте конференции и в последующих информационных письмах.

КОНТАКТЫ ОРГКОМИТЕТА

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

**Web-страница конференции:**

<https://imggconf.ru>

**E-mail:** [info@imggconf.ru](mailto:info@imggconf.ru)

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН



Дальневосточное отделение РАН



СФ ГС РАН



ФГБОУ ВО «СахГУ»



СКБ САМИ ДВО РАН



СахалинТех

САХАЛИНТЕХ САХГУ

Правительство Сахалинской области



МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ:

**Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН.**

г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1 Б.

Проезд автобусами 10, 62, 71, 21.

Остановка — «Институт морской геологии и геофизики».

**Научный журнал**

*Учредитель и издатель:*

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики  
Дальневосточного отделения  
Российской академии наук

Издается с января 2017 г.

**Периодичность издания 4 раза в год**

**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:**

- включен в **Единый государственный перечень научных изданий – «Белый список», уровень 2;**
- индексируется в **Russian Science Citation Index (ядро РИНЦ);**
- регистрируется в системе **CrossRef**. Научным публикациям присваивается идентификатор – DOI;
- включен в каталог **Ulrich's Periodicals Directory;**
- индексируется в международной базе научных журналов открытого доступа – **Directory of Open Access Journals (DOAJ);**
- включен в **Перечень ВАК** – Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

- 1.6.1. Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика (*геолого-минералогические*)
- 1.6.3. Петрология, вулканология (*геолого-минералогические*)
- 1.6.9. Геофизика (*геолого-минералогические; физико-математические*)
- 1.6.14 Геоморфология и палеогеография (*географические*)
- 1.6.17. Океанология (*географические; геолого-минералогические; физико-математические*)
- 1.6.20. Геоинформатика, картография (*физико-математические*)
- 1.6.21. Геоэкология (*географические; геолого-минералогические*)
- 1.5.15. Экология (*биологические*)
- 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела (*технические; физико-математические*).

**The Journal is:**

- included in the **Unified State List of Scientific Publications – "White List", Level 2;**
- indexed in **Russian Science Citation Index (RISC core);**
- registered in the **CrossRef** system. Scientific publications are assigned an individual identifier DOI;
- included in the **Ulrich's Periodicals Directory** database;
- indexed in the **Directory of Open Access Journals (DOAJ);**
- included in the **VAK List** – the List of peer reviewed scientific journals, in which main scientific results of dissertations for the Candidate of Sciences and Doctor of Sciences degrees in the following scientific specialties and corresponding branches of science should be published:

- 1.6.1. General and regional geology. Geotectonics and Geodynamics (*Geology and Mineralogy*)
- 1.6.3. Petrology and volcanology (*Geology and Mineralogy*)
- 1.6.9. Geophysics (*Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics*)
- 1.6.14 Geomorphology and Paleogeography (*Geography*)
- 1.6.17. Oceanology (*Geography; Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics*)
- 1.6.20. Geoinformatics and cartography (*Physics and Mathematics*)
- 1.6.21. Geoecology (*Geography; Geology and Mineralogy*)
- 1.5.15. Ecology (*Biology*)
- 1.1.8. Mechanics of deformable solids (*Physics and Mathematics; Engineering*).

*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, 2026

**Редакционная коллегия***Главный редактор*

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

*Заместитель главного редактора*

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

*Ответственный секретарь*

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

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

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

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

*Deputy Editor-in-Chief*

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

*Executive Secretary*

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

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

*Редакционная коллегия*

- **Сергеева Ирина Вячеславовна**, д-р биол. наук, профессор, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии
- **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
- **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*

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

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

*Переводчик* **Чера Анастасия Дмитриевна**

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

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

Формат 60 × 84 /8. Усл. печ. л. 14.2.  
 Тираж 150 экз. Заказ 8087. Свободная цена.  
 Дата выхода в свет 25.03.2026.

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

По вопросам распространения обращаться также в редакцию.

*Translator* **Anastasiya D. Chera**

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

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

Sheet size 60 × 84 /8. Conv. print. sheets 14.2.  
 Number of copies 150. Order no. 8087. Free price.  
 Date of publishing 25.03.2026.

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

Please also contact the Editorial Office for distribution.

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENT

## Геофизика, сейсмология

*Н.А. Сычева.* Анализ динамических параметров землетрясений Крымско-Черноморского региона. Распределение сброса напряжений . . . . . 5

*А.С. Закупин, Д.В. Костылев, Н.В. Костылева, С.А. Борняков.* Сейсмическая активизация в районе северо-восточного побережья острова Хонсю (ноябрь–декабрь 2025 г.) и ее возможная связь с геодеформационными процессами на о. Шикотан (Малая Курильская гряда) . . . . . 23

## Геоморфология и палеогеография

*Н.Г. Разжигаева, Л.А. Ганзей, Л.М. Мохова.* Реакция растительности обрамления бухты Заря (Японское море) на мультидекадные климатические вариации за последние 5500 лет . . . . . 33

## Океанология

*Г.В. Шевченко, Д.М. Ложкин.* Значимые аномалии ТПО в северо-западной части Тихого океана по данным реанализа ERA5 . . . . . 57

## Геоэкология. Геоморфология

*Т.А. Кокорина, Р.Т. Гон.* Структура и пространственное распределение ландшафтов литорали в восточной части бухты Лососей (залив Анива, Охотское море) . . . . . 69

## Геоэкология. Геохимия

*Е.А. Архипов, С.И. Зотов, Ю.В. Королева, М.И. Колягина.* Оценка химического загрязнения почв города Калининграда . . . . . 89

## Экология. Геоинформатика, картография

*И.В. Сергеева, Н.А. Петрова, Е.Н. Шевченко, Е.В. Гулина, А.Л. Пономарева.* Биоклиматическое моделирование и вероятность распространения некоторых видов заразных (Orobanchaceae Vent.) в Саратовской области . . . . . 101

## От редакции

Правила оформления и публикации рукописей в журнале «Гео-системы переходных зон» . . . . . 117

## Geophysics, Seismology

*N.A. Sycheva.* Analysis of dynamic parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region. Stress drop distribution . . . . . 5

*A.S. Zakupin, D.V. Kostylev, N.V. Kostyleva, S.A. Bornyakov.* Seismic activation on the northeastern coast of Honshu Island (November–December 2025) and its possible connection with geodeformation processes on Shikotan Island (the Lesser Kuril Ridge) . . . . . 23

## Geomorphology and Paleogeography

*N.G. Razjigaeva, L.A. Ganzey, L.M. Mokhova.* Vegetation response in the surrounding area of Zarya Bay (the Sea of Japan) to multi-decadal climatic variations over the past 5500 years . . . . . 33

## Oceanology

*G.V. Shevchenko, D.M. Lozhkin.* Significant SST anomalies in the northwestern Pacific Ocean based on ERA5 reanalysis data . . . . . 57

## Geoecology. Geomorphology

*T.A. Kokorina, R.T. Gon.* Structure and spatial distribution of landscapes of the littoral zone in the eastern part of Salmon Bay (Aniva Bay, the Sea of Okhotsk) . . . . . 69

## Geoecology. Geochemistry

*E.A. Arkhipov, S.I. Zotov, Yu.V. Koroleva, M.I. Kolyagina.* Assessment of chemical contamination of Kaliningrad soils . . . . . 89

## Ecology. Geoinformatics and cartography

*I.V. Sergeeva, N.A. Petrova, E.N. Shevchenko, E.V. Gulina, A.L. Ponomareva.* Bioclimatic modeling and the probability of spread of some species of Orobanchaceae Vent. in the Saratov Region . . . . . 101

## From the Editorial Office

Manuscript formatting and publication guidelines of the “Geosystems of Transition Zones” journal . . . . . 117

© Автор, 2026 г.  
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author, 2026.  
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.348

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.1.005-022>  
<https://www.elibrary.ru/fkahve>

## Анализ динамических параметров землетрясений Крымско-Черноморского региона. Распределение сброса напряжений

*Н. А. Сычева*

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

**Резюме.** Для Крымско-Черноморского региона из опубликованных источников собраны сведения о динамических параметрах (ДП) 261 землетрясения с  $K_{II} = 5.2-13.1$  ( $K_{II}$  – класс землетрясения по Пустовитенко и Кульчицкому), которые произошли с 1990 по 2022 г.: скалярный сейсмический момент  $M_0$ , радиус очага  $r$ , сброс касательных напряжений  $\Delta\sigma$  и др. Построены распределения ДП в зависимости от магнитуды и скалярного сейсмического момента, выполнена аппроксимация распределений ДП линейной функцией, в некоторых случаях дополнительно рассматривалась степенная. Рассчитан коэффициент детерминации  $R^2$ . Для Крымско-Черноморского региона зависимость логарифма скалярного сейсмического момента имеет вид:  $\lg(M_0) = 0.87M + 11.4$  ( $R^2 = 0.84$ ). На основе каталога землетрясений (1993–2022 гг.) построено площадное распределение среднегодовой скорости сейсмотектонических деформаций (интенсивность СТД). Проведено сравнение интенсивности СТД с уровнем сброшенных напряжений. По данным о сброшенных касательных напряжениях для Крымско-Черноморского региона построено площадное распределение средневзвешенного значения сброшенных напряжений.

**Ключевые слова:** землетрясение, сейсмичность, скалярный сейсмический момент, моментная магнитуда, радиус очага, сброс касательных напряжений, коэффициент детерминации, сейсмотектонические деформации, Крымско-Черноморский регион

## Analysis of dynamic parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region. Stress drop distribution

*Nayla A. Sycheva*

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

**Abstract.** The information on the dynamic parameters (DP) of 261 earthquakes with  $K_p = 5.2-13.1$  ( $K_p$ , earthquake class according to Pustovitenko and Kulchitsky) that occurred from 1990 to 2022 was collected for the Crimean-Black Sea region from various sources. These parameters include scalar seismic moment of  $M_0$ , source radius  $r$ , stress drop  $\Delta\sigma$ , etc. The distributions of the DP depending on the magnitude and scalar seismic moment were constructed and approximated by a linear function; in some cases, a power function was additionally considered. The determination coefficient  $R^2$  was calculated. The dependence of the logarithm of the scalar seismic moment for the Crimean-Black Sea region is  $\lg(M_0) = 0.87M + 11.4$  ( $R^2 = 0.84$ ). The areal distribution of the average annual rate of seismotectonic deformations (STD intensity) was constructed based on the earthquake catalog (1993–2022). The STD intensity was compared with the stress drop level. Based on the data on the stress drop for the Crimean-Black Sea region, the areal distribution of the weighted average of the stress drop was constructed.

**Keywords:** earthquake, seismicity, scalar seismic moment, moment magnitude, source radius, stress drop, coefficient of determination, seismotectonic deformations, Crimean-Black Sea region

## Финансирование и благодарности

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (FMWU-2025-0036).

Автор выражает благодарность сотрудникам Института сейсмологии и геодинамики Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского (г. Симферополь), которые многие годы рассчитывают очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона, это Т.А. Пантелеева, Б.Г. Пустовитенко, Э.Э. Эреджепов, М.Н. Бондарь, И.В. Калинюк, А.А. Пустовитенко, Е.А. Мерзей, Е.И. Поречнова, З.Н. Сыкчина, В.А. Свидлова и др.

*Для цитирования:* Сычева Н.А. Анализ динамических параметров землетрясений Крымско-Черноморского региона. Распределение сброса напряжений. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 1, с. 5–22. <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.1.005-022>; <https://www.elibrary.ru/fkahve>

## Funding and Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the state task of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS (FMWU-2025-0036).

The author expresses gratitude to the employees of the Institute of Seismology and Geodynamics of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky (Simferopol), who have been calculating the source parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region for many years: T.A. Panteleeva, B.G. Pustovitenko, E.E. Eredzhepov, M.N. Bondar, I.V. Kalinyuk, A.A. Pustovitenko, E.A. Merzhey, E.I. Porechnova, Z.N. Sykchina, V.A. Svidlova and others.

*For citation:* Sycheva N.A. Analysis of dynamic parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region. Stress drop distribution. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 1, p. 5–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.1.005-022>; <https://www.elibrary.ru/fkahve>

## Введение

Черное море является одним из крупнейших замкнутых морей и существует уже 200 млн лет. Оно находится в Анатолийском секторе Альпийско-Гималайской орогенной системы и расположено между Евразийской плитой на севере и Африкано-Аравийской плитой на юге. Глобальные модели плит [1, 2] и недавние космические геодезические измерения [3, 4] указывают на то, что, двигаясь на север, Африкано-Аравийская плита сталкиваются с Евразийской плитой [5]. От этого столкновения Анатолийский блок движется на запад с полюсом вращения, расположенным примерно на севере Синайского полуострова (рис. 1). В рамках этой тектонической структуры современная тектоника Черного моря была загадкой. Система ГНСС (глобальная навигационная спутниковая система) стала чрезвычайно полезным инструментом благодаря своей способности обеспечивать высокоточную оценку континентальных и региональных деформаций [6, 7].

В геологическом отношении Черноморский бассейн делится на две части: западную и восточную, разделяет их Срединно-Черноморский хребет. Происхождение Черного моря сложно в деталях и изучается давно. Возраст

рифтогенеза для всего Черного моря предполагается как апт-альбский, но возраст рифтогенеза в восточной части Черного моря изучен меньше [9]. После закрытия Неотиса Черное море также начало закрываться в эоцен-олигоценное время. Восточное Черное море продолжало закрываться от миоцена до настоящего времени. Центральная и западная части Черного моря имеют более сложную неотектонику, обусловленную отходом Анатолийского блока, движением Африкано-Аравийской плиты на север и Эгейским растяжением.

В этом столетии в районе Черного моря отмечается сейсмическая активность от низкой до умеренной. Западная оконечность Черного моря к северу от Мраморного моря, территории Болгарии, Румынии и Украины, вероятно, подвержены влиянию тектоники растяжения в западной части Турции и Эгейском море. Существует предположение, что литосфера Черного и Каспийского морей образует устойчивый «заградительный барьер», отклоняющий мигрирующую Анатолийскую плиту на запад и направляющий континентальную литосферу восточной Турции и Кавказа вокруг восточного побережья Черного моря [10].

Горный Крым, как и Северный Кавказ, входит в число наиболее тектонически активных регионов России. Эти регионы находятся в зоне

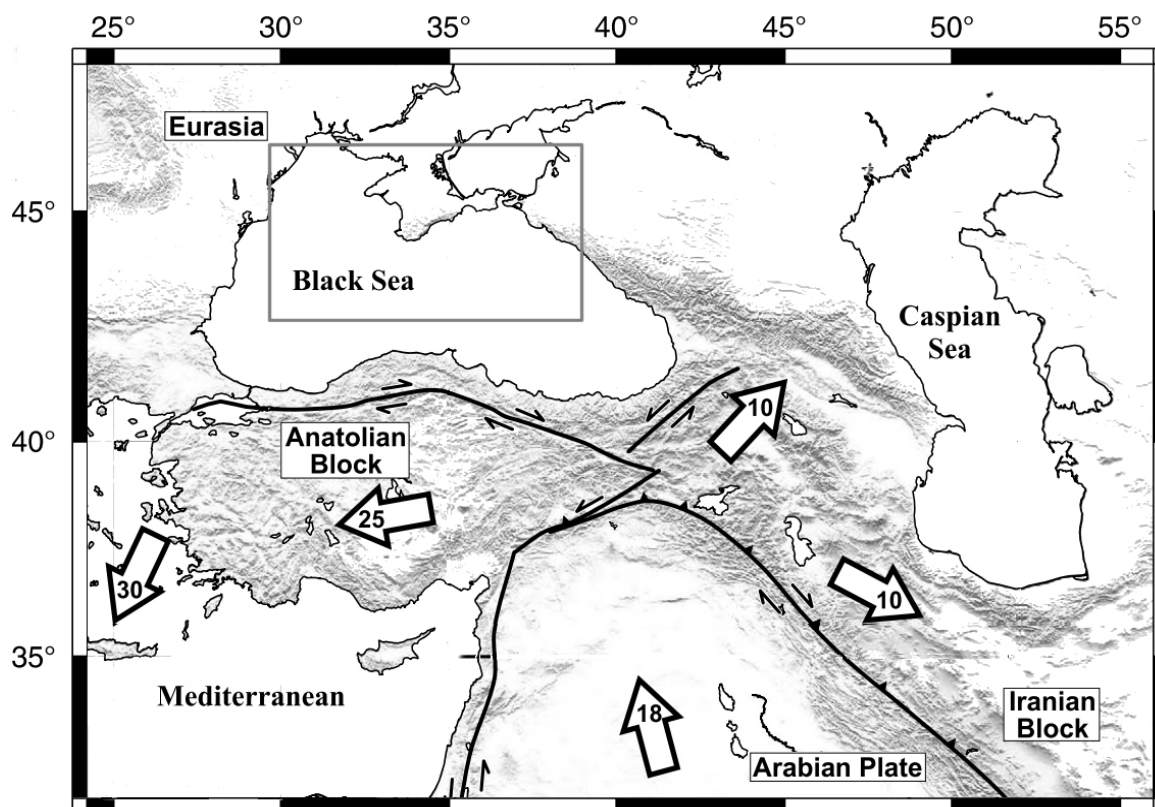


Рис. 1. Относительные движения плит в восточном Средиземноморье [8]. Пронумерованные стрелки показывают направление движения и скорость (мм/год) согласно данным GPS [8]. Серым прямоугольником отмечены условные границы Крымско-Черноморского региона.

Fig. 1. Relative plate motions in the eastern Mediterranean. (Figure from [8]). Numbered arrows show the direction of motion and velocity (mm/yr) according to the GPS data [8]. The grey rectangle marks the conditional boundaries of the Crimean-Black Sea region.

сочленения Скифской плиты и Альпийско-Гималайского складчатого пояса, их геодинамика в широком смысле обусловлена взаимодействием двух крупных литосферных плит – Евразийской и Аравийской. Геодинамические особенности Северного Кавказа обусловлены динамикой Кавказского горного сооружения и активностью Эльбрусского вулканического центра, а Крыма – динамикой системы «континентальная окраина (Горный Крым) – субокеаническая впадина (Черное море)». Крым, как и Северный Кавказ, характеризуется повышенной тектонической активностью, интенсивными современными движениями земной коры, высокой сейсмичностью и вулканизмом [11].

В работе [12] современные коллизионные процессы на северной окраине Черного моря исследовались на основе сопоставления сейсмичности с гравитационным полем и напряженно-деформированным состоянием.

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о поддвиге Восточно-Черноморской микроплиты с тонкой субокеанической корой под Скифскую платформу с толстой континентальной корой. В Южнобережной подзоне процесс поддвига осложняется вклиниванием фронтальной части коры Восточно-Черноморской микроплиты в краевую часть коры Скифской плиты.

Для сложного и неоднородного в сеймотектоническом плане Крымско-Черноморского региона ежегодное пополнение банка данных о параметрах (динамических и кинематических) очагов местных землетрясений является крайне актуальной задачей. Это необходимо в целях изучения и общего познания геодинамических процессов, протекающих в глубинной среде, где зарождаются очаги землетрясений, и возможного прогноза параметров сильных сейсмических воздействий на поверхности Земли [13].

В современных работах по прогнозу землетрясений [14–18 и др.] отмечают существенную неоднородность геологической среды. Как следствие, значения компонентов тензора природных напряжений в большой мере зависят от масштаба осреднения. В условиях мозаичности поля напряжений весьма важными для оценки состояния разломов могут быть данные о снятии напряжений в очагах землетрясений, умеренных по силе. Геомеханическим условием (предпосылкой) сильного землетрясения является недостаточная (по сравнению с обычным асейсмичным периодом) эффективность высвобождения энергии и сброса напряжений при мало- и среднемагнитудных землетрясениях. Для анализа этих и других очаговых параметров нужен большой объем данных, получение которых стало возможным лишь в последние годы.

Для землетрясений Крымско-Черноморского региона очаговые параметры на регулярной основе рассчитываются начиная с 1990 г. Отделом сейсмологии Института геофизики им. С.И. Субботина Национальной академии наук Украины (ныне это Институт сейсмологии и геодинамики, структурное подразделение Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского). Результаты расчетов опубликованы в следующих изданиях: Землетрясения Северной Евразии в 1990–2020 гг. (Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), <http://www.gsras.ru>); Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология, 2014–2022 гг. (<https://sn-geography.cfuv.ru/arhiv>).

Необходимо отметить, что в начальный период очаговые параметры землетрясений Крыма определялись только с использованием аналоговых сейсмограмм. С помощью аналоговых сейсмостанций получены количественные параметры очагов практически всех представительных землетрясений Крыма за период 1955–2006 гг., установлены их пространственно-временные закономерности, получены корреляционные зависимости от энергетического уровня землетрясений [19, 20]. В работе [20] выполнен анализ полученных очаговых пара-

метров, рассмотрено пространственное поле очаговых параметров землетрясений Крыма: механизмов, динамических параметров (ДП) и разрывов за длительный интервал времени. Сделан вывод о пространственной устойчивости особенностей очагов. С 2000 г. в Крыму была начата реорганизация системы наблюдений путем постепенной замены аналогового способа регистрации сейсмических колебаний на цифровой. В работе [21] рассмотрены динамические параметры 58 землетрясений Крыма, впервые восстановленные по спектрам региональных цифровых сейсмических записей. Получено удовлетворительное соответствие рассчитанных значений сейсмического момента и радиуса дислокации средним долгосрочным вариантам аналоговых сейсмических данных. Отмечена тенденция пространственной группировки землетрясений с завышенными и заниженными значениями параметров источника в пределах одного энергетического уровня.

Целью данной работы является сбор из различных источников и анализ данных о динамических параметрах землетрясений слабой и умеренной силы Крымско-Черноморского региона. Анализ данных включает построение распределений динамических параметров в зависимости от энергетической характеристики (магнитуда, класс) и скалярного сейсмического момента. Особый интерес представляют данные о сброшенных напряжениях. Эти данные были использованы для расчета и построения средневзвешенного значения сброшенного напряжения на территории Крымско-Черноморского региона, а также для определения связи между интенсивностью сеймотектонической деформации и уровнем сброса напряжений.

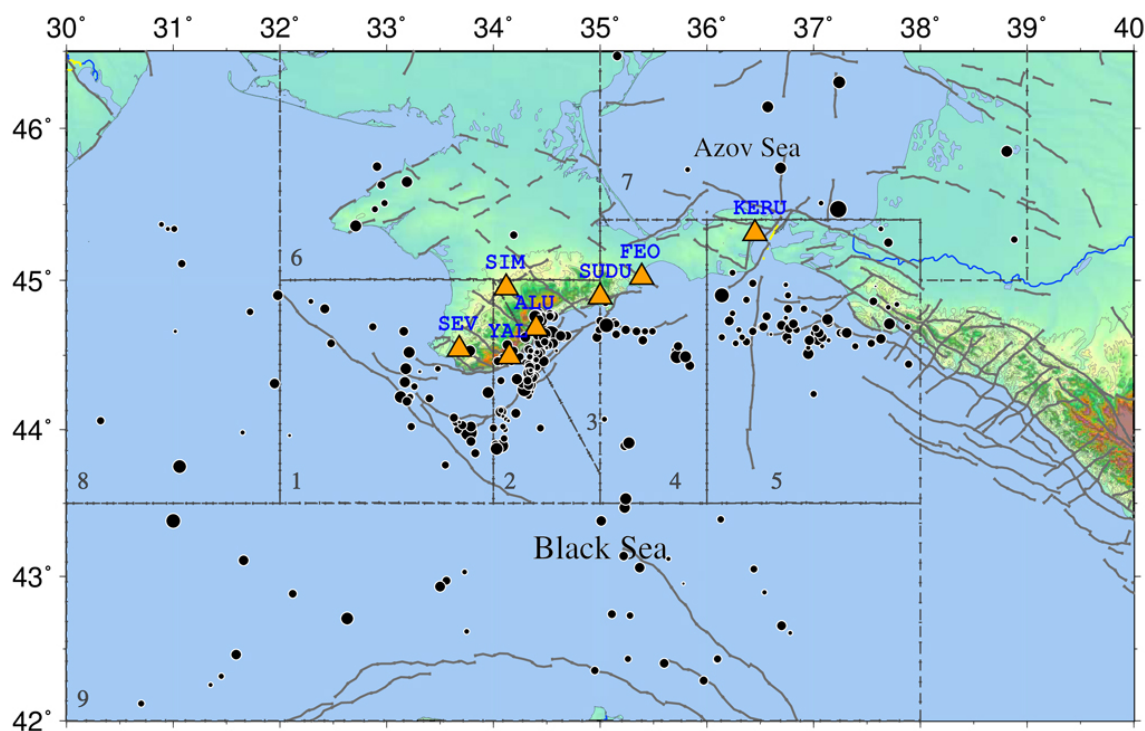
## Исходные данные и методы

В качестве исходных данных рассмотрены динамические параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона из указанных выше источников, где представлены: сейсмический момент,  $M_0$ ; радиус круговой дислокации,  $r_0$ ; сброшенное напряжение,  $\Delta\sigma$ ; кажущееся напряжение,  $\eta\sigma$ ; радиационное трение,  $\Delta\sigma_r$ ; деформация сдвига,  $\varepsilon$ ; средняя подвижка по разрыву,  $\bar{U}$ ; энергия образования

дислокации в очаге,  $E_U$ . Для определения этих параметров использовались количественные связи между теоретическими моделями источников и основными характеристиками амплитудных спектров объемных волн [22] и теоретическая дислокационная модель Брюна [23, 24], в рамках которой удовлетворительно аппроксимируются экспериментальные амплитудные спектры записей землетрясений Крыма [25]. Методика интерпретации спектров с применением данной модели и формулы расчета динамических параметров очага по низкочастотному уровню спектра  $\Omega_0$  и угловой частоте  $f_0$  приведены в работах [25–27]. Методика оцифровки и расчета спектральных и очаговых параметров при работе с аналоговыми сейсмограммами описана в [25]. При расчете динамических параметров очагов по спектрам записи поперечной  $S$ -волны использован полный вектор колебаний по составляющим N–S и E–W,

а по продольной  $P$ -волне – спектр записи вертикальной составляющей  $Z$ .

Для удобной оценки сейсмичности Крымско-Черноморского региона он поделен на 9 районов: Севастопольский (1), Ялтинский (2), Алуштинский (3), Судакско-Феодосийский (4), Керченско-Анапский (5), Степной Крым (6), Азово-Кубанский (7), Северо-Западный (8), Черноморская впадина (9). Разделение региона на районы проведено условно, в основном для грубой привязки к месту возникновения землетрясений при их описании и простоты формализации базы данных [30]. Значительная часть рассматриваемых землетрясений (261 событие, рис. 2) произошла в Южнобережной части Крыма – Ялтинском, Алуштинском и Судакско-Феодосийском районах, а также в Керчинско-Анапском, несколько землетрясений – в Севастопольском, отдельные землетрясения – в Черноморской впадине.



**Рис. 2.** Эпицентры землетрясений Крымско-Черноморского региона (261 событие, 1990–2022 гг.), для которых опубликованы динамические параметры. Треугольники – станции регистрации землетрясений Крымско-Черноморского региона: ALU – Алушта; KERU – Керчь; SEV – Севастополь; SIM – Симферополь; SUDU – Судак; FEO – Феодосия; YAL – Ялта. Серые линии – разломы по [31]. Штрих-пунктирные линии – границы сейсмических районов: 1 – Севастопольский; 2 – Ялтинский; 3 – Алуштинский; 4 – Судакско-Феодосийский; 5 – Керченско-Анапский; 6 – Степной Крым; 7 – Азово-Кубанский; 8 – Северо-Западный; 9 – Черноморская впадина.

**Fig. 2.** Earthquake epicenters in the Crimean-Black Sea region (261 events, 1990–2022), for which dynamic parameters have been published. Triangles indicate earthquake recording stations in the Crimean-Black Sea region: ALU, Alushta; KERU, Kerch; SEV, Sevastopol; SIM, Simferopol; SUDU, Sudak; FEO, Feodosia; YAL, Yalta. Gray lines indicate faults according to [31]. Dash-dotted lines mark the boundaries of seismic regions: 1, Sevastopol; 2, Yalta; 3, Alushta; 4, Sudak-Feodosia; 5, Kerch-Anapa; 6, Steppe Crimea; 7, Azov-Kuban; 8, Northwestern; 9, Black Sea Basin.

На рис. 2 показаны положения сейсмических станций, по записям которых строились стационарные спектры землетрясений. Сейсмические станции расположены вдоль Южнобережной части Крыма, а все сейсмические события (за исключением нескольких землетрясений в Керчинско-Анапском районе) произошли в морской части исследуемой территории. Такое расположение станций и землетрясений осложняет задачу учета направленности очага землетрясения, которая решается использованием параметра  $R_{\theta\phi}$  (направленность излучения из очага на станцию при вычислении скалярного сейсмического момента).

Некоторые количественные характеристики 261 землетрясения представлены на рис. 3. Зависимость количества землетрясений от количества компонент (E–W, N–S, Z), используемых для расчета ДП, показана на рис. 3 а. Для ~40 % событий динамические параметры определены по одной-двум компонентам, для 35 % событий – по 3–5 и 25 % – по 6–12 компонентам. Магнитуда землетрясений варьирует

в диапазоне  $0.27 \leq M \leq 5.41$  ( $K_{II} = 5.2–13.1$ ), значительная часть событий (70 %) имеет магнитуду  $M = 1.5–4.0$  (рис. 3 б). Основная часть землетрясений произошла после 2008 г. (рис. 3 с), и максимум событий приходится на 2010 г. Глубина землетрясений 5–35 км (рис. 3 d).

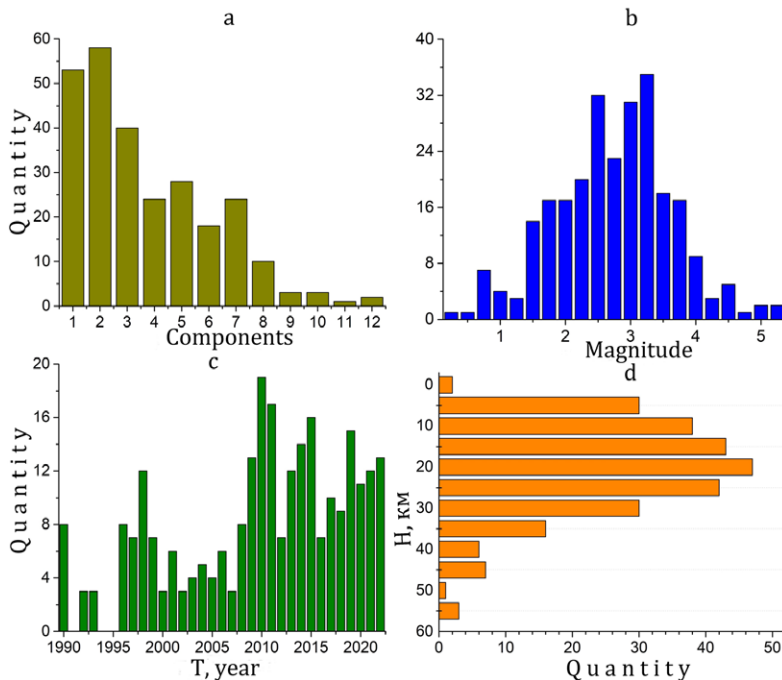
При описании методики расчета ДП землетрясений для Крымско-Черноморского региона в [28] отмечено, что, следуя модели Брюна, спектр смещения объемной волны можно описать с помощью трех основных характеристик: спектральной плотности  $\Omega_0(x, f)$  при  $f \rightarrow 0$ , угла  $\gamma$  наклона огибающей спектра и угловой частоты  $f_0$ . Спектральная плотность  $\Omega_0(x, f)$  и угловая частота  $f_0$  являются главными исходными параметрами для расчета скалярного момента  $M_0$  и радиуса круговой дислокации  $r_0$ . Формула для расчета  $M_0$  по стационарному спектру имеет вид:

$$M_0 = \Omega_0(4\pi\rho U^3)R_{\theta\phi} \cdot G(\Delta, h) \cdot C(f) \cdot Sm(f), \quad (1)$$

где  $\Omega_0$  – максимальное значение спектральной плотности при  $f \rightarrow 0$ ;  $\rho$  – плотность пород в окрестности очага;  $U$  – скорость распространения волны;  $R_{\theta\phi}$  – направленность излучения из очага на станцию;  $G(\Delta, h)$  – поправка за геометрическое расхождение;  $C(f)$  – частотная характеристика среды под станцией;  $Sm(f)$  – поправка за неупругое затухание в мантии. Методика учета всех этих факторов при переходе от стационарного спектра к спектру источника подробно изложена в [25–27]. Геометрические размеры очага  $r_0$  определялись по угловой частоте  $f_0$  амплитудного спектра смещения. Для дислокационной модели Брюна с разрывом в виде круга радиус дислокации  $r_0$  вычисляется по формуле [29]:

$$r_0 = 2.34 \cdot \frac{U_p}{2\pi \cdot f_0}, \quad (2)$$

где  $U_p$  – скорость продольной волны. Выбор скорости волны в формуле зависит от типа волны, по которому строится очаговый спектр ( $P$  или  $S$ ).



**Рис. 3.** Количественное распределение рассматриваемых землетрясений (261 событие): а – по количеству компонент (компоненты сейсмической станции E–W, N–S, Z), по которым определены ДП; б – по магнитуде; с – по годам; д – по глубине.

**Fig. 3.** Quantitative distribution of the earthquakes under consideration (261 events): (a) by the number of components (seismic station component E–W, N–S, Z), by which the DPs were determined; (b) by magnitude; (c) by year; (d) by depth.

Другие динамические параметры очагов, которые перечислены выше, были определены по формулам из работ [25–27] с использованием значений сейсмического момента  $M_0$  и размеров разрыва  $r_0$ . Стоит отметить, что сброс касательных напряжений вычислялся по выражению

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r_0^3}. \quad (3)$$

Такие динамические параметры, как  $\eta\sigma$  и  $\Delta\sigma_r$ , для землетрясений Крымско-Черноморского региона вычисляются с 2011 г., а  $E_U$  – с 2014 г.

Средние значения,  $S$ , всех динамических параметров и их стандартное отклонение  $\delta S$  найдены с учетом логнормального закона распределения величин [25]. Величина  $\delta S$  в источниках по ДП публикуется с 2006 г. и определена для таких параметров, как скалярный сейсмический момент,  $M_0$ ; радиус очага,  $r$ ; сброс касательных напряжений,  $\Delta\sigma$ ; деформация сдвига,  $\epsilon$ , и средняя подвижка по разрыву,  $\bar{U}$ . Среднее значение  $\delta S$  составляет  $0.11 \cdot 10^{13}$  Н·м для сейсмического момента, 0.02 км для радиуса очага, 0.01 МПа для сброса касательных напряжений,  $0.12 \cdot 10^{-6}$  для деформации сдвига и  $0.11 \cdot 10^{-2}$  м для средней подвижки по разрыву.

Для территории Крымско-Черноморского региона в работе выполнен расчет интенсивности сейсмотектонических деформаций (СТД). Для расчета интенсивности СТД использован каталог землетрясений. Данные о землетрясениях, произошедших в регионе, представлены в следующих источниках: Землетрясения Северной Евразии в 2011–2013, 1990–2020, 2021–2023 гг. – 1050 событий (ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), <http://www.gsras.ru>); Ученые записки Крымского Федерального университета им. В. И. Вернадского. География. Геология за 2014–2020 гг. (<https://sn-geography.cfuv.ru/arhiv>) – 767 событий; Сейсмологический бюллетень Украины за 1993–2010 гг. – 738 событий (Библиотека ИФЗ РАН); [32] – 36 событий.

В работе также проведен расчет площадного распределения средневзвешенного значения сброшенных напряжений, а также сравнение сброса напряжений со среднегодовой скоростью СТД. Ниже описана методика рас-

чета средневзвешенного значения сброшенных напряжений и среднегодовой скорости СТД.

*Средневзвешенное значение сброшенных напряжений.* При расчете площадного распределения сброса напряжений используется подход средневзвешенного значения сброса напряжений. Подробно эта методика описана в работе [33]. Отметим, что при усреднении сброшенных напряжений по выборке естественно вводить весовой множитель  $g_i$ , пропорциональный объему очага: т.е.  $g_i \sim r_{0i}^3$ , где  $i$  – номер события в выборке. При этом средневзвешенное значение сброшенных напряжений  $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW}$  будет определяться выражением:

$$\langle \Delta\sigma \rangle_{AW} = \frac{\sum_i g_i \Delta\sigma_i}{\sum_i g_i} = \frac{\sum_i \Delta\sigma_i r_i^3}{\sum_i r_i^3}. \quad (4)$$

Поскольку в (4) произведение  $\Delta\sigma_i r_i^3 = 7/16 (M_0)_i$ , то это выражение можно свести к следующей расчетной формуле для средневзвешенного значения сброшенных напряжений:

$$\langle \Delta\sigma \rangle_{AW} = \frac{7 \sum_i (M_0)_i}{16 \sum_i r_i^3}, \quad (5)$$

где суммирование проводится по всем событиям в выборке;  $M_{0i}$  – скалярный сейсмический момент землетрясения с номером  $i$ ;  $r_i$  – значение радиуса очага, вычисленное по модели Брюна.

*Среднегодовая скорость СТД, или интенсивность СТД.* Для совокупности землетрясений, произошедших в объеме среды  $V$  за период времени  $T$ , вызванная ими усредненная неупругая деформация описывается тензором скорости разрывной (сейсмотектонической) деформации  $\langle \epsilon_{ij} \rangle$  [34, 35]:

$$\langle \epsilon_{ij} \rangle = \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)} m_{ij}^{(\alpha)}, \quad (6)$$

где суммирование проводится по сейсмическим событиям, нумерованным с помощью индекса  $\alpha$ ;  $N$  – количество событий. В выражении (6)  $M_0^{(\alpha)}$  – скалярный сейсмический момент землетрясения с номером ( $\alpha$ );  $m_{ij}^{(\alpha)}$  – направляющий тензор механизма;  $\mu$  – модуль сдвига;  $V$  – исследуемый объем и  $T$  – время исследования. В случае, когда период времени

выражен в годах, тензор  $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$  также называют среднегодовым приростом сеймотектонической деформации.

Используя предположение о подобии СТД на разных масштабных уровнях (подобии подвижек на реальных определениях механизма очагов землетрясений в широком диапазоне энергий, проверка по которому проведена в ряде работ и найдено подтверждение наличия подобия [36]), это выражение можно преобразовать к виду [34]:

$$\langle \varepsilon_{ij} \rangle = I_{\Sigma} \cdot \langle m_{ij} \rangle, \quad (7)$$

где  $I_{\Sigma}$  – интенсивность сеймотектонической деформации, определяемая выражением [37]:

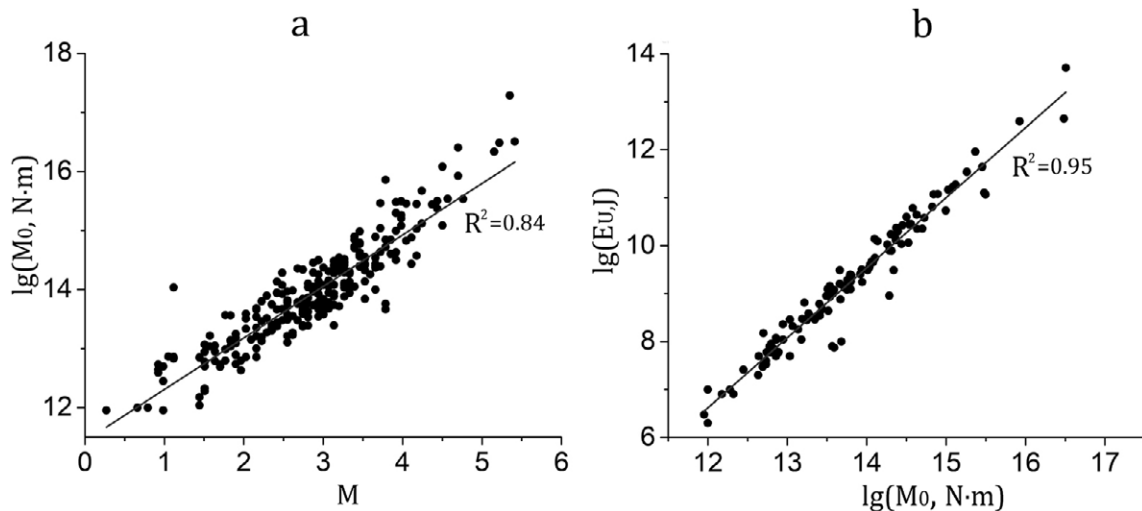
$$I_{\Sigma} = \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)}. \quad (8)$$

## Результаты и обсуждение

В вышеуказанных источниках динамических параметров для всех землетрясений дано значение класса  $K_{II}$ . В работе для всех ДП построены зависимости от логарифма скалярного сейсмического момента, а для скалярного сейсмического момента построена зависимость от магнитуды, пересчитанной из

класса  $K_{II}$  ( $M = 6 + 0.651(K_{II} - 14)$ ) [38]). Распределение динамических параметров аппроксимировано линейной функцией, а в некоторых случаях двумя функциями – линейной и степенной, и для каждой аппроксимации рассчитан коэффициент детерминации  $R^2$  [39]. Коэффициент  $R^2$  показывает качество подгонки регрессионной модели к наблюдаемым значениям. Если  $R^2 = 0$ , то регрессия не улучшает качество предсказания,  $R^2 = 1$  означает точную подгонку, т.е. все точки наблюдений удовлетворяют уравнению регрессии [39]. Значение коэффициента детерминации в статистике, превышающее 0.5, указывает на приемлемое соответствие регрессионной модели реальным данным. Рассчитанные значения коэффициента детерминации вынесены на графики распределения ДП (рис. 4–7).

Скалярный сейсмический момент считают динамической (очаговой) характеристикой и рассматривают в качестве меры потенциальной энергии, необходимой для перемещения масс по поверхности разрыва [40]. Распределение логарифма скалярного сейсмического момента  $\lg(M_0)$  от магнитуды  $M$  показано на рис. 4 а. Это распределение хорошо описывается моделью линейного нарастания. Коэффициент детерминации составляет  $R^2 = 0.84$ .



**Рис. 4.** Распределение логарифма скалярного сейсмического момента  $\lg(M_0)$  от магнитуды  $M$ , пересчитанной из  $K_{II}$  (а), и логарифма энергии образования дислокации в очаге  $\lg(E_v)$  от логарифма скалярного сейсмического момента  $\lg(M_0)$  (б).

**Fig. 4.** Distributions of the logarithm of the scalar seismic moment  $\lg(M_0)$  from the magnitude  $M$ , recalculated from the  $K_{II}$  (а), and the logarithm of the energy of dislocation formation at the source  $\lg(E_v)$  from the logarithm of the scalar seismic moment  $\lg(M_0)$  (б).

Отклонение значений относительно линейной модели (линии регрессии на рис. 4 а) имеет равномерный характер во всем диапазоне рассматриваемых магнитуд. Для скалярного сейсмического момента регрессионную зависимость от магнитуды (наилучшую модель) можно записать в форме

$$\lg(M_0) = 0.87M + 11.43. \quad (9)$$

Для рассматриваемых событий ( $0.27 \leq M \leq 5.41$ ,  $K_{II} = 5.2-13.1$ ) значения  $M_0$  лежат в пределах от  $9.0 \cdot 10^{11}$  до  $1.9 \cdot 10^{17}$  Н·м.

Энергия образования дислокации (разрыва сплошности среды) в очаге землетрясения – это энергия, которая возникает при внезапном высвобождении упругих напряжений в очаге. Это связано с тем, что очаг землетрясения – объем геологической среды, где происходят разрывы пород и высвобождение упругих напряжений [19]. На рис. 4 б представлено распределение логарифма энергии образования дислокации в очаге  $E_U$  от логарифма скалярного сейсмического момента  $\lg(M_0)$ . Этот параметр в указанных выше источниках приводится для землетрясений Крымско-Черноморского региона с 2014 г. Энергия образования дислокации меняется в диапазоне  $2.0 \cdot 10^6 - 5.12 \cdot 10^{13}$  Дж. Распределение хорошо описывается линейной моделью, коэффициент детерминации составляет  $R^2 = 0.95$ . Тесная связь между  $\lg(E_U)$  и  $\lg(M_0)$

обусловлена тем, что величина  $E_U$  напрямую зависит от величины скалярного сейсмического момента  $M_0$ .

Размер области очага землетрясения и величина сбрасываемых упругих напряжений обуславливают энергию сейсмических волн и магнитуду землетрясения. Распределение значений радиуса очага Брюна  $r$  в зависимости от логарифма скалярного сейсмического момента  $\lg(M_0)$  представлено на рис. 5 а. Это распределение описано линейной и степенной функцией. При линейной аппроксимации коэффициент детерминации  $R^2 = 0.53$ , а при степенной  $R^2 = 0.56$ . Значения  $R^2$  указывают на то, что обе модели одинаково удовлетворительно описывают рассматриваемое распределение. Величина радиуса  $r$  лежит в интервале от ~60 до ~2650 м.

Величина сброшенных напряжений характеризует среднее различие между касательным напряжением в разломе до землетрясения,  $\sigma_0$ , и после него,  $\sigma_1$  [41]. Значения сброшенных напряжений (рис. 5 б), определенных по модели Брюна, лежат в диапазоне от 0.011 до 31 МПа. Сброс напряжений меняется незначительно для землетрясений с  $\lg(M_0) \leq 15$  ( $M_w \leq 4.0$ ) и имеет большой разброс для землетрясений с  $\lg(M_0) > 15$  ( $M_w > 4.0$ ). При линейной аппроксимации коэффициент детерминации составляет  $R^2 = 0.2$ , а при степенной  $R^2 = 0.3$ .

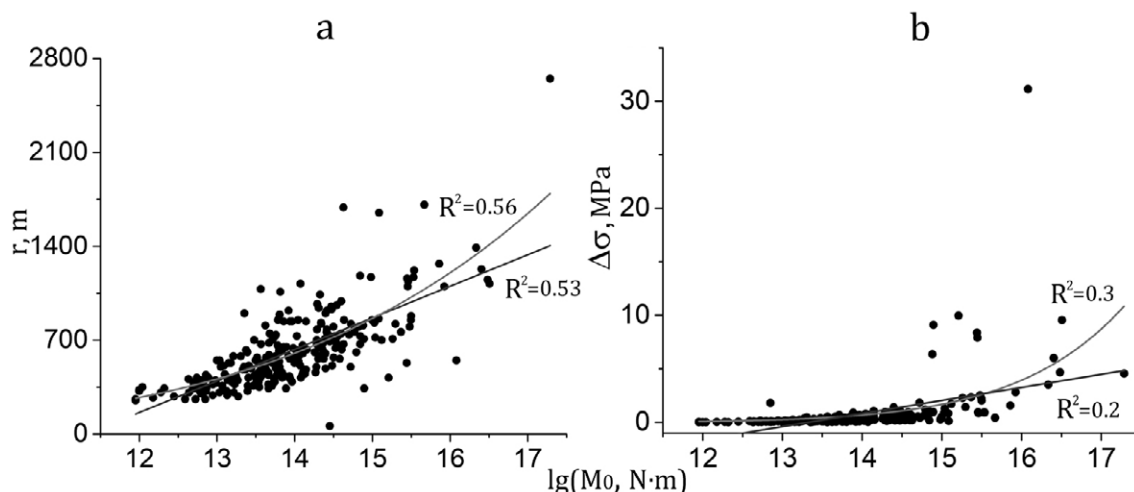


Рис. 5. Распределение радиуса очага  $r$  (а) и сброса напряжений  $\Delta\sigma$  (б) от логарифма скалярного сейсмического момента  $\lg(M_0)$ .

Fig. 5. Distribution of the source radius  $r$  (а) and the stress drop (б) from the logarithm of the scalar seismic moment  $\lg(M_0)$ .

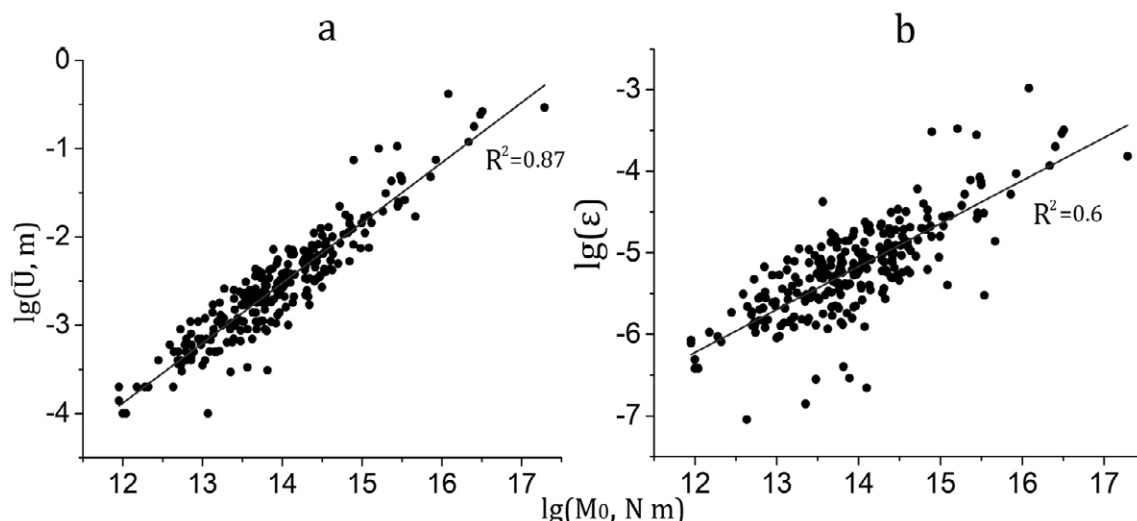
Обе модели показывают низкое качество подгонки.

*Средняя подвижка по разрыву* (или величина дислокации) – один из динамических параметров очага землетрясения. На рис. 6 а представлено распределение средней подвижки по разрыву  $\bar{U}$  в логарифмическом масштабе. Для рассматриваемого класса событий этот параметр варьирует в пределах  $(0.01-34.13) \cdot 10^{-2}$  м. Распределение этого параметра в логарифмическом масштабе идентично зависимости скалярного сейсмического момента от магнитуды землетрясения. Выражение для вычисления средней подвижки по разрыву включает значение скалярного сейсмического момента и радиуса очага. Распределение этого параметра так же хорошо описывается линейной моделью, как распределение, показанное на рис. 4 а, коэффициент детерминации составляет  $R^2 = 0.87$ .

На рис. 6 б показано распределение логарифма *величины деформации сдвига* в зависимости от логарифма скалярного сейсмического момента и аппроксимация распределения линейной моделью. Значение коэффициента детерминации составляет  $R^2 = 0.6$ , что обусловлено значительными отклонениями некоторых значений распределения от линейной модели. Значение  $\varepsilon$  меняется от  $0.09 \cdot 10^{-6}$  до  $\sim 1000 \cdot 10^{-6}$ .

*Кажущееся напряжение* – среднее уменьшение напряжения сдвига вдоль сейсмического разлома (падение статического напряжения). Это один из ключевых параметров, описывающих очаг землетрясения. На рис. 7 а представлено распределение кажущегося напряжения  $\eta\sigma$  (для землетрясений Крымско-Черноморского региона рассчитывается с 2011 г.). Этот параметр для землетрясений с  $0.27 \leq M \leq 5.41$  изменяется в пределах от 0.005 до 2.05 МПа. Коэффициент детерминации при линейной и степенной аппроксимации имеет идентичное значение и составляет  $R^2 = 0.22$ . Для сброшенных напряжений степенная модель лучше описывает распределение, чем для касательных напряжений.

*Радиационное трение* (реакция излучения, лучистое трение, торможение излучением) – сила, действующая на заряженную точечную частицу (например, электрон) со стороны ее собственного электромагнитного излучения, вызываемого неравномерностью движения этой частицы [26]. Распределение величины радиационного трения  $\Delta\sigma_r$  (рассчитывается с 2011 г.) показано на рис. 7 б. Для 64 % событий логарифм этого значения варьирует в пределах от 0.2 до  $-0.2$  МПа (вокруг оси абсцисс). Низкие значения коэффициентов детерминации для аппроксимации



**Рис. 6.** Распределение средней подвижки по разрыву  $\bar{U}$  (величина дислокации) в логарифмическом масштабе (а) и логарифма величины деформации сдвига (б) от логарифма скалярного сейсмического момента  $\lg(M_0)$ .

**Fig. 6.** Distributions of the average displacement along the rupture  $\bar{U}$  (or the magnitude of the dislocation) in a logarithmic scale (b) and the logarithm of the displacement magnitude from the logarithm of the scalar seismic moment  $\lg(M_0)$ .

экспериментального распределения линейной функцией ( $R^2 = 0.08$ ) и степенной ( $R^2 = 0.31$ ) показывают, что эти модели не могут быть использованы для описания исследуемого распределения.

Таким образом, для Крымско-Черноморского региона построены распределения различных динамических параметров, характеризующих очаг землетрясения, и определены граничные значения. Коэффициент детерминации, полученный для каждой регрессии, описывающей распределение, показал следующее. Линейная модель хорошо описывает распределение скалярного сейсмического момента  $\lg(M_0)$  от магнитуды землетрясения, логарифма энергии образования дислокации в очаге  $\lg(E_U)$  от логарифма скалярного сейсмического момента  $\lg(M_0)$  и логарифма средней подвижки по разрыву  $\lg(E_U)$  от логарифма скалярного сейсмического момента  $\lg(M_0)$ . В отличие от линейной модели, степенная модель наиболее эффективно описывает распределение радиуса очага от скалярного сейсмического момента  $\lg(M_0)$ .

*Распределение сброшенных напряжений в Крымско-Черноморском регионе.* Сброшенные напряжения для рассматриваемых землетрясений варьируют в диапазоне от 0.01 до 31 МПа. Все исследуемые землетрясения по уровню сброшенных напряжений были раз-

биты на шесть групп:  $0.01 \text{ МПа} \leq \Delta\sigma < 0.1 \text{ МПа}$  (24.5 % событий);  $0.1 \text{ МПа} \leq \Delta\sigma < 0.2 \text{ МПа}$  (19.5 %);  $0.2 \text{ МПа} \leq \Delta\sigma < 0.4 \text{ МПа}$  (23 %);  $0.4 \text{ МПа} \leq \Delta\sigma < 1 \text{ МПа}$  (22 %);  $1 \text{ МПа} \leq \Delta\sigma < 5 \text{ МПа}$  (8 %) и  $\Delta\sigma \geq 5 \text{ МПа}$  (3 %). На рис. 8 представлено положение эпицентров исследуемых землетрясений; указано количество событий, соответствующее каждому из указанных диапазонов сброса касательных напряжений.

Согласно выражению (8), интенсивность сейсотектонической деформации является количественной характеристикой, это дает возможность при ее расчете использовать данные каталога землетрясений. Для территории Крымско-Черноморского региона значение среднегодовой скорости СТД (интенсивность СТД) рассчитано на основе сейсмических данных за 1993–2022 гг.

Наиболее известным соотношением между магнитудой  $M$  и скалярным сейсмическим моментом  $M_0$  (Н·м) является зависимость из [35]:  $\lg(M_0) = 1.6M + 8.4$ , которую можно использовать для расчета скалярного сейсмического момента. Расчет интенсивности СТД выполняется суммированием скалярных сейсмических моментов в пределах каждой области согласно [37]. Расчет логарифма интенсивности СТД проводился для ячеек размером  $0.5 \times 0.5^\circ$ .

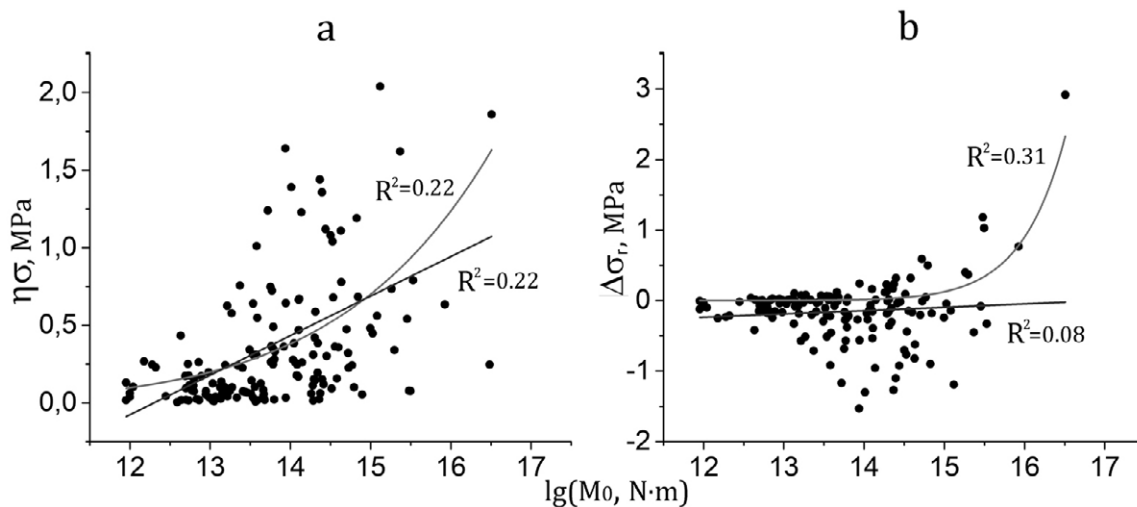


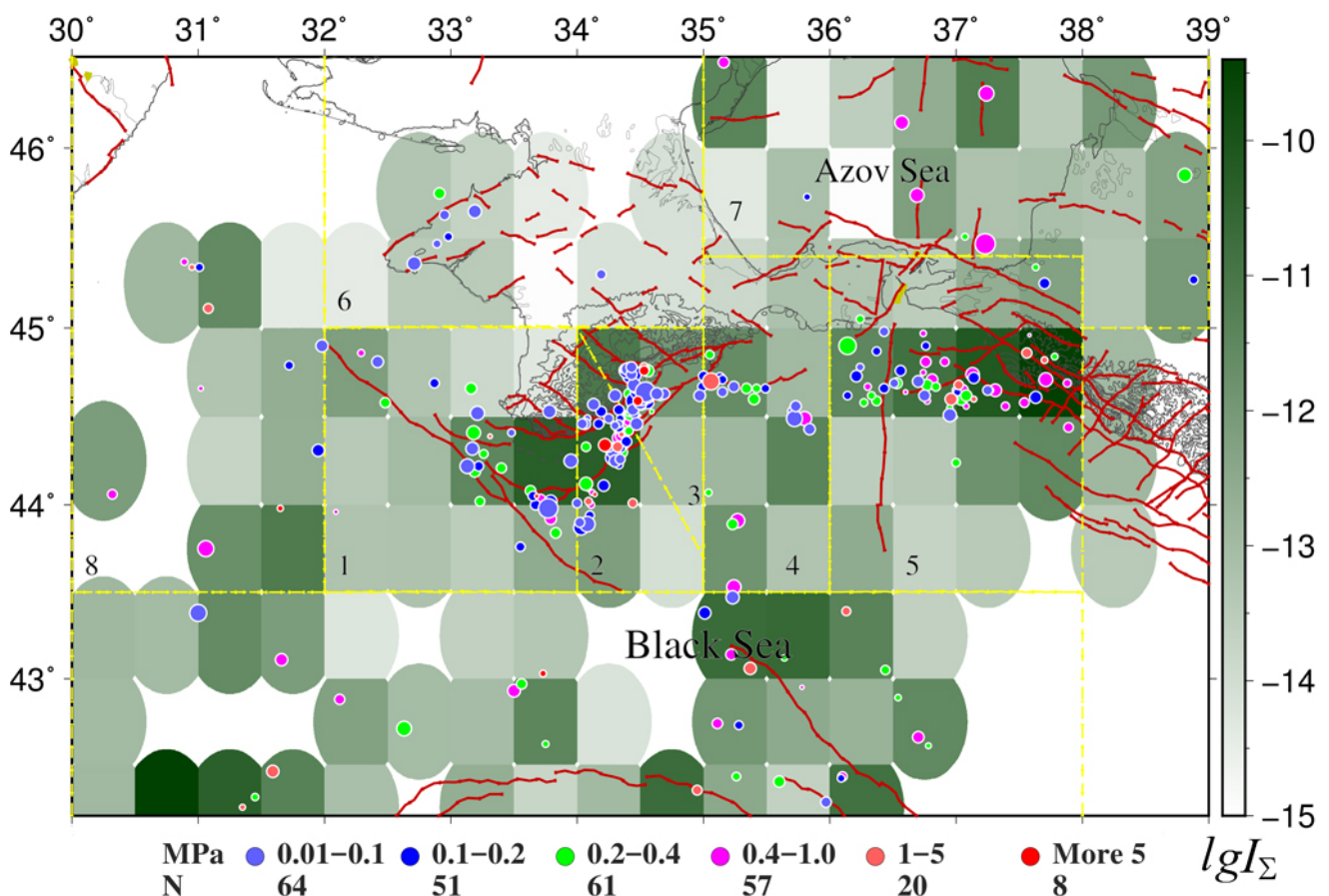
Рис. 7. Распределение кажущегося напряжения  $\eta\sigma$  (МПа) (а) и величины радиационного трения  $\Delta\sigma_r$  (МПа) (б) от  $\lg(M_0)$ .

Fig. 7. Distributions of apparent stress  $\eta\sigma$  (MPa) (a) and radiation friction value  $\Delta\sigma_r$  (MPa) (b) from  $\lg(M_0)$ .

На рис. 8 фоном представлено распределение логарифма интенсивности СТД. Темно-зеленому цвету соответствует скорость деформации земной коры  $10^{-10}$  год<sup>-1</sup>. Соответственно, в ячейках темно-зеленого цвета показаны самые крупные события в период с 1993 по 2022 г. Наиболее высоким уровнем интенсивности СТД характеризуются отдельные ячейки Севастопольского, Ялтинского, Алуштинского и Анапско-Керченского районов, где расположена значительная часть землетрясений, для которых определены динамические параметры. По районам суммарный сброс напряжений составил: Севастопольский – 13.8 МПа; Ялтинский и Алуштинский ~64; Судакско-Феодосийский ~9; Керченско-Анапский ~28; Степной Крым ~0.6; Азово-Кубанский ~4; Северо-Западный ~14; Черноморская впадина ~60 МПа.

Максимальный сброс напряжений произошел в Южнобережной части Крыма (Ялтинский, Алуштинский районы) (94 события) и Черноморской впадине (31 событие). Значителен этот показатель и в Керченско-Анапском районе (57 событий).

Положение эпицентров отдельных событий и соответствующее им значение уровня сброшенных напряжений не дают полного представления о площадном распределении сброшенных напряжений. Для построения площадного распределения сброса напряжений исследуемая территория была разбита на ячейки размером  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , и в каждой ячейке, где были землетрясения, рассчитывалось средневзвешенное значение сброшенных напряжений на основе выражения (5). Для визуализации результатов расчета



**Рис. 8.** Положение эпицентров исследуемых землетрясений на фоне распределения интенсивности СТД. Цвет кружка зависит от величины сброшенного напряжения, а размер – от энергетической характеристики. Красные линии – разломы по [31]. Штрихпунктирные линии – границы сейсмических регионов (см. подпись к рис. 2).

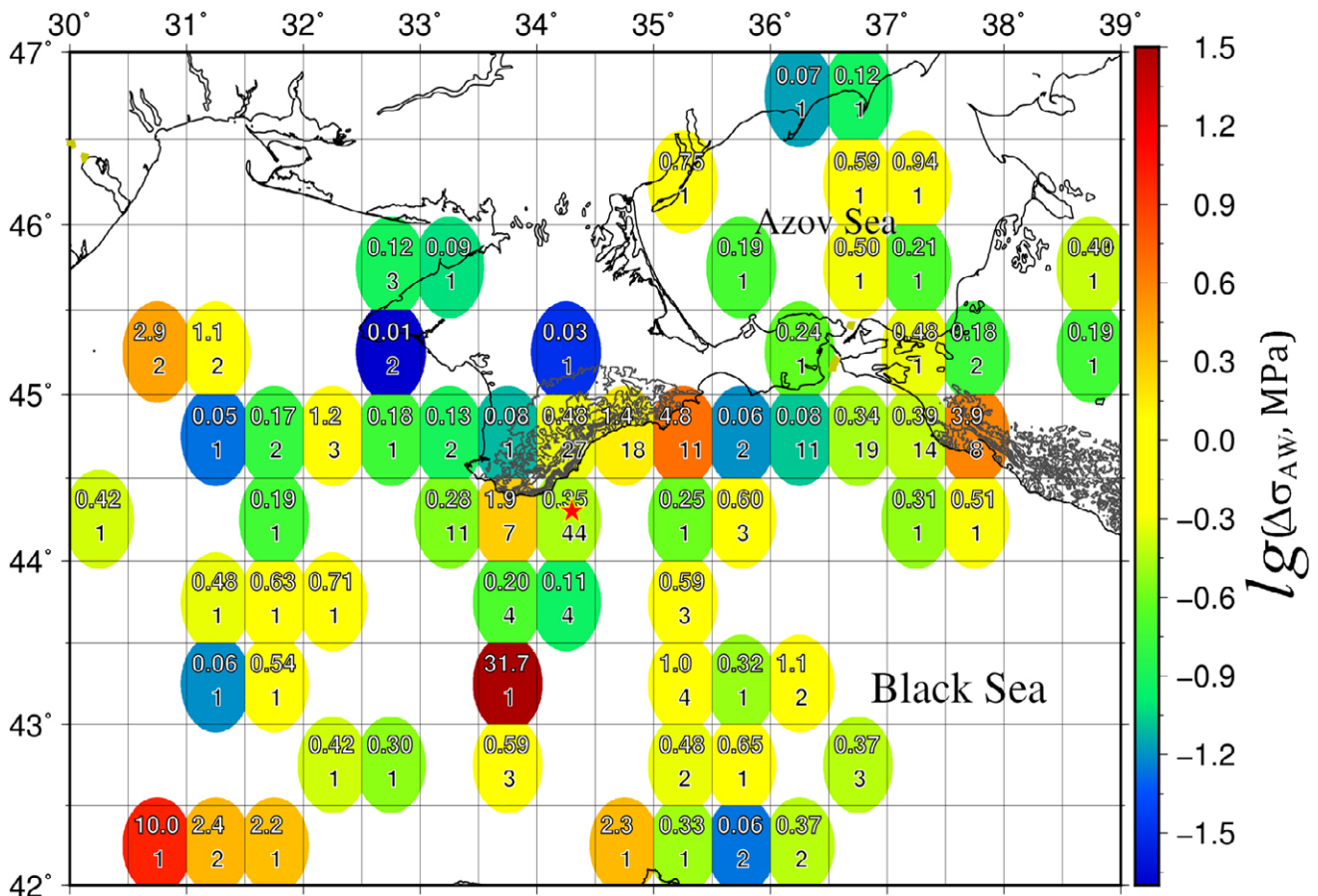
**Fig. 8.** Locations of the earthquake epicenters in the Crimean-Black Sea region against the background of the STD intensity distribution. The color of the circle depends on the magnitude of the stress drop, and the size depends on the energy characteristic. Red lines indicate faults according to [31]. Dash-dotted lines mark the boundaries of seismic regions (see caption to Fig. 2).

(построения карты) использовалась программа *nearneighbor* пакета GMT [Generic Mapping Tools, <https://www.generic-mapping-tools.org/>], в которой реализован алгоритм ближайшего соседа для присвоения среднего значения каждому узлу, имеющему одну или несколько точек в пределах заданного радиуса от узла. В этом программном пакете узел считается центром эллиптической (круговой) зоны, на которую распространяется вычисленное среднее значение.

На рис. 9 показаны ячейки, для которых получены значения  $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW}$ . Цвет ячейки на карте зависит от величины логарифма усредненных сброшенных напряжений (логарифмический масштаб позволяет более контрастно выделить ячейки с минимальным значением сброшенных напряжений). В каждой ячейке показано сред-

невзвешенное значение сброшенных напряжений и количество событий, попавших в нее.

Максимальное количество событий (44) относится к ячейке, которая совпадает с очаговой областью землетрясения 11 сентября 1927 г. с  $M = 6.8$ ,  $\varphi = 44.3^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 34.3^\circ$  в.д. [30]. За время исследования (1990–2022 гг.) в этой области произошло три землетрясения с  $K_{II} > 11$ , которые сопровождалось небольшим количеством афтершоков. В отдельных ячейках Черноморской впадины значение средневзвешенного сброшенного напряжения составляет 10 и более 31 МПа. В каждой из этих ячеек произошло одно событие (по сути, это значение сброса напряжений). Для ячеек темно-голубого цвета  $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW} \sim 0.05$  МПа, зеленого цвета  $\sim 0.16$  МПа, желтого  $\sim 2.1$  МПа, красного и оранжевого цвета  $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW} \sim 2.3$  МПа.



**Рис. 9.** Распределение значений логарифма средневзвешенного значения сброшенных напряжений. Квадраты – ячейки  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , в каждой из которых рассчитывалось  $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW}$ . Нижняя цифра в ячейке указывает количество событий, попавших в ячейку, верхнее число – значение  $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW}$  в МПа. Звездочка – положение землетрясения 11 сентября 1927 г.

**Fig. 9.** Distribution of the logarithm of the weighted average of the stress drop. Squares represent  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  cells, in each of which  $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW}$  was calculated. The lower number in a cell indicates the number of events within that cell, and the upper number is the  $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW}$  value in MPa. The asterisk indicates the location of the September 11, 1927 earthquake.

В Южнобережной части Крыма максимальное значение средневзвешенного сброшенного напряжения соответствует ячейке, расположенной в его северной части (Судакско-Феодосийский район), где произошло 11 событий ( $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW} = 4.8$  МПа), и ячейке в южной части (Севастопольский район), где произошло 7 событий ( $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW} = 1.9$  МПа). В Анапско-Керченском сейсмическом районе максимальное значение средневзвешенного сброшенного напряжения соответствует ячейке с 8 событиями ( $\langle \Delta\sigma \rangle_{AW} = 3.9$  МПа). Эти ячейки могут быть зонами максимального соприкосновения (сцепления) и подгрузки Восточно-Черноморской плиты под Скифскую платформу, о чем указано в работе [12].

Землетрясения в Черноморской впадине могут сопровождаться цунами [42]. Особого внимания заслуживают землетрясения в прибрежной зоне, которые представляют опасность для городов и селений Крыма и Черноморского побережья Кавказа.

Анализ данных по динамическим параметрам землетрясений Крымско-Черноморского региона позволил определить граничные значения исследуемых параметров для землетрясений слабой и умеренной силы. Большое значение имеют данные по сбросу касательных напряжений. В дальнейшем они могут быть использованы при реконструкции напряжений на основе метода катакластического анализа разрывных смещений (МКА, [43]). При выполнении реконструкции напряжений для определения эффективного всестороннего давления в горных массивах требуются данные о динамических параметрах землетрясений, произошедших на исследуемой территории (в частности о величине сброса напряжений при локальном землетрясении).

Мониторинг данных о напряженном состоянии Крымско-Черноморского региона следует рассматривать в качестве основы для тектонофизического районирования участков активных разломов по степени опасности генерирования сильных землетрясений (таких как Ялтинское землетрясение 11.09.1927,  $M = 6.8$ ). Картирование активных разломов по этому признаку позволит выделить наиболее опасные участки и в дальнейшем проводить тектонофизический мониторинг изменения напряженного состояния.

## Заключение

Из опубликованных источников собраны данные о динамических параметрах землетрясений слабой и умеренной силы (261 событие с  $K_{\Pi} = 5.2-13.1$ ,  $0.27 \leq M \leq 5.41$ ), которые произошли в Крымско-Черноморском регионе с 1990 по 2022 г. В рассматриваемых источниках расчет динамических параметров землетрясений Крымско-Черноморского региона выполнен на основе модели Брюна. Динамические параметры включают скалярный сейсмический момент, радиус очага, сброс касательных напряжений, кажущееся напряжение, деформацию сдвига и др.

В работе проведен анализ собранных данных: построены распределения динамических параметров от магнитуды и скалярного сейсмического момента; выполнена аппроксимация распределений линейной функцией, а для некоторых распределений степенной функцией; рассчитан коэффициент детерминации. Определена зависимость логарифма скалярного сейсмического момента от магнитуды для Крымско-Черноморского региона, которая имеет вид:  $\lg(M_0) = 0.87M + 11.43$ . Коэффициент детерминации составляет 0.84.

Проведено сопоставление сброса напряжений с интенсивностью сеймотектонической деформации земной коры. Основной сброс напряжений происходит в областях, где среднегодовая скорость СТД составляет  $10^{-10}$  год<sup>-1</sup> – отдельные ячейки Севастопольского, Ялтинского, Алуштинского и Анапско-Керченского районов. Суммарный сброс напряжений в Южнобережной части Крыма (Ялтинский, Алуштинский районы) составляет ~64 МПа, в Черноморской впадине ~60, в Анапско-Керченском районе ~28 МПа.

Для Крымско-Черноморского региона построено распределение средневзвешенного значения сброшенного напряжения и определены зоны максимального и минимального сброса напряжений. Данные о распределении сброса напряжений на территории Крымско-Черноморского региона следует рассматривать в качестве дополнительных данных при тектонофизическом районировании опасных участков активных разломов по степени опасности генерирования сильных землетрясений.

## Список литературы

1. DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S. Current plate motions. *Geophysical Journal International*. 1990,101:425–478. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1990.tb06579.x>
2. DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S. Effects of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*. 1994,21:2191–2194. <https://doi.org/10.1029/94gl02118>
3. Smith D.E., Kolenkiewics R., Robbins J.W., Dunn P.J., Torrence M.H. Horizontal crustal motion in the central and eastern Mediterranean inferred from satellite laser ranging measurements. *Geophysical Research Letters*. 1994,21:1979–1982. <https://doi.org/10.1029/94gl01612>
4. Reilinger R. et al. Global Positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasiaplate collision zone. *Journal of Geophysical Research*. 1997,102:9983–9999. <https://doi.org/10.1029/96jb03736>
5. Tari E., Sahin M., Barka A., Reilinger R., King R., McClusky S., Prilepin M. Active tectonics of the Black Sea with GPS. *Earth Planets Space*. 2000,52:747–751. <https://doi.org/10.1186/bf03352276>
6. Segall P., Davis J.L. GPS application for geodynamics and earthquake studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1997,25:301–336. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.25.1.301>
7. Herring T.A. Geodetic applications of GPS. *Proceedings of the IEEE*. 1999,87:92–110. <https://doi.org/10.1109/5.736344>
8. McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M., Hurst K., Kahle H., et al. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*. 2000,105(B3):5695–5719. doi:10.1029/1996JB900351
9. Gorur N. Cretaceous syn- to post-rift sedimentation on the Southern Continental Margin of the Western Black Sea Basin. In: *Regional and petroleum geology of the Black Sea and surrounding region* (ed. by A.G. Robinson). American Association of Petroleum Geologists (AAPG), AAPG Memoir. 1997,68:227–240.
10. Spadini G., Robinson A., Cloetingh S. Western versus Eastern Black Sea tectonic evolution: Pre-rift lithospheric controls on basin formation. *Tectonophysics*. 1996,266(1–4):139–154. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(96\)00187-4](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(96)00187-4)
11. Миронов А.П., Милюков В.К., Стеблов Г.М. Современные подвижки северного Кавказа и Крыма по GPS наблюдениям. В кн.: *Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов всероссийской конференции*, 2016, т. 1, с. 168–170.
12. Гобаренко В.С., Муровская А.В., Егорова Т.П., Шеремет Е.Е. Современные коллизионные процессы на северной окраине Черного моря. *Геотектоника*. 2016,4:68–87. doi:10.7868/S0016853X16040020
13. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э., Бондарь М.Н. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма 2022 года. *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология*. 2023,9(4):139–156.
14. Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А. Тектонофизическое районирование активных разломов Алтая и Западных Саян, выделение участков подготовки сильных землетрясений. *Геотектоника*. 2025,6:85–118.
15. Ребецкий Ю.Л. Современное состояние теорий прогноза землетрясений. Результаты оценки природных напряжений и новая модель очага землетрясений. В кн.: *Проблемы тектонофизики: К сорокалетию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН*. М.: ИФЗ РАН, 2008, с. 359–395.
16. Певнев А.К. Прогноз землетрясений возможен (О месте геодезических исследований в решении проблемы прогноза землетрясений). Ч. 1. Г.А. Гамбургцев и возможность прогнозирования землетрясений. *Пространство и Время*. 2015,4(22):195–201.
17. Певнев А.К. Прогноз землетрясений возможен: (О месте геодезических исследований в решении проблемы прогноза землетрясений). Ч. 2. Возвращение к Г.А. Гамбургцеву: деформационная модель подготовки очага корового землетрясения. *Пространство и Время*. 2016,1-2(23-24):227–238. URL: [https://space-time.ru/spacetime/article/view/2226-7271prov\\_st1\\_2-23\\_24.2016.91](https://space-time.ru/spacetime/article/view/2226-7271prov_st1_2-23_24.2016.91) (дата обращения: 02.02.2026).
18. Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. Современные тенденции в области механики тектонических землетрясений. *Вестник Пермского научного центра УрО РАН*. 2014,3:44–62. EDN: TDURFP
19. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. *Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма*. Киев: Наукова думка, 1990, 249 с.
20. Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Капитанова С.А., Поречнова Е.И. Пространственные особенности очаговых параметров землетрясений Крыма. *Сейсмичность Северной Евразии: Материалы Междунар. конф.* Обнинск: ГС РАН, 2008, с. 238–242.
21. Пустовитенко Б.Г., Мержей Е.А., Пустовитенко А.А. Динамические параметры очагов землетрясений Крыма по данным цифровых сейсмических станций. *Геофизический журнал*. 2013,35(5):172–186.
22. Пустовитенко Б.Г. Уточненные очаговые параметры землетрясений Крыма 1990 года. *Ученые записки Таврического национального университета*

- имени В.И. Вернадского. Серия География. 2014,27(2):169–178.
23. Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake. *Journal Geophysical Research*. 1970,75(26):4997–5009. <https://doi.org/10.1029/jb075i026p04997>
  24. Brune J.N. Corrections [to “Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes”]. *Journal of Geophysical Research*. 1971,76(5002). <http://dx.doi.org/10.1029/JB076i020p05002>
  25. Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И., Зобин В.М., Коган С.Я., Корчагина О.А., Москвина А.Г., Поликарпова Л.А., Чепкунас Л.С. Спектры Р-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага. *Вулканология и сейсмология*. 1989,2:66–79.
  26. Костров Б.В. *Механика очага тектонического землетрясения*. М.: Наука, 1975, 179 с.
  27. Hanks T.C., Kanamori H. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*. 1979,84(35):2348–2350. <https://doi.org/10.1029/jb084ib05p02348>
  28. Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В., Мерзей Е.А. Динамические параметры очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона. *Землетрясения Северной Евразии*. 2016,19(2010):296–304.
  29. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона. *Землетрясения Северной Евразии*. 2020,23(2014):250–262.
  30. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Горячун А.В. Землетрясения Крымско-Черноморского региона (инструментальный период наблюдений 1927–1986 гг.). Киев: Наукова думка, 1989, 192 с.
  31. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифионов В.Г. База данных активных разломов Евразии. *Геодинамика и тектонофизика*. 2017,8(4):711–736. [doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0314](https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0314); EDN: ZWRGN
  32. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Сухорученко С.К., Клянчин А.И. Организация и первые результаты сейсмических наблюдений в северо-западной части территории Крыма (1972–2020 гг.). *Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология*. 2020,6(4):144–169.
  33. Сычева Н.А., Богомолов Л.М. Распределение приведенной сейсмической энергии и сброшенных напряжений в Алтае-Саянском сейсмоактивном регионе. *Геодинамика и тектонофизика*. 2025,16(4):0835. [doi:10.5800/GT-2025-16-4-0835](https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-4-0835)
  34. Юнга С.Л. *Методы и результаты изучения сейсмо-тектонических деформаций*. М.: Наука, 1990, 191 с.
  35. Ризниченко Ю.В. *Проблемы сейсмологии: Избранные труды*. М.: Наука, 1985, 408 с.
  36. Юнга С.Л. *Изучение движений поверхности и деформаций земной коры на территории Центрального Тянь-Шаня, Казахской платформы и Алтая; создание программ обработки сейсмологических данных, проведение обработки: Отчет о научно-исследовательской работе*. Обнинск, 2002, 41 с.
  37. Лукк А.А., Юнга С.Л. Сеймотектоническая деформация Гармского района. *Известия АН СССР. Физика Земли*. 1979,10:24–43.
  38. Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G., Kendall A.D. Origins and methodology of the russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales. *Seismological Research Letters*. 2007,78(6):579–590. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.6.579>
  39. Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А. *Эконометрика. Начальный курс*. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Дело, 2004, 576 с.
  40. Пузырев Н.Н. *Методы и объекты сейсмических исследований*. Новосибирск: Изд-во СО РАН: НИЦО-ИГГМ, 1997, 300 с.
  41. Gibowicz S.J., Kijko A. *An introduction to mining seismology*. San Diego: Academic Press, 1994, 399 p. (International Geophysics). <https://doi.org/10.1016/c2009-0-02348-4>
  42. Никонов А.А. Цунами на берегах Черного и Азовского морей. *Физика Земли*. 1997,1:86–96.
  43. Ребецкий Ю.Л. *Тектонические напряжения и прочность горных массивов*. М.: Академкнига, 2007, 406 с.

## References

1. DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S. Current plate motions. *Geophysical Journal International*. 1990,101:425–478. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1990.tb06579.x>
2. DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S. Effects of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*. 1994,21:2191–2194. <https://doi.org/10.1029/94gl02118>
3. Smith D.E., Kolenkiewics R., Robbins J.W., Dunn P.J., Torrence M.H. Horizontal crustal motion in the central and eastern Mediterranean inferred from satellite laser ranging measurements. *Geophysical Research Letters*. 1994,21:1979–1982. <https://doi.org/10.1029/94gl01612>
4. Reilinger R. et al. Global Positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasiaplate collision zone. *Journal of Geophysical Research*. 1997,102:9983–9999. <https://doi.org/10.1029/96jb03736>
5. Tari E., Sahin M., Barka A., Reilinger R., King R., McClusky S., Prilepin M. Active tectonics of the Black

- Sea with GPS. *Earth Planets Space*. 2000,52:747–751. <https://doi.org/10.1186/bf03352276>
6. Segall P., Davis J.L. GPS application for geodynamics and earthquake studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1997,25:301–336. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.25.1.301>
  7. Herring T.A. Geodetic applications of GPS. *Proceedings of the IEEE*. 1999,87:92–110. <https://doi.org/10.1109/5.736344>
  8. McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M., Hurst K., Kahle H., et al. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*. 2000,105(B3):5695–5719. doi:10.1029/1996JB900351
  9. Gorur N. Cretaceous syn- to post-rift sedimentation on the Southern Continental Margin of the Western Black Sea Basin. In: *Regional and petroleum geology of the Black Sea and surrounding region* (ed. by A.G. Robinson). American Association of Petroleum Geologists (AAPG), AAPG Memoir. 1997,68:227–240.
  10. Spadini G., Robinson A., Cloetingh S. Western versus Eastern Black Sea tectonic evolution: Pre-rift lithospheric controls on basin formation. *Tectonophysics*. 1996,266(1–4):139–154. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00187-4](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00187-4)
  11. Mironov A.P., Milyukov V.K., Steblov G.M. [Modern movements of the Northern Caucasus and Crimea based on GPS observations]. In: *Chetvertaya tektonofizicheskaya konferentsiya v IFZ RAN. Tectonophysics and current issues of Earth sciences: Materialy dokladov*, 2016, 1, p. 168–170. (In Russ.).
  12. Gobarenko V.S., Murovskaya A.V., Yegorova T.P., Sheremet E.E. Collision processes at the northern margin of the Black Sea. *Geotectonics*. 2016, 50(4):407–424. <https://doi.org/10.1134/S0016852116040026>
  13. Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E., Bondar' M.N. [Spectral and focal parameters of the 2022 Crimean earthquakes]. *Uchenyye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2023,9(4):139–156. (In Russ.).
  14. Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A. Tectonophysical zoning of active fault in the Altai-Western Sayan region: Identification of locations for preparation of strong earthquakes. *Geotectonics*. 2025,59(6):518–546 <https://doi.org/10.1134/S0016852125700402>
  15. Rebetskiy Yu.L. [Current state of earthquake prediction theories. Results of the estimation of natural stresses and a new earthquake source model]. In: *Problemy tektonofiziki: K sorokaletiyu sozdaniya M.V. Gzovskim laboratorii tektonofiziki v IFZ RAN*. Moscow: IFZ RAN, 2008, p. 359–395. (In Russ.).
  16. Pevnev A.K. Earthquake forecasting is possible (On the place of geodetic research in solving the problem of earthquake forecasting). Pt 1. Grigory A. Gamburtsev and possibility of earthquake prediction. *Prostranstvo i Vremya = Space and Time*. 2015,4(22):195–201. (In Russ.).
  17. Pevnev A.K. Earthquake forecasting is possible: (On the place of geodetic research in solving the problem of earthquake forecasting). Pt 2. Back to Grigory A. Gamburtsev's theory: Deformation model for preparation of crustal earthquake source. *Prostranstvo i Vremya = Space and Time*. 2016,1-2(23-24):227–238. (In Russ.). URL: [https://space-time.ru/space-time/article/view/2226-7271prov\\_rstl\\_2-23\\_24.2016.91](https://space-time.ru/space-time/article/view/2226-7271prov_rstl_2-23_24.2016.91) (accessed 02.02.2026).
  18. Panteleev I.A., Naimark O.B. Modern trends in mechanics of tectonic earthquakes. *Perm Federal Research Center J.* 2014,3:44–62. (In Russ.). EDN: TDURFP
  19. Pustovitenko B.G., Panteleyeva T.A. [Spectral and focal parameters of the Crimean earthquakes]. Kyiv: Naukova dumka, 1990, 249 p. (In Russ.).
  20. Pustovitenko B.G., Pustovitenko A.A., Kapitanova S.A., Porechnova E.I. [Spatial features of source parameters of the Crimean earthquakes]. *Seysmichnost' Severnoy Yevrazii: Materialy Mezhdunar. konf. Obninsk: GS RAN*, 2008, p. 238–242. (In Russ.).
  21. Pustovitenko B.G., Merzhey E.A., Pustovitenko A.A. [Dynamic parameters of the earthquake source in Crimea based on the data from digital seismic stations]. *Geofizicheskiy zhurnal*. 2013,35(5):172–186. (In Russ.).
  22. Pustovitenko B.G. [Refined source parameters of the 1990 Crimean earthquakes]. *Uchenyye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Seriya Geografiya*. 2014,27(2):169–178. (In Russ.).
  23. Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake. *Journal Geophysical Research*. 1970,75(26):4997–5009. <https://doi.org/10.1029/jb075i026p04997>
  24. Brune J.N. Corrections [to “Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes”]. *Journal of Geophysical Research*. 1971,76(5002). <http://dx.doi.org/10.1029/JB076i020p05002>
  25. Aptekman Zh.Ya., Belavina Yu.F., Zakharova A.I., Zobin V.M., Kogan S.Ya., Korchagina O.A., Moskvina A.G., Polikarpova L.A., Chepkunas L.S. [P-wave spectra in the problem concerning determination of dynamic parameters of earthquake focuses: transition from station-obtained spectrum to the focal one and the calculation of dynamic focal parameters]. *Volcanology and Seismology*. 1989,2: 66–79. (In Russ.).
  26. Kostrov B.V. [Focal mechanics of a tectonic earthquake]. Moscow: Nauka, 1975. (In Russ.).

27. Hanks T.C., Kanamori H. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*. 1979,84(35):2348–2350. <https://doi.org/10.1029/jb084ib05p02348>
28. Pustovitenko B.G., Kalinyuk I.V., Merzhey E.A. [Dynamic parameters of earthquake sources in the Crimean-Black Sea region]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii = Earthquakes in Northern Eurasia*. 2016,19(2010):296–304. (In Russ.).
29. Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E. [Spectral and source parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii = Earthquakes in Northern Eurasia*. 2020,23(2014):250–262. (In Russ.).
30. Pustovitenko B.G., Kulchitsky V.E., Goryachun A.V. [Earthquakes of the Crimean-Black Sea region (instrumental observation period 1927–1986)]. Kyiv: Naukova Dumka, 1989. (In Russ.).
31. Bachmanov D.M., Kozhurin A.I., Trifonov V.G. The active faults of Eurasia database. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017,8(4):711–736. (In Russ.). [doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0314](https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0314)
32. Pustovitenko B.G., Kul'chitskiy V.E., Sukhoruchenko S.K., Klyanchin A.I. [Organization and first results of seismic observations in the northwestern part of Crimea (1972–2020)]. *Uchenyye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2020,6(4):144–169. (In Russ.).
33. Sycheva N.A., Bogomolov L.M. Distribution of reduced seismic energy and stress drop in the Altai-Sayan seismoactive region. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2025,16(4):0835. (In Russ.). [doi:10.5800/GT-2025-16-4-0835](https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-4-0835)
34. Yunga S.L. [Methods and results of studying seismotectonic deformations]. Moscow: Nauka, 1990. (In Russ.).
35. Riznichenko Yu.V. [*Problems of seismology*]. Moscow: Nauka, 1985. ([Selected works]). (In Russ.).
36. Yunga S.L. *Study of surface movements and deformations of the Earth's crust on the territory of the Central Tien Shan, the Kazakh platform and Altai; creation of seismological data processing programs, processing*: Research report. Obninsk, 2002. (In Russ.).
37. Lukk A.A., Yunga S.L. Seismotectonic deformation of the Garm region. *Izv. AN SSSR, Fizika Zemli*. 1979,10:24–43. (In Russ.).
38. Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G., Kendall A.D. Origins and methodology of the russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales. *Seismological Research Letters*. 2007,78(6):579–590. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.6.579>
39. Magnus YA.R., Katyshev P.K., Peresetskiy A.A. [*Econometrics. A beginner's course*. 6th ed., rev. and suppl.]. Moscow: Delo, 2004. (In Russ.).
40. Puzyrev N.N. [*Methods and objects of seismic research*]. Novosibirsk: SO RAN Publ.: NITsOIGGM, 1997. (In Russ.).
41. Gibowicz S.J., Kijko A. *An introduction to mining seismology*. San Diego: Academic Press, 1994. (International Geophysics). <https://doi.org/10.1016/c2009-0-02348-4>
42. Nikonov A.A. [Tsunami on the shores of the Black and Azov Seas]. *Fizika Zemli*. 1997,1:86–96. (In Russ.).
43. Rebetsky Yu.L. *Tectonic stresses and strength of rock massifs*. Moscow: Akademkniga, 2007. (In Russ.).

## Об авторе

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

Поступила 03.10.2025

Принята к публикации 20.01.2026

## About the Author

Sycheva, Nailya A., Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, [nelya@ifz.ru](mailto:nelya@ifz.ru). <https://orcid.org/0000-0003-0386-3752>

Received 3 October 2025

Accepted 20 January 2026



## Сейсмическая активизация в районе северо-восточного побережья острова Хонсю (ноябрь–декабрь 2025 г.) и ее возможная связь с геодеформационными процессами на о. Шикотан (Малая Курильская гряда)

А. С. Закупин<sup>1,2</sup>, Д. В. Костылев<sup>1,2</sup>, Н. В. Костылева<sup>1</sup>, С. А. Борняков<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Сахалинский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Южно-Сахалинск, Россия

<sup>3</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

**Резюме.** В ноябре–декабре 2025 г. в районе северо-восточного побережья о. Хонсю наблюдались два очага сильной сейсмической активизации. Первый локализовался в районе Японского желоба, второй – там же, но ближе к границе Японского и Курило-Камчатского желобов. Крупнейшим событием за это время стало землетрясение Аомори 8 декабря 2025 г.  $M = 7.6$ . Сейсмический процесс в зоне субдукции – это прежде всего следствие движения тектонических плит, вызывающего избыточные нагрузки в местах их коллизии, а потому возможна связь между сейсмической активностью и деформационными процессами в районе Южных Курильских островов, которые находятся на расстоянии около 400 км от указанного района. Для проверки этого предположения выполнен анализ результатов измерений деформаций горных пород в период с августа по декабрь 2025 г. на о. Шикотан (Малая Курильская гряда). Измерения проводились деформографами, установленными в подземном павильоне (штольне) сейсмической станции «Шикотан» Сахалинского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН». Анализ данных за 5 мес. измерений показал два характерных периода в деформационном процессе. Первый начался после сильного афтершока (18 сентября 2025 г.  $M = 7.8$ ) в зоне Камчатского землетрясения 29(30) июля 2025  $M = 8.8$  и характеризовался сменой знака на противоположный и высокой скоростью деформации. Второй период, начавшийся в ноябре 2025 г., связан с нулевыми скоростями деформации. Данный период совпал с двумя мощнейшими проявлениями сейсмической активизации в районе Японского желоба восточнее о. Хонсю, причем с характерной миграцией в северном направлении в сторону коллизионной зоны Хидака. Также подтверждены ранее полученные результаты о влиянии (в виде импульсных вариаций) на деформации пород в штольне сильных атмосферных циклонов.

**Ключевые слова:** сейсмическая активизация, геодеформационный процесс, деформограф, импульсные вариации, скорость деформации

## Seismic activation on the northeastern coast of Honshu Island (November–December 2025) and its possible connection with geodeformation processes on Shikotan Island (the Lesser Kuril Ridge)

Alexander S. Zakupin<sup>1,2</sup>, Dmitry V. Kostylev<sup>1,2</sup>, Natalya V. Kostyleva<sup>1</sup>, Sergey A. Bornyakov<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Sakhalin Branch of Geophysical Survey of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

<sup>3</sup> Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

**Abstract.** Two major seismic activations were observed on the northeastern coast of Honshu Island in November–December 2025. The first activation was localized in the area of the Japan Trench, and the second was located in the same area but closer to the border between the Japan and Kuril-Kamchatka Trenches. The largest event during this time

was the Aomori earthquake on December 8, 2025 with  $M = 7.6$ . The seismic process in the subduction zone is primarily a consequence of the movement of tectonic plates, which causes excessive stress load at the sites of their collision. Therefore, these activations may be related to the deformation processes in the area of the Southern Kuril Islands, which are located about 400 km away. This paper presents the results of rock deformation measurements from August to December 2025 on Shikotan Island (the Lesser Kuril Ridge). Measurements were conducted using strainmeters installed in the underground pavilion (adit) of the Shikotan seismic station of the Sakhalin Branch of the GS RAS. Analysis of the data collected over five months of measurements revealed two characteristic periods in the deformation process. The first one began after a strong aftershock (September 18, 2025,  $M = 7.8$ ) in the area of the Kamchatka earthquake on July 29(30), 2025,  $M = 8.8$ , and is associated with a change of sign and a high rate of deformation. The second period began in November 2025 and was associated with zero deformation rates. This period coincided with two powerful seismic activations in the Japan Trench area east of Honshu Island, with a characteristic northward migration toward the Hidaka collision zone. Previously obtained results on the influence of strong atmospheric cyclones (in the form of pulse variations) on rock deformation in the adit were also confirmed.

**Keywords:** seismic activation, geodeformational process, strainmeter, impulse variations, strain rate

### Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования РФ (в рамках государственного задания ИМГиГ ДВО РАН № 075-00604-25) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

**Для цитирования:** Закупин А.С., Костылев Д.В., Костылева Н.В., Борняков С.А. Сейсмическая активизация в районе северо-восточного побережья острова Хонсю (ноябрь–декабрь 2025 г.) и ее возможная связь с геодеформационными процессами на о. Шикотан (Малая Курильская гряда). *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 1, с. 23–32. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.1.023-032>; <https://www.elibrary.ru/aaamho>

### Funding

The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (out within the framework of the state task of IMGG FEB RAS No. 075-00604-25), using the data obtained from a unique research facility “Seismic infrasound array for monitoring Arctic cryolithozone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, neighbouring territories and the world” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>; <http://www.gsras.ru/unu/>).

**For citation:** Zakupin A.S., Kostylev D.V., Kostyleva N.V., Bornyakov S.A. Seismic activation on the northeastern coast of Honshu Island (November–December 2025) and its possible connection with geodeformation processes on Shikotan Island (the Lesser Kuril Ridge). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 1, p. 23–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.1.023-032>; <https://www.elibrary.ru/aaamho>

## Введение

Сахалинская область, и в частности Курильские острова, является одним из самых сейсмически активных регионов России. Курильские острова входят в состав Тихоокеанского сейсмического пояса и характеризуются большой контрастностью и интенсивностью тектонических движений, высоким уровнем сейсмичности и активным вулканизмом.

В 2024 г. на о. Шикотан, крупнейшем острове Малой Курильской гряды, были начаты непрерывные деформационные измерения в подземном павильоне (штольне) сейсмической станции «Шикотан» Сахалинского

филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН). Штольня расположена на отметке 35 м над уровнем моря в сопке высотой 57 м и пройдена без применения взрывных технологий. Измерения деформаций горных пород по авторскому методу С.А. Борнякова и Д.В. Салко [1] реализованы на современном аппаратном и программном уровне, а данные измерений передаются напрямую в центр обработки в г. Южно-Сахалинск. Формат данных позволяет проводить оперативную обработку в любом современном математическом пакете.

После создания в 1965 г. подземного павильона регистрация там велась с помощью

наклономеров системы А.Е. Островского [2] и кварцевого деформографа\*. При этом до 1976 г. обработка записей наклономеров и деформографов практически не проводилась, за исключением наблюдений в период 1967–1970 гг. [3]. Авторами работы [3] были получены интересные результаты о резком изменении хода наклонов примерно за два месяца перед цунамигенным землетрясением 11 августа 1969 г. ( $M = 8.25$ , интенсивность 7-8 баллов в с. Малокурильское) и за один месяц перед землетрясением 27 февраля 1970 г. (интенсивность сотрясений в с. Малокурильское 5 баллов). Величина изменения наклона по составляющей север–юг перед рассмотренными землетрясениями находилась в пределах 2.5". После землетрясения во всех упомянутых случаях направление хода наклонов не менялось в течение довольно длительного времени – от одного до трех месяцев. Было сделано предположение, что крылья разлома после высвобождения энергии, выразившегося в землетрясении, продолжают по инерции движение в том же направлении, что и до землетрясения. К сожалению, нам не удалось найти информацию о результатах наблюдений деформационных процессов на Геофизической обсерватории (ГФО) «Шикотан» за 1980-е годы, а в 1995 г., в связи с отсутствием необходимого финансирования и после разрушительного Шикотанского землетрясения 4 октября 1994 г., когда наземные сооружения ГФО «Шикотан» получили значительные повреждения, сейсмическая станция «Шикотан» была законсервирована, а далее, с 1 января 1997 г., официально закрыта.

Нами первые результаты деформационных измерений были получены в период с октября 2024 по июль 2025 г. [4]. И в поперечной, и в продольной компонентах деформаций были выделены компоненты приливных волн.

Важным результатом в работе [4] было выделение изменений на кривой хода продольной деформации, которая, как отмечено ее авторами, более информативна, чем поперечная, в силу ее меньшей чувствительности к метеорологи-

ческим факторам (циклонам). Смена скорости хода деформации происходила дважды, и если в первый раз она могла быть связана с близкими ощутимыми землетрясениями (март 2025 г.), то во второй раз кривой с вдвое увеличившейся скоростью деформации соответствует период сейсмического роя (с 19 по 28 июня 2025 г.), с окончанием которого скорость хода деформации также перешла к уменьшению. Помимо этого, в работе [4] за исследованный период выделены шесть импульсных вариаций без смены тренда (длительностью до 10 дней в данных продольной компоненты), которые с большой вероятностью отражают прохождение циклонов. По данным поперечной компоненты, ввиду ее высокой чувствительности к циклонической активности, возбуждение вместо 10 дней сохраняется в течение нескольких недель.

В моменты сильных удаленных землетрясений (20 и 30 июля 2025 г. к востоку от п-ова Камчатка) в данных по обеим компонентам наблюдался очень короткий высокоамплитудный знакопеременный импульс. Одним из самых интересных результатов можно назвать резкие ускорения и замедления хода деформации на графике продольной компоненты в период с 9 по 30 июля 2025 г., что нехарактерно для ранее изученного тренда и, возможно, связано с подготовкой сильных землетрясений 20 и 30 июля 2025 г. вблизи п-ова Камчатка [4].

Для проверки этого предположения необходимо провести наблюдение развития деформационного процесса в штольне и после камчатского землетрясения 29(30).07.2025 г. Релаксационный процесс в зоне субдукции Курило-Камчатской дуги, предположительно, займет несколько лет, однако актуальность выбора – какой именно период будет информативен после события, определяется прежде всего реальной локальной геодинамической обстановкой.

С 9 ноября значительная активизация сейсмичности отмечается на восточном побережье Японии. Сильнейшим за это время стало землетрясение (получившее название Аомори) 8 декабря 2025 г.,  $M = 7.6^{**}$ . Очаги активизации

\* Каталог геофизической аппаратуры: Информ. справочник. Вып. 4. М.: Наука: 1981, с. 146–148.

\*\* <http://mseism.gsras.ru/EqInfo/RequestsHandler?cmd=toinfmsg&lang=ru&imid=314>

находятся в непосредственной близости от пункта регистрации деформаций в штольне на о. Шикотан, и есть вероятность, что сейсмические процессы могли отразиться в данных измерений.

Работа посвящена анализу измерений, проведенных с 12 августа по 11 декабря 2025 г., в период сейсмической активизации в районе Южных Курильских островов и вблизи о. Хонсю, и выявлению возможных взаимосвязей сейсмических и деформационных процессов.

## Методика

В рамках договора между Институтом земной коры Сибирского отделения РАН (ИЗК СО РАН) и СФ ФИЦ ЕГС РАН в подземном павильоне (штольне) на о. Шикотан было установлено и введено в эксплуатацию (в ноябре 2024 г.) оборудование деформационного мониторинга. Методика измерений базируется на данных, получаемых Инструментальным комплексом (ИК), самостоятельно разработанным нашими коллегами из ИЗК СО РАН [1]. ИК состоит из штанговых датчиков, каждый из которых включает в себя штангу длиной

24 м, изготовленную из квадратных металлических труб размером  $25 \times 25$  мм, и аналоговый тензодатчик (рис. 1 в). Один конец штанги неподвижно закрепляется на бетонном основании (тумба 3 на рис. 1 в), а второй, соединенный с тензодатчиком, зафиксирован на тумбе 4 (рис. 1 в). Свободному перемещению штанги, не допуская ее деформационного прогиба, способствуют подвижные опоры 5 (рис. 1 в). Сами же бетонные тумбы отстоят друг от друга на расстоянии 3 м и являются основным конструктивным элементом ИК. Штанговые датчики ИК расположены во взаимно перпендикулярных выработках штольни, ориентированных под углами  $35^\circ$  и  $55^\circ$  к простиранию зоны субдукции, что показано на рис. 1 а и б.

ИК включает в себя прибор сбора и передачи данных (ПСПД), аналого-цифровые преобразователи (АЦП), аналоговые датчики, систему автономного питания, базовый сервер, а также серверную и клиентскую программы управления. Ключевой задачей ИК, помимо собственно измерений и записи данных во внутреннюю флэш-память, является их последующая передача на удаленный базовый сервер в режиме реального времени по каналу связи компании «Мегафон». В ПСПД использована шина RS485, позволяющая

одновременно подключить до 32 АЦП, само же число используемых датчиков определяется количеством каналов АЦП. В качестве измерителя применяются тензодатчики балочного типа, тарированные на линейные деформации. Датчики опрашиваются АЦП каждые 10 секунд с дискретностью 8 Гц, накапливая значения. Накопленные значения усредняются и передаются сначала на ПСПД, а далее на базу данных на сервер в ИЗК СО РАН.

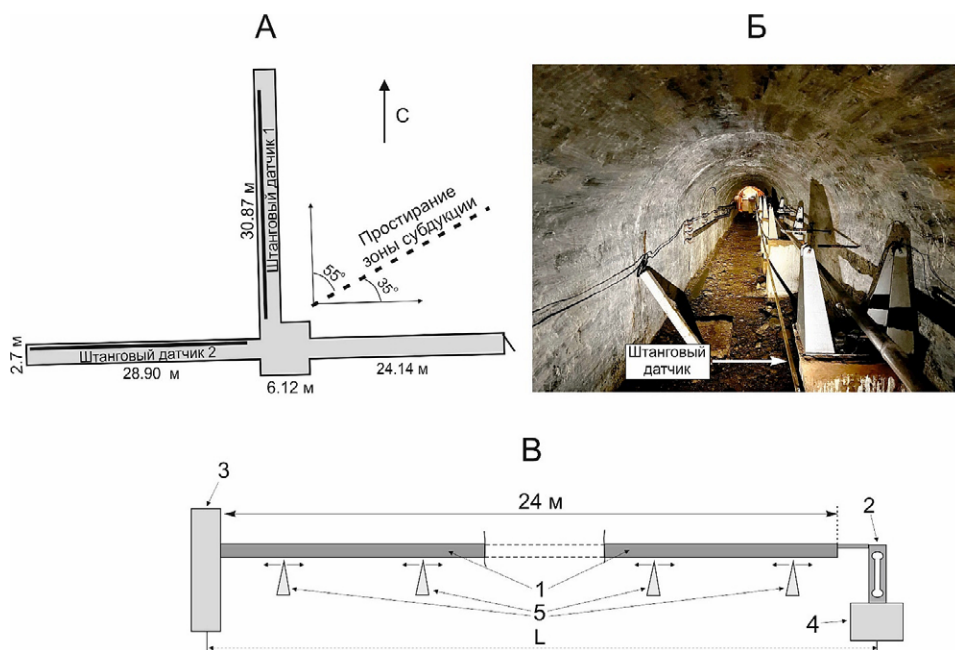


Рис. 1. Контурная схема штольни (а), внешний вид одного из ее рабочих ходов (б) и устройство размещенных в ней штанговых датчиков (в) [4].

Fig. 1. Plan of the adit (a), outlook of one of its working sections (б), and arrangement of rod sensors placed in it (в) [4].

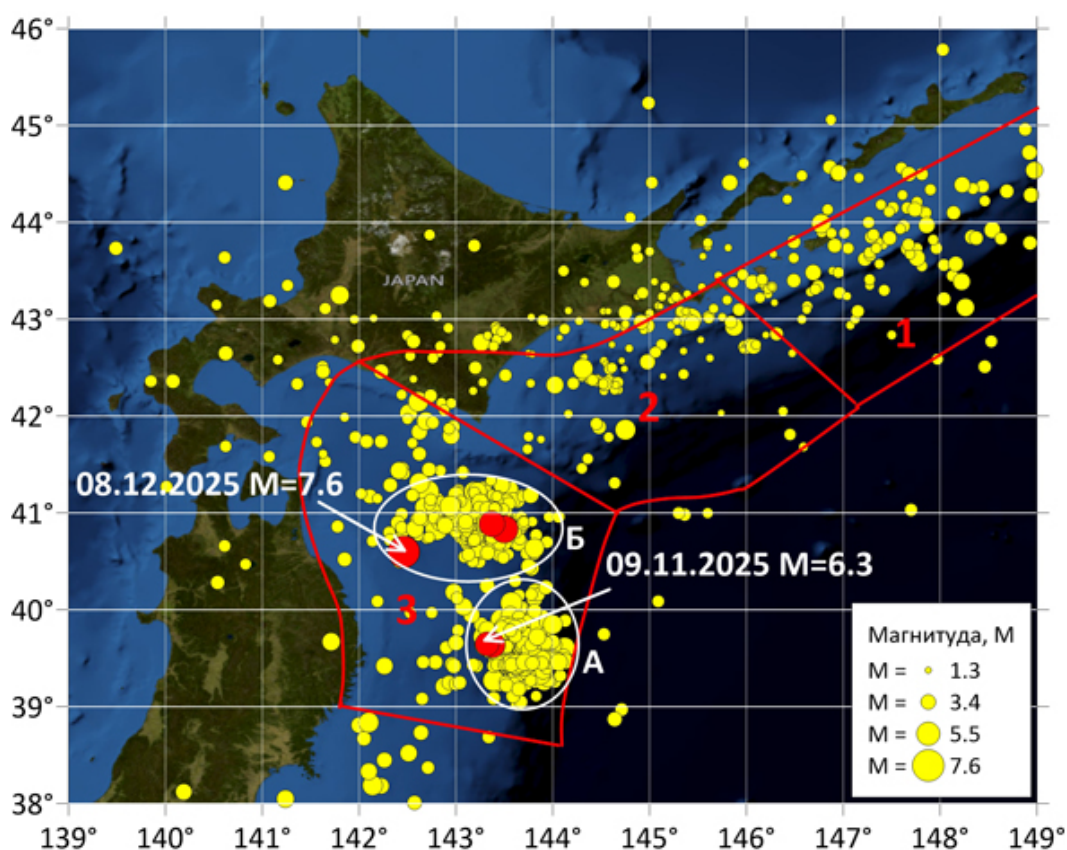
## Результаты наблюдений

Сейсмической сетью СФ ФИЦ ЕГС РАН, включающей сеть широкополосных станций на Дальнем Востоке России [5], с учетом привлечения данных сети короткопериодных станций Хоккайдского университета, расположенных на о. Хоккайдо [6], с 1 ноября по 15 декабря 2025 г. зарегистрирована сейсмическая активизация в районе сочленения Японского и Курильского желобов (рис. 2).

Распределение числа сейсмических событий по времени (датам) показано на рис. 3. Там же построен график распределения максимальных зарегистрированных в течение суток магнитуд. Из рис. 3 видно, что активизация на участке А (рис. 2) началась 8 ноября 2025 г. (37 событий с максимальной магнитудой  $M = 5.3$ ), достигла максимальной интенсивности 9 ноября (85 событий с максимальной магнитудой  $M = 6.3$ ) и начиная с 14 ноября пошла на спад, хотя отдельные землетрясения продолжались и в первой половине декабря (рис. 3). Всего на участке А зафиксировано 344 события.

С 8 декабря 2025 г. (землетрясение Аомори  $M = 7.6^*$ ) начинается сейсмическая активизация в районе Б. Землетрясение Аомори стало одним из сильнейших в регионе в 2025 г. По данным ТАСС\*\*, в результате землетрясения по меньшей мере 30 чел. получили травмы различной степени тяжести. Для восточного

С 8 декабря 2025 г. (землетрясение Аомори  $M = 7.6^*$ ) начинается сейсмическая активизация в районе Б. Землетрясение Аомори стало одним из сильнейших в регионе в 2025 г. По данным ТАСС\*\*, в результате землетрясения по меньшей мере 30 чел. получили травмы различной степени тяжести. Для восточного



**Рис. 2.** Район сочленения Курильского и Японского желобов, включающий в себя три зоны: 1 – Курильский желоб, побережье Южно-Курильских островов; 2 – сочленение Курильского и Японского желобов, побережье Токачи–Немуру; 3 – Японский желоб, побережье Санрику–Хидака. Овалами выделены участки сейсмической активизации А и Б. Желтыми маркерами указаны землетрясения с  $M \geq 1.3$ , красными – землетрясения с  $M \geq 6.0$ .

**Fig. 2.** The area of the junction of the Kuril and Japan Trenches, which includes three zones: 1, the Kuril Trench, the coast of the South Kuril Islands; 2, the junction of the Kuril and Japan trenches, the coast of Tokachi–Nemuro; 3, the Japan Trench, the coast of Sanriku–Hidaka. The areas of seismic activations A and B are highlighted with ovals. Earthquakes with  $M \geq 1.3$  are indicated in yellow, and earthquakes with  $M \geq 6.0$  are indicated in red.

\* <http://mseism.gsras.ru/EqInfo/RequestsHandler?cmd=toinfmsg&lang=ru&imid=314>

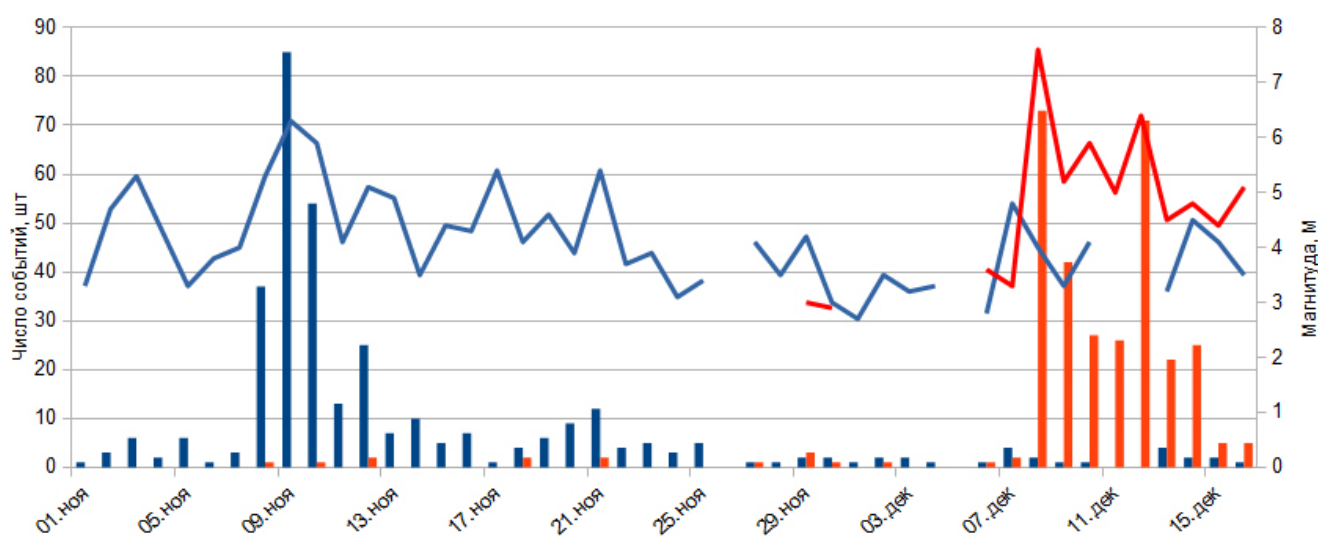
\*\* <https://tass.ru/proisshestviya/25850823>

и северо-восточного побережья Японии была объявлена угроза цунами. Землетрясение вызвало перебои в работе железнодорожного транспорта на востоке и северо-востоке страны, временно останавливалось движение скоростных поездов «Синкансэн». По данным СФ ФИЦ ЕГС РАН, на территории России землетрясение ощущалось в населенных пунктах на островах Кунашир и Шикотан силой 3-4 балла. Для уточнения параметров воздействия на населенные пункты о. Шикотан (села Малокурильское и Крабовозовское, находящиеся на расстоянии 497 и 490 км от эпицентра землетрясения соответственно) использовались данные инженерно-сейсмометрических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН, установленных на жилых домах указанных населенных пунктов [7]. Сила сотрясения зданий, по этим данным, составила 4.1 балла по шкале МСК-64 [8]. Всего за период с 8 по 15 декабря 2025 г. на участке Б было зарегистрировано 313 сейсмических событий.

В границах зоны Санрику–Хидака (зона 3 на рис. 2) Японского желоба за всю историю сейсмических наблюдений произошло множество землетрясений различной магнитуды, включая сильные, с  $M \geq 7.0$  [9]. В данном регионе соединяются несколько островных дуг, образуя очень сложную тектоническую струк-

туру [10], в связи с чем при сильных землетрясениях в зоне Санрику–Хидака (зона 3, рис. 2) опасность возникновения более сильных событий распространяется на зону Токачи–Немуро (зона 2, рис. 2) и далее до границ зоны 1 на рис. 2 (Курильская впадина) [11]. Активные подводные разломы, начинающиеся в районе юго-западной части Курильской впадины от о. Шикотан, считаются тесно связанными с крупными землетрясениями на границе плит между субдуцирующей Тихоокеанской плитой и континентальным массивом Хоккайдо [12], что делает особо важными материалы, получаемые в результате деформационного мониторинга на о. Шикотан.

Как уже ранее было отмечено в [4], наиболее информативной компонентой в измерениях деформаций является компонента перемещений в направлении север–юг ( $u$ ), поэтому в данной работе мы ограничимся данными ее измерений. Для анализа использованы записи с 12 августа по 15 декабря 2025 г. На рис. 4 представлен график изменения деформации горной породы в штольне с 1 ноября 2024 г., на котором разделены периоды измерений до и после 12 августа (красная линия). Данный график необходим для понимания общей картины и помогает увидеть долговременные тренды.



**Рис. 3.** Распределение во времени числа сейсмических событий (гистограмма) и их максимальных магнитуд (график) в районах сейсмической активизации А (синий цвет) и Б (красный цвет), показанных на рис. 2.

**Fig. 3.** Time distribution of the number of seismic events (histogram) and magnitude (graph) in the areas of seismic activations A (blue) and B (red), shown in Fig. 2.

На рис. 4 до 12 августа 2025 г. хорошо виден главный результат из работы [4]. В первую очередь там отмечалось ускорение деформации перед землетрясением вблизи п-ова Камчатка (несколько этапов: первый с 22 марта, второй с 19 июня и последний с 14 июля 2025 г. [4]). Теперь на основе новых данных его можно дополнить важной деталью – деформация перестала расти уже через 10 дней после землетрясения 29(30).07.2025 г. На рис. 5 показан масштабированный фрагмент из графика на рис. 4, который отражает материал измерений после 12 августа, его рассмотрим далее детально. Как и в нашей работе [4], линейная аппроксимация по методу Linear Fit\* позволила нам выделить участки с постоянной скоростью деформации (как и в [4], получилось три участка), на рис. 5 они отмечены красными линиями. На рис. 5 также указаны характерные точки – смены скорости хода (переход к новому аппроксимированному участку), а также импульсные возмущения, обсуждение которых ниже приведено отдельно.

18 сентября и 8 декабря 2025 г. на графике выделяются знакопеременные импульсы (второй значительно слабее), которые, как и в работе [4], отражают динамическое воздействие на породу в штольне сильных удаленных зем-

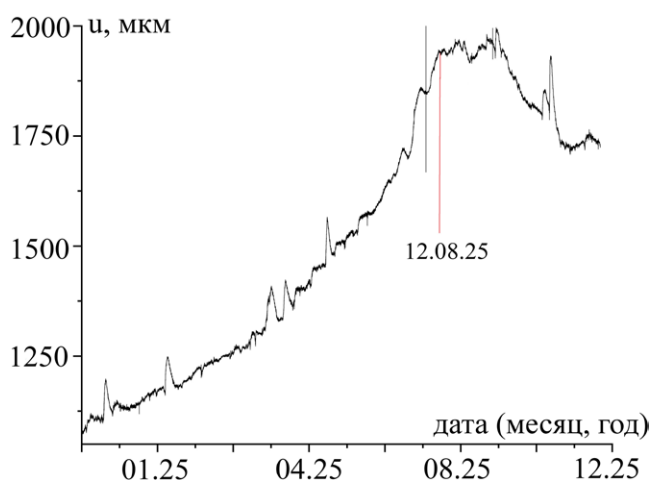


Рис. 4. Изменение деформации горной породы в штольне с ноября 2024 по декабрь 2025 г.

Fig. 4. Variation of rock deformation in the adit from November 2024 to December 2025.

летрясений (афтершок вблизи п-ова Камчатка и землетрясение Аомори).

Точки смены тренда, определяемые как переходы между участками с разной, но постоянной скоростью деформации, выделены 9 августа, 26 сентября и 9 ноября 2025 г.

Практически сразу после самого сильного афтершока Камчатского землетрясения 29(30).07.2025\*\*, который произошел 18.09.2025 г., направление деформационного процесса меняется на противоположное тому, что регистрировалось от начала наблюдений. Наблюдается, можно сказать, цепочка событий: рост скорости деформации – главное событие (землетрясение 29(30).07.2025 г. вблизи п-ова Камчатка) – замедление скорости деформации до нуля – главный афтершок – смена знака деформации и снова высокие скорости.

Замедление и остановка процесса деформирования 09.11.2025 г., очевидно, связаны с началом сейсмической активизации в Японии, причем знакопеременный импульс зарегистрирован и во время землетрясения Аомори. Фактически деформационный процесс развивался с 18 сентября довольно динамично до 9 ноября, далее произошла его полная остановка. Считаем это подтверждением гипотезы

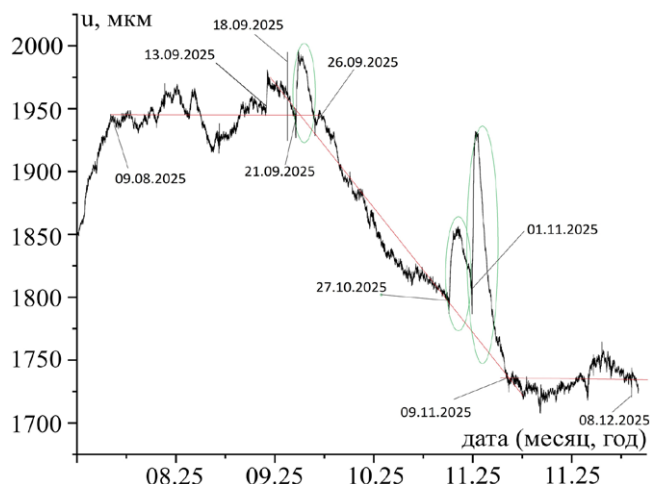


Рис. 5. Изменение деформации горной породы в штольне с 01.08.2025 по 11.12.2025 г. Красными линиями отмечены участки с постоянной скоростью деформации.

Fig. 5. Variation of rock deformation in the adit from August 1, 2025 to December, 11, 2025. Red lines indicate sections with a constant deformation rate.

\* Origin Pro, Version 2021. OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA. URL: [https://www.bioz.com/search?q=originpro&other=true&exact\\_search=true&rating\\_sort=true](https://www.bioz.com/search?q=originpro&other=true&exact_search=true&rating_sort=true)

\*\* <http://mseism.gsr.ru/EqInfo/RequestsHandler?cmd=toinfmsg&imid=306>

о возможной связи процесса деформирования в районе о. Шикотан и сейсмической активности в Японии.

В завершение отметим три импульсные вариации в исследованный период (см. рис. 5, отмечены эллипсами), о которых следует сказать отдельно. Эти вариации с удивительной точностью коррелируют с сильнейшими штормами в районе о. Шикотан, что подтверждает результаты работы [4] о связи 6 импульсных вариаций с метеорологическими условиями.

В начале третьей декады сентября (21.09.2025 г.) к Южным Курильским островам приблизился циклон с давлением в центре 994 гПа. Он двигался вдоль гряды со стороны Тихого океана со скоростью 30 км/ч. 22 сентября, вблизи Северных Курильских островов, циклон усилился до 990 гПа. Над южной частью моря наблюдалось усиление ветра до 20–25 м/с, волнение моря достигло 3–4 м. В дальнейшем циклон отошел на восток, но над морем до 23 сентября сохранялись ветры северной четверти со скоростью до 10–15 м/с и с волнением до 2–3 м [13]. Второй эпизод был отмечен 28 октября 2025 г. По сообщению Росгидромета, на Курильских островах наблюдался сильный дождь, на юге гряды ветер достигал ураганных значений 30–35 м/с. 29 октября интенсивность осадков ослабла до небольших и умеренных: на севере они проявились в виде снега, на юге в виде дождя и мокрого снега, а ветер на юге Курильских островов стих до 23–28 м/с\*. Практически сразу же второй волной 1–2 ноября на острова обрушился циклон, который на графике отражают вторая и третья импульсные вариации. По сводкам Гидрометцентра России, 1–2 ноября на Курильских островах наблюдался сильный дождь со штормовым ветром со скоростью 20–25 м/с (в районе Шикотана был очень сильный дождь и штормовой ветер 33–35 м/с)\*. Значит, наше предположение [4], что циклоны отражаются в изменении продольной компоненты именно таким образом (характерная форма роста и спада – импульсная вариация), подтвердилось с высокой степенью достоверности. При дальнейшем ана-

лизе это даст экономию времени, которое не нужно будет тратить на выяснение источника таких возмущений.

## Заключение

Анализ данных геодеформационного мониторинга в штольне на о. Шикотан с 12 августа по 15 декабря 2025 г. позволил выявить некоторые особенности деформационного процесса в связи с проявлениями сейсмической активизации в районе сочленения Японского и Курильского желобов. Наблюдался резкий рост скорости деформации перед землетрясением 29(30) июля  $M = 8.8$  вблизи п-ова Камчатка, падение ее к 9 августа до нулевых значений, а через неделю после сильного афтершока 18 сентября  $M = 7.8$  знак деформации сменился, и до 9 ноября 2025 г. с высокой скоростью она развивалась в обратном направлении. Далее опять произошел спад скорости деформации до нулевых значений. Это совпало во времени с началом сильной активизации сейсмичности в Японии 9 ноября.

Зафиксирован также знакопеременный импульс как результат динамического воздействия на штольню сильного удаленного землетрясения Аомори 8 декабря 2025 г. ( $M = 7.6$ ), начавшего второй период сейсмической активизации в Японии.

На основе данных деформационных измерений в штольне в августе–декабре 2025 г. авторами найдено подтверждение ранее выявленных форм реакции деформографа на воздействие циклонов. Таким образом, в дополнение к опубликованным ранее результатам, которые показывали связь деформации с сейсмическим событием в районе Камчатки, в настоящей работе представлены данные, доказывающие тот факт, что деформации горных пород в штольне на о. Шикотан не только отражают локальные эффекты в ближней зоне (например, сейсмический рой с 19 по 28 июня 2025 г. районе о. Шикотан), но и имеют региональное значение в рамках взаимодействия литосферных плит.

\* <https://meteoinfo.ru/novosti/21567-na-ostrovakh-i-poberezhyakh-dalnego-vostoka-sokhranyaetsya-tsiklonicheskaya-deyatelnost>

## Список литературы

- Салко Д.В., Борняков С.А. Автоматизированная инструментальная система для мониторинга геофизических параметров на геодинамических полигонах. *Приборы*. 2014,168(6):24–28.
- Островский А.Е. (ред.) *Изучение земных приливов: сб. ст. (Результаты МГГ)*. М.: Изд-во АН СССР, 1961, 76 с.
- Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.Н., Соловьев С.Л. Наклономерные наблюдения на о. Шикотан. *Доклады АН СССР*. 1971,200(1):94–96.
- Костылев Д.В., Закупин А.С., Костылева Н.В., Борняков С.А., Салко Д.В., Стовбун Н.С. Деформации горных пород по данным измерений в штольне на о. Шикотан (Малая Курильская гряда) в 2024–2025 гг. *Геодинамика и тектонофизика*. 2025,16(6):0865. <https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-6-0865>
- Костылев Д.В., Гоев А.Г., Костылева Н.В. Сейсмическая сеть южного сегмента Дальневосточной зоны РФ и ее возможности для изучения неоднородностей в верхней мантии. *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*. 2025,5:100–108. <https://doi.org/10.55959/msu0579-9406-4-2025-64-5-100-108>
- Ichiyanagi M., Takahashi H., Mikhaylov V., Kostylev D., Levin Y. Evaluation for hypocenter estimation error in the southwestern Kuril trench using Japan and Russia joint seismic data. *Earth, Planets and Space*. 2020,72(1):86. doi:10.1186/s40623-020-01215-0
- Костылев Д.В., Костылева Н.В. Система инженерно-сейсмометрических наблюдений на Курильских островах в условиях постоянных интенсивных сейсмических воздействий. *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. 2025,6(81):30–37.
- Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. *Международная шкала сейсмической интенсивности MSK-64*. М.: МГК АН СССР, 1965, 11 с.
- Takahashi N., Kodaira S., Tsuru T., Park Jin-Oh, Kaneda Y., Suyehiro K., Kinoshita H., Abe S., Nishino M., Hino R. Seismic structure and seismogenesis off Sanriku region, northeastern Japan. *Geophysical Journal International*. 2004,159(1):129–145. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02350.x>
- Iwasaki T., Sato H., Shinohara M., Ishiyama T., Hashima A. Fundamental structure model of island arcs and subducted plates in and around Japan. In: *2015 Fall Meeting, American Geophysical Union, San Francisco, Dec. 14–18*. 2015, T31B-2878.
- Satake K. Geological and historical evidence of irregular recurrent earthquakes in Japan. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015,373(2053),20140375. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0375>
- Izumi N., Nishizawa A., Horiuchi D., Kido Y., Goto H., Nakata T. 3D bathymetric image of the southwestern part of the Kuril Trench and its vicinity. *Rep. Hydrogr. Oceanogr. Research*. 2017,54:133–155. (In Japan, with Engl. abstr.).
- Мезенцева Л.И., Каптюг В.А. Метеорологические условия. Сентябрь 2025 г. *Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень ДВНИГМИ*. URL: [https://www.ferhri.ru/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul\\_2025/09/2025.09\\_ch1\\_meteo.pdf](https://www.ferhri.ru/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2025/09/2025.09_ch1_meteo.pdf) (дата обращения 19.02.2026).

## References

- Salko D.V., Bornyakov S.A. Automated instrumental system for monitoring geophysical parameters at geodynamic sites. *Pribory*. 2014,168(6):24–28. (In Russ.).
- Ostrovsky A.E. (ed.) *Study of Earth Tides: Collection. (Results of the IGY)*. Moscow: USSR Academy of Sciences Publ., 1961, 76 p. (In Russ.).
- Pustovitenko B.G., Pustovitenko A.N., Soloviev S.L. Tilt-measuring observations on Shikotan Island. *Doklady AN SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*. 1971,200(1):94–96. (In Russ.).
- Kostylev D.V., Zakupin A.S., Kostyleva N.V., Bornyakov S.A., Salko D.V., Stovbun N.S. Rock deformations deduced from adit-based measurements on the Shikotan Island (Lesser Kuril ridge) in 2024–2025. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2025,16(6):0865. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-6-0865>
- Kostylev D.V., Goev A.G., Kostyleva N.V. Seismic network of the southern segment of the Far Eastern zone of Russia and its potential for studying upper mantle heterogeneities. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2025,5:100–108. (In Russ.). <https://doi.org/10.55959/msu0579-9406-4-2025-64-5-100-108>
- Ichiyanagi M., Takahashi H., Mikhaylov V., Kostylev D., Levin Y. Evaluation for hypocenter estimation error in the southwestern Kuril trench using Japan and Russia joint seismic data. *Earth, Planets and Space*. 2020,72(1):86. doi:10.1186/s40623-020-01215-0
- Kostylev D.V., Kostyleva N.V. The system of engineering seismometric observations on the Kuril Islands under conditions of constant intense seismic impacts. *Natural and man-made risks. Safety of Structures*. 2025,6(81):30–37. (In Russ.).
- Medvedev S.V., Sponheuer W., Karnik V. *Seismic Intensity Scale MSK-64*. Moscow, Russia: Interdepartmental Geophysical Commission of the USSR Acad. Sci., 11 p. (In Russ.); Medvedev S., Sponheuer W.,

- Karník V. Neue seismische Skala Intensity scale of earthquakes. In: *7 Tagung der Europäischen Seismologischen Kommission in Jena*. Berlin: Akademie-Verlag, 1964, p. 69–76.
9. Takahashi N., Kodaira S., Tsuru T., Park Jin-Oh, Kaneda Y., Suyehiro K., Kinoshita H., Abe S., Nishino M., Hino R. Seismic structure and seismogenesis off Sanriku region, northeastern Japan. *Geophysical Journal International*. 2004,159(1):129–145. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02350.x>
  10. Iwasaki T., Sato H., Shinohara M., Ishiyama T., Hashima A. Fundamental structure model of island arcs and subducted plates in and around Japan. In: *2015 Fall Meeting, American Geophysical Union, San Francisco, Dec. 14–18*. 2015, T31B-2878.
  11. Satake K. Geological and historical evidence of irregular recurrent earthquakes in Japan. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015,373(2053),20140375. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0375>
  12. Izumi N., Nishizawa A., Horiuchi D., Kido Y., Goto H., Nakata T. 3D bathymetric image of the southwestern part of the Kuril Trench and its vicinity. *Rep. Hydrogr. Oceanogr. Research*. 2017,54:133–155. (In Japan, with Engl. abstr.).
  13. Mezentseva L.I., Kaptyug V.A. Meteorological conditions. September 2025. In: *Monthly hydrometeorological bulletin of DVNIGMI*. Available from: [https://ferhri.ru/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul\\_2025/09/2025.09\\_ch1\\_meteo.pdf](https://ferhri.ru/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2025/09/2025.09_ch1_meteo.pdf) (accessed 19.02.2026).

## Об авторах

✉ **Закупин Александр Сергеевич**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН; заместитель директора по научной работе, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия, [zakupin@imgg.ru](mailto:zakupin@imgg.ru). <https://orcid.org/0000-0003-0593-6417>

**Костылев Дмитрий Викторович**, кандидат технических наук, директор, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»; старший научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, [d.kostylev@imgg.ru](mailto:d.kostylev@imgg.ru). <https://orcid.org/0000-0002-8150-9575>

**Костылева Наталья Владимировна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, [n.kostyleva@imgg.ru](mailto:n.kostyleva@imgg.ru). <https://orcid.org/0000-0002-3126-5138>

**Борняков Сергей Александрович**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия, [bornyak@crust.irk.ru](mailto:bornyak@crust.irk.ru). <https://orcid.org/0000-0002-5119-1092>

## About the Authors

✉ **Zakupin, Alexander S.**, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences; Deputy Director, Sakhalin Branch of the Federal Research Center of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, [zakupin@imgg.ru](mailto:zakupin@imgg.ru). <https://orcid.org/0000-0003-0593-6417>

**Kostylev, Dmitry V.**, Cand. Sci. (Engineering), Director, Sakhalin Branch of the Federal Research Center of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences; Senior Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, [d.kostylev@imgg.ru](mailto:d.kostylev@imgg.ru). <https://orcid.org/0000-0002-8150-9575>

**Kostyleva, Natalya V.**, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, [n.kostyleva@imgg.ru](mailto:n.kostyleva@imgg.ru). <https://orcid.org/0000-0002-3126-5138>

**Bornyakov, Sergey A.**, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia, [bornyak@crust.irk.ru](mailto:bornyak@crust.irk.ru). <https://orcid.org/0000-0002-5119-1092>

Поступила 22.01.2026

Принята к публикации 21.02.2026

Received 22 January 2026

Accepted 21 February 2026



## Реакция растительности обрамления бухты Заря (Японское море) на мультидекадные климатические вариации за последние 5500 лет

Н. Г. Разжигаева<sup>1,2</sup>, Л. А. Ганзей<sup>1</sup>, Л. М. Мохова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>2</sup> Институт географии РАН, Москва, Россия

**Резюме.** На основе данных спорово-пыльцевого анализа озерно-болотных отложений восстановлено развитие растительности на побережье Восточного Приморья, в низкогорье и среднегорье восточного макросклона Сихотэ-Алиня за последние 5500 лет. Временное разрешение реконструкций – 30–88 лет. Выделено 20 фаз развития растительности длительностью от 670 до 120 лет, на фоне которых происходили вариации мультидекадного масштаба. Определенную роль в изменчивости палиноспектров играли условия переноса пыльцы и спор. Короткопериодные гидроклиматические изменения отражены в структуре палиноспектров в изменениях соотношения пыльцы широколиственных и темнохвойных пород, пики которых хорошо согласуются с вариациями солнечной активности. Длительная фаза устойчивого развития кедрово-широколиственных лесов отмечена в конце среднего голоцена (5050–4380 л.н.). Зафиксированы изменения растительности в похолодание ~4200 л.н., сопровождавшееся снижением увлажнения. Распространение кедр корейского происходило, как правило, в более прохладных, влажных условиях, а снижение его участия – в фазы уменьшения увлажнения. Наибольший расцвет кедровников отмечен в похолодание 2820–2640 л.н. Темнохвойные леса получили широкое распространение в начале малого ледникового периода. Роль берез увеличилась в позднем голоцене и современных условиях. Заросли ольхи распространялись на заболоченных берегах озера при уменьшении увлажнения. В переносе спор большую роль играл плоскостной смыв, активизировавшийся в периоды высокой повторяемости тайфунов. Обнаружена аллохтонная пыльца (*Cryptomeria*, *Fagus*), перенесенная в составе биоаэрозолей с удаленных территорий, вероятно с Японских островов. Не исключено, что пыльца *Ephedra* поступала с пыльными бурями с внутренних частей континента. Признаки антропогенного влияния на ландшафты зафиксированы начиная с эпохи бронзы. Наиболее значительные антропогенные изменения лесной растительности происходили в конце XIX – начале XX в. до установления заповедного режима.

**Ключевые слова:** спорово-пыльцевой анализ, голоцен, потепления, похолодания, увлажнение, муссон, плоскостной смыв, антропогенное влияние, Дальний Восток, Восточное Приморье

## Vegetation response in the surrounding area of Zarya Bay (the Sea of Japan) to multidecadal climatic variations over the past 5500 years

Nadezhda G. Razjigaeva<sup>1,2</sup>, Larisa A. Ganzey<sup>1</sup>, Lyudmila M. Mokhova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pacific Geographical Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

<sup>2</sup> Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract.** The development of vegetation on the eastern coast of Primorye in the low and middle mountains of the eastern macro-slope of Sikhote-Alin over the past 5500 years was reconstructed based on the pollen analysis of lacustrine and bog sediments. The temporal resolution of the reconstructions is 30–88 years. Twenty phases of vegetation development, lasting from 670 to 120 years, were identified, amidst which the multidecadal variations took place. The transport of pollen and spores played a certain role in the variability of pollen spectra. Short-term

hydroclimatic changes are reflected in the structure of the pollen spectra as changes in the ratio of broadleaf to dark coniferous pollen, the peaks of which are consistent with solar activity variations. A long phase of stable development of Korean pine-broadleaf forests was noted at the end of the Middle Holocene (5050–4380 yr BP). Vegetation changes were recorded during the 4.2 ka event, characterized by cool climatic conditions and low humidity. Korean pine generally expanded in cooler and more humid conditions, and its presence declined during the periods of low humidity. The biggest distribution of Korean pine forests was recorded during 2820–2640 yr BP cooling. Dark coniferous forests became widespread at the beginning of the Little Ice Age. The role of birch trees increased in the late Holocene and modern conditions. Alder thickets spread along the swampy shores of the lake during decreased humidity. Slopewash, which intensified during the periods of high typhoon frequency, played a significant role in spore transport. Allochthonous pollen (*Cryptomeria*, *Fagus*) transported in bioaerosols from remote areas, possibly from the Japanese Islands, was found. *Ephedra* pollen might have been carried by dust storms from the continental interiors. Signals of anthropogenic influence on the landscape have been noted since the Bronze Age. The most significant human impact to forests occurred in the late 19th and early 20th centuries, before the establishment of a nature reserve.

**Keywords:** pollen analysis, Holocene, warming, cold events, moisture, monsoon, flash wash, human impact, Far East, Eastern Primorye

### Финансирование и благодарности

Исследование выполнено при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024). При подготовке и просмотре проб использовалось оборудование ЦКП ТИГ ДВО РАН.

Авторы выражают благодарность А.О. Горбунову (ИМГиГ ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск), принимавшему участие в полевых работах, и А.И. Мысленкову (Лазовский государственный заповедник) за фотографию озера.

**Для цитирования:** Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Мохова Л.М. Реакция растительности обрамления бухты Заря (Японское море) на мультидекадные климатические вариации за последние 5500 лет. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 1, с. 33–56. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.1.033-056>; <https://www.elibrary.ru/bcixwr>

### Funding and Acknowledgements

The study was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (Agreement No. 075-15-2024-554 dated 24.04.2024). The equipment from the Research Equipment Sharing Center of the Pacific Geographical Institute of FEB RAS was used in preparing and viewing the samples.

The authors thank A.O. Gorbunov (IMGG FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk) for participating in fieldwork and A.I. Myslenkov (Lazovsky Nature Reserve) for providing the photo of the lake.

**For citation:** Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Mikhova L.M. Vegetation response in the surrounding area of Zarya Bay (the Sea of Japan) to multidecadal climatic variations over the past 5500 years. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 1, p. 33–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.1.033-056>; <https://www.elibrary.ru/bcixwr>

## Введение

Существенные климатические изменения в последние десятилетия, проявляющиеся в росте теплообеспеченности и межгодовых колебаниях увлажнения с увеличением повторяемости как экстремумов атмосферных осадков, так и засушливых явлений, ставят вопрос о региональных последствиях климатических рисков и возможной реакции экосистем, прогнозе их изменчивости, уязвимости и адаптации к новым условиям [1]. В этом ключе высокую актуальность приобретают работы по развитию ландшафтов при короткопериодных изменениях климата в голоцене. В последние тысячелетия значимые климатические перестройки происходили в переходной зоне

«континент–океан», характеризовавшейся сложным взаимодействием процессов в системе «океан–атмосфера», которые в Восточной Азии определяли усиление/ослабление муссонной циркуляции и проявление экстремальных гидрологических событий на разных временных рубежах [2–7]. Гидроклиматические характеристики здесь тесно связаны с отрицательными/положительными аномалиями активности циклогенеза, контролирующего осадки и увлажнение на окраине континента [8, 9]. Как и в современных условиях [10–12], большую роль в чередовании теплых/холодных сухих/влажных периодов в голоцене играли такие факторы, как Эль-Ниньо/Южное колебание (ENSO) [13], изменение интенсивности теплых течений системы Курошио [14] и сме-

щение западного струйного течения [15, 16]. Короткопериодные климатические изменения являлись ведущим фактором, определяющим динамику растительности в голоцене [17, 18], реакция которой на разнонаправленные тренды в мультидекадном масштабе на юге Дальнего Востока плохо изучена. В последние годы для отдельных модельных участков появились непрерывные высокоразрешающие палинозаписи и восстановлено развитие растительности в условиях короткопериодных изменений с разными гидроклиматическими характеристиками [19–26]. Для более полной картины развития ландшафтов на юге Дальнего Востока, уточнения хронологии климатических аномалий и их региональной вариабельности в условиях расчлененного рельефа и сильной микроклиматической изменчивости необходимы дополнительные данные по динамике растительности как главного биотического компонента ландшафта.

Целью работы является реконструкция фаз развития растительности побережья бухты Заря и горного обрамления, анализ климатических факторов, влиявших на динамику основных лесообразующих видов и болотную растительность, а также выявление сигналов антропогенного влияния.

### Краткая характеристика района

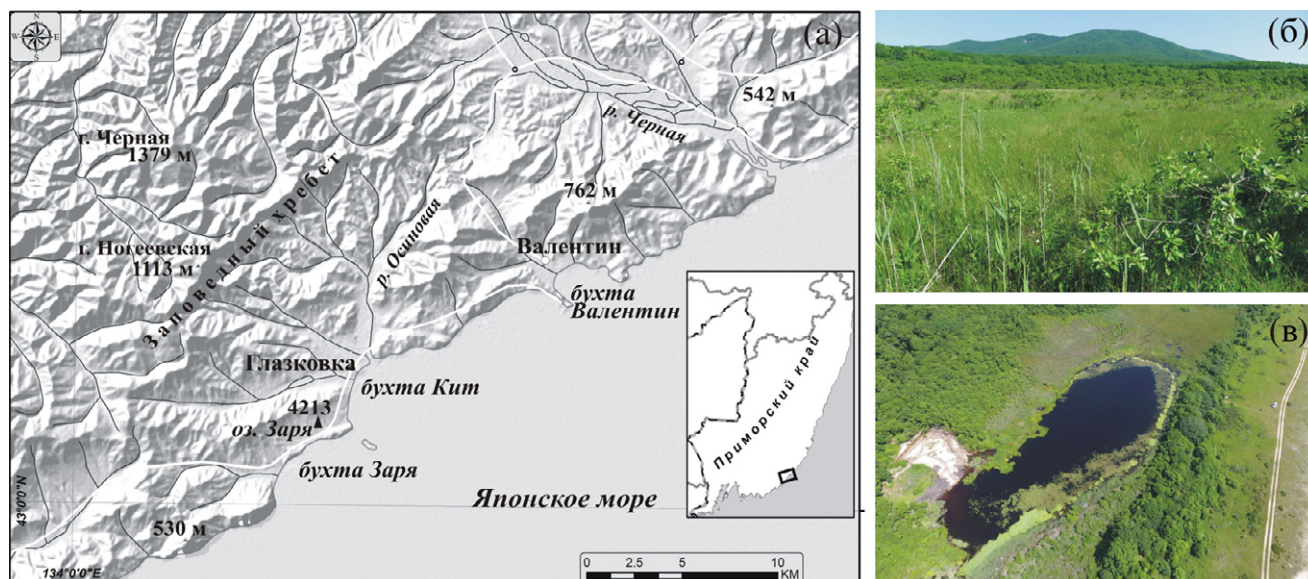
Район исследования входит в состав Лазовского заповедника, второго по величине в Приморском крае после Сихотэ-Алинского. В качестве объекта для реконструкций выбран разрез органогенных отложений на побережье бухты Заря на берегу одноименного озера в 150 м от уреза Японского моря (43°02.094' с.ш.; 134°09.279' в.д.) (рис. 1). Реликтовое озеро имеет размеры 55×160 м, болото образовалось на месте более крупного водоема (480×130 м). Вокруг озера развита сплавина, переходящая в топь с травяно-сфагновыми ассоциациями и редкой ольхой японской (*Alnus japonica*). В разреженном верхнем ярусе встречается багульник шиловидный (*Ledum subulatum*) и кровохлебка тонколистная (*Sanguisorba tenuifolia*).

Из трав доминируют осоки (волосоплодная – *Carex lasiocarpa*, Мейера – *C. meyeriana*, тонкоцветковая – *C. tenuiflora*, ложнокурайская – *C. pseudocuraica*, топяная – *C. limosa*, буроватая – *C. brunnescens*, Шмидта – *C. schmidtii*), встречаются вейники Лангсдорфа и незамечаемый (*Calamagrostis langsdorffii*, *C. neglecta*), лобелия сидячелистная (*Lobelia sessilifolia*), касатик гладкий (*Iris laevigata*), ежеголовник корейский (*Sparganium coreanum*), цикута ядовитая (*Cicuta virosa*), мытник крупноцветковый (*Pedicularis grandiflora*), сабельник болотный (*Comarum palustre*), вахта трехлистная (*Menyanthes trifoliata*), росянка круглолистная (*Drosera rotundifolia*). Местами отмечены пушицы Комарова и рыжеватая (*Eriophorum komarovii*, *E. russeolum*). Краевую часть занимают заросли ольхи японской с тростником южным (*Phragmites australis*) и осокой придатконосной (*Carex appendiculata*). Моховой покров представлен сфагновыми и зелеными мхами. Растительная группировка редкая для юго-восточного Приморья: в состав входят виды, характерные для более северных областей\*. Торфяная залежь, пробуренная в краевой части болота в середине XX в., не имеет горизонтов с обилием древесины или пнями, снизу залегает тростняково-топяной, выше (верхний 1 м) – сфагново-топяной торф [27]. Около озера встречалась голубика, на кочках – шикша сибирская (*Empetrum sibiricum*) [28, 29].

В озере сохранилась крупная популяция бразении Шребера (*Brasenia schreberi*), реликтового вида, который встречается в мелких, хорошо прогреваемых озерах с илистым дном [30, 31]. В сообщество водных растений также входят кувшинка четырехгранная (*Nymphaea tetragona*), рдесты плавающий (*Potamogeton natans*) и курчавый (*P. crispus*), стрелолист плавающий (*Sagittaria natans*), у берегов – белокрыльник болотный (*Calla palustris*), хвостник обыкновенный (*Hippuris vulgaris*), ежеголовник суженнолистный (*Sparganium angustifolium*) и пузырчатка – крупнокорневая и малая (*Urticularia macrorhiza*, *U. minor*)\*\*.

\* Геоботаническое описание растительности Лазовского заповедника. URL: <http://old.lazovzap.ru/pages/geobotan.html>

\*\* <http://old.lazovzap.ru/pages/geobotan.html>



**Рис. 1.** Район исследований. (а) северо-западное побережье Японского моря, с прилегающим горным обрамлением, и положение изученного разреза 4213, на врезке положение бухты Заря; (б) болотный массив, развивающийся на месте палеозера; (в) оз. Заря (фото А.И. Мысленкова).

**Fig. 1.** Study area. (a) NW coast of the Sea of Japan with surrounding mountains and the position of the studied site 4213, the inset shows the geographical position of Zarya Bay; (б) swamp, which developed on the place of the paleolake; (в) Zarya Lake (photo by A.I. Myslenkov).

Озеро окружено вторичными дубняками, образованными дубом монгольским (*Quercus mongolica*), в районе мыса Кит есть небольшой массив липового разнотравного леса. Широколиственные леса развиты до абс. высоты 300 м, выше (до высоты 800–1000 м) склоны заняты кедрово-широколиственными лесами с участками белоберезняков, возникших на горях и образованных березой маньчжурской (*Betula mandshurica*). В древесном ярусе кедрово-широколиственных лесов принимают участие липы амурская, маньчжурская и Таке (*Tilia amurensis*, *T. mandshurica*, *T. taquetii*), ясень маньчжурский (*Fraxinus mandshurica*), березы маньчжурская, даурская и ребристая (*Betula dahurica*, *B. costata*), калопанакс семилопастный (*Kalopanax septemlobus*) и дуб монгольский, в сухих кедровниках – ясень носолистный (*Fraxinus rhynchophylla*); в свежих – изредка встречается бархат амурский (*Phellodendron amurense*), калопанакс семилопастный и пихта белокорая. Пояс елово-пихтовых лесов (*Abies nephrolepis*, *Picea ajanensis*) распространен на высотах от 800 до 1300 м, фрагменты каменноберезняков и стлаников находятся выше 1300 м [28, 32].

Климат определяется муссонной циркуляцией атмосферы с преобладанием в зимний период сухих воздушных масс с материка и поступлением летом влажных воздушных масс с моря на сушу [8]. По данным метеостанции Преображение, расположенной в 25 км к юго-западу, температура (°C) среднегодовая +5.4°, средняя января –8.5°, средняя августа +19.3°. Максимум температур до +33.6° зарегистрирован в августе 1951 г., минимум –27.4° – в декабре 1937 г. Безморозный период составляет 174 дня. При годовом объеме атмосферных осадков в 758 мм наибольшее их количество выпадает в летний период (август – 131 мм). Относительная влажность воздуха варьирует от 44 до 89 %. Преобладают северные ветра (27 %), средняя годовая скорость 3.3 м/с\*. Влияние на погоду оказывает холодное Приморское течение, с ним связаны туманы и морось в первой половине лета.

## Материалы и методы

Общая мощность вскрытых органогенных отложений составляет 5 м. Основание разре-

\* Приморское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. <https://www.primgidromet.ru>

за (400–500 см) сложено темно-коричневой с оливковым оттенком минерализованной гиттией с тонкими прослоями диатомитов. Выше залегает торф, в нижней части минерализованный. Опробован каждый 5-сантиметровый интервал (далее – инт.).

Спорово-пыльцевой анализ выполнен по стандартной методике [33], с применением тяжелой жидкости  $H_2O:CdI_2:KI$  2.2 г/см<sup>3</sup> без ацетолита. Подсчет таксонов проводился для трех групп: пыльцы древесных (AP), пыльцы трав и кустарничков (NAP) и спор. Диаграмма построена с помощью программы Tilia v. 2.0.41, выделение палинозон сделано согласно результатам кластерного анализа CONISS [34].

При интерпретации полученных данных определение источника пыльцы основных лесообразующих пород в случае одного варианта проведено до вида: дуб монгольский (*Quercus mongolica*), орех маньчжурский (*Juglans mandshurica*), граб сердцевидный (*Carpinus cordata*), бархат амурский (*Phellodendron amurense*), пихта белокорая (*Abies nephrolepis*). Пыльца *Picea* sect. *Omorica* принадлежала ели аянской (*P. ajanensis*), а *Picea* sect. *Euripicea* – ели корейской (*P. koraiensis*). Предполагается, что источником пыльцы *Pinus* s/g *Haploxylon* был кедр корейский (*Pinus koraiensis*), распространенный в низко- и среднегорье, пояс кедрового стланика (*P. pumila*) занимает верхние уровни рельефа, удаленные от побережья. Пыльца *Betula* sect. *Fruticosae* принадлежала березе овальнолистной (*Betula fruticosa*).

Для определения границ ареалов растений, продуцентов аллохтонной пыльцы, использовались сведения из POWO\*.

Возрастная модель построена на основе 11 радиоуглеродных AMS-дат (рис. 2). Датирование проведено в Новосибирском государственном университете (ЦКП «Ускорительная масс-спектрометрия НГУ-ННЦ»), подготовка проб – в Институте археологии и этнографии СО РАН (г. Новосибирск). Материалом для датирования служили целлюлоза (инт. 92.5; 157.5; 257.5; 377.5; 432.5; 477.5 см) и гуминовая кислота (157.5; 257.5; 342.5; 477.5; 497.5 см). Байесовское моделирование выполнено в программе Bacon 2.2 [35]. Временное разрешение реконструкций составляет от 30 до 88 лет. Возраст приведен в калиброванных

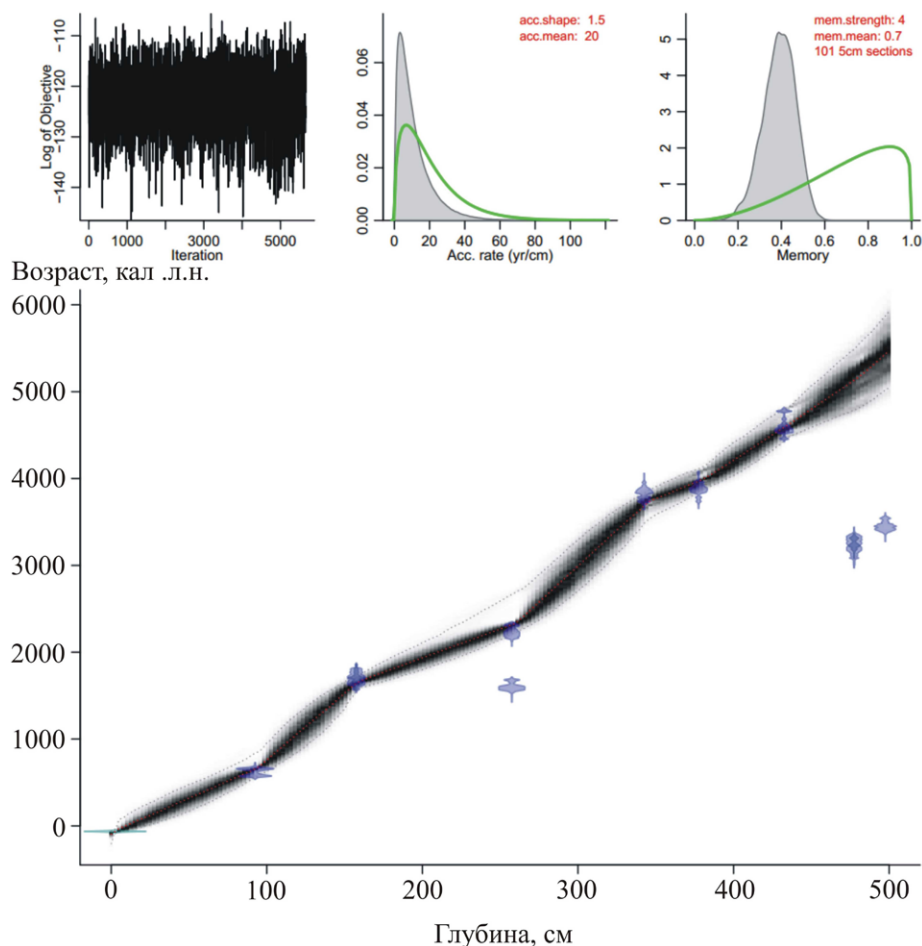


Рис. 2. Модель «глубина–возраст» отложений разреза 4213, заболоченный берег оз. Заря. Возраст – календарных лет назад (кал. л.н.).

Fig. 2. “Age–depth” model for the sediment sequence of the site 4213, swamping coast of Zarya Lake. Age, calendar yr BP; depth, cm.

\* Plants of the World Online. Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew. 2026. URL: <http://www.plantsoftheworldonline.org>

значениях. Отложения включают криптотефру влк. Байтоушань, в том числе кальдерообразующего извержения 946/947 гг. н.э. Впервые в Приморье прослой этой тефры был найден в разрезах на побережье соседней бухты Кит [36].

## Результаты и обсуждение

### Фазы развития растительности

Согласно возрастной модели (рис. 2), вскрытые озерно-болотные отложения накапливались последние 5500 лет, что отвечает барабашевским слоям региональной стратиграфической схемы [37]. Палиноспектры изученного разреза характеризуются большим разнообразием таксонов в группах древесных и трав, состав спор менее богатый. Соотношение групп пыльцы и спор по разрезу довольно часто резко меняется (рис. 3), особенно сильно варьирует количество спор, что, по-видимому, связано с периодическим поступлением таксонов не только благодаря ветровому разносу, но и за счет плоскостного смыва во время сильных ливней с окружающих склонов, где папоротники преобладали в лесном покрове. В целом спектры отражают развитие лесной растительности на ближайших склонах и в среднегорье, травяных группировок на заболоченных берегах озера и луговых сообществ на аккумулятивных формах побережья. Из аллохтонной пыльцы далекого разноса встречена пыльца криптомерии (*Cryptomeria*), занесенная с Японских островов, бука (*Fagus*), которая могла быть принесена как с Японии, так и с о-ва Уллындо, Корейского п-ова и Южного Китая\*. Занесенной из внутренних частей материка (Северный Китай, Монголия) могла быть пыльца хвойника (*Ephedra*), хотя нельзя исключать, что в отдельные периоды голоцена он был более широко распространен, чем в настоящее время, – известно одно местообитание *Ephedra monosperma* на дюнах в приустьевой части р. Киевка, в 40–45 км южнее бух. Заря [30]. Распределение пыльцы и спор по разрезу

позволило выделить 20 палинозон, отвечающих следующим фазам развития растительности (рис. 3).

*Палинозона 1* (инт. 470–500 см, 5500–5050 л.н.), выделенная для гиттии, отражает развитие многопородных широколиственных и хвойно-широколиственных лесов в низкогорье. В составе лесной растительности были широко представлены дуб, липа, клен, бархат амурский, ясень, калопанакс семилопастный и граб сердцелистный, в широколиственных долинных лесах – ильм, орех маньчжурский, в подлеске – лещина, леспедеца, сирень. Участие кедра корейского и берез незначительно. В среднегорье были распространены елово-пихтовые леса. Около озера росли ольха и ива, на болоте встречалась береза овальнолистная. Среди пыльцы трав преобладают таксоны влажных местообитаний (осоковые, лютиковые, гречишные, включая гигрофильный горец почечуйный (*Polygonum persicaria*) и др. Довольно высоко содержание пыльцы полыни (*Artemisia*, до 18 %) и лугового разнотравья, поступающей с аккумулятивных форм побережья. В верхней части много пыльцы кровохлебки (*Sanguisorba*, до 13.6 %), характерной и для современного болота. В озере среди водной растительности был распространен водяной орех (*Trapa*, до 10.3 %), типичный для хорошо прогреваемых водоемов с глубиной 0.5–2.5 м [31]. Обилие пыльцы ежеголовника (*Sporogonium*, до 25.4 %) свидетельствует о близости берега озера. Найдено много спор папоротников (Polypodiaceae, *Osmunda*) и в небольшом количестве – сфагновых мхов.

*Палинозона 2* (инт. 415–470 см, 5050–4380 л.н.) отвечает развитию кедрово-широколиственных лесов. Количество пыльцы *Pinus* s/g *Haploxyton* увеличилось (до 23.9 %). Содержание пыльцы широколиственных в нижней части снизилось, а выше – увеличилось. Роль широколиственных в лесах несколько возросла 4790–4440 л.н. Зафиксирован пик пыльцы граба (*Carpinus*, до 3.9 %, 4540–4490 л.н.), стало больше берез. Сокращение участия широколиственных началось ~4440 л.н. Среди кустарникового

\* Plants of the World Online. Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew. 2026. URL: <http://www.plantsoftheworldonline.org>



яруса помимо лещины (*Corylus*, до 3.6 %) был широко развит бересклет (*Euonymus*). В нижней части зоны много пыльцы ольхи (*Alnus*, до 21.4 %) – заросли ольхи стали особенно распространены 5050–4790 л.н. Сопутствующей породой являлась ива (*Salix*), пыльца которой в небольших количествах встречается регулярно. Пыльца *Ephedra* была привнесена ~4660–4600 л.н. Количество пыльцы трав в целом становится больше (до 36.6 %), но в верхней части резко падает. Преобладает пыльца осок (Сурегасеае, до 60.9 %), стало больше пыльцы злаков (Роасеае, до 34.6 %). Среди водных растений появилась альдрованда (*Aldrovanda*), развитию которой могла способствовать полная изоляция от моря. Исчезла пыльца *Trapa* – возможно, сократилась площадь открытой воды. В отдельных пробах много спор *Sphagnum*, в пробах с обилием пыльцы темнохвойных появляются споры *Lycopodium*.

*Палинозона 3* (инт. 395–415 см, 4380–4150 л.н.) отвечает более широкому развитию темнохвойных лесов в горах. Участие ели (*Picea*, до 49.8 %) особенно увеличилось 4320–4210 л.н., вблизи побережья появились кедровники (*Pinus* s/g *Haploxyton*, до 34.1 %). Доля пыльцы широколиственных и ее разнообразие резко снизились (до 5.3 %). Климат стал холоднее. Во всех пробах встречаются пыльники ольхи (*Alnus*), в верхней части эта пыльца преобладает среди древесных. Это указывает на более сухие условия – заросли ольхи могли активно развиваться на осушенных участках вокруг озера. В группе NAP стало больше пыльцы луговых трав – сложноцветных, полыни, гвоздичных, лилейных, кипрейных и т.п. Увеличилась доля пыльцы растений, развивающихся на сырых лугах (кровахлебка, гречишные), исчезает пыльца видов, типичных для переувлажненных участков, – *Menyanthes*. В составе водных растений более обильна стала альдрованда. В верхней части существенно снизилось количество спор *Osmunda*. Из палиноморф часто встречаются грибы семейства Microthyridaceae, которые являются патогенами, развиваются на поверхности растений, в том числе в разрезах торфяников.

*Палинозона 4* (инт. 370–395 см, 4150–3900 л.н.) отражает увеличение роли пихты (*Abies*, до 13.2 %), более требовательной к те-

плу. Источником, скорее всего, является пихта белокорая, оптимум этого вида находится в пределах активных температур от 1400 до 1800 °С, развитию мог способствовать более устойчивый снежный покров [38]. Минимум пыльцы *Abies* зафиксирован в торфе с обилием мелких углей. Существенно увеличилось содержание пыльцы широколиственных (в сумме до 47.5 %). Состав их стал более разнообразным (дуб, ильм, липа, орех, бархат, ясень), в лесах принимал участие граб (*Carpinus*, до 3.5 %). Во второй половине периода стало больше берез (*Betula*, до 12.1 %). Резко сократилось содержание пыльцы ольхи, пыльца ивы перестала встречаться. Из аллохтонной пыльцы встретились *Cryptomeria* (4150–4090 л.н.) и *Ephedra* (4090–4030 л.н.). Количество пыльцы трав увеличилось. Преобладает пыльца растений влажных местообитаний, стало больше лютиковых, злаков, зонтичных, вновь зафиксирована пыльца вахты. На болоте появлялись вересковые кустарнички (Ericaceae). Вверх по разрезу растет количество спор *Osmunda* – чистоустника азиатского, распространенного в покрове долинных широколиственных лесов.

*Палинозона 5* (инт. 345–370 см, 3900–3730 л.н.) характеризуется незначительным увеличением роли темнохвойных, стало больше пыльцы ели (*Picea*, до 42.2 %) и кедра корейского (*Pinus* s/g *Haploxyton*, до 36.6 %). Количество пыльцы широколиственных пород несколько снижается (21.5–28.95 %), особенно (до 3.2 %) в торфе, образованном 3790–3760 л.н. Состав их по-прежнему разнообразный. В верхней части увеличивается доля пыльца ольхи. Среди NAP при преобладании пыльцы осок увеличилась доля пыльцы кровахлебки, обитателя болот и сырых лугов, и полыни, поступавшей с пересыпи. Встречено много пыльцы лютиковых, основным источником, вероятно, являлась калужница болотная, обычный представитель покрова ольшаников. Стало больше спор, в верхней части пик спор *Sphagnum* может служить «холодным» сигналом.

*Палинозона 6* (инт. 345–335 см, 3730–3590 л.н.). Наблюдается снижение доли пыльцы темнохвойных, кедра корейского (до 8.4 %), увеличение роли широколиственных (до 39.7 %) и развитие ольховых зарослей

(*Alnus*, до 23.8 %). В группе NAP стало меньше пыльцы осок, увеличилась доля пыльцы полыни и злаков, отмечен пик пыльцы гречишных. Увеличение содержания пыльцы бобовых указывает, что на склонах распространены заросли леспедецы, которая могла разрастаться после сильных пожаров – здесь же встречено много мелких углей. Появились споры мха *Discranium*, обитающего на стволах деревьев, гниющей древесине и скалах. Встретилась пыльца *Ephedra* (3680–3590 л.н.).

*Палинозона 7 (инт. 310–335 см, 3590–3160 л.н.)*. Несколько увеличилась доля пыльцы кедра корейского (до 24.4 %) и темнохвойных (до 32.6 %). Возросло количество пыльцы *Duschekia* (до 9.2 %) – возможно, ольховник рос на ветробойных участках около побережья. Снижение количества пыльцы ольхи может быть свидетельством обводнения болота 3500–3340 л.н. Количество пыльцы широколиственных стало ниже (<26.3 %), меньше стало и пыльцы граба. В группе NAP резко увеличилась доля пыльцы осок (до 88 %), довольно много пыльцы злаков (Poaceae, до 18.2 %), отмечены пики отдельных таксонов (гречишные, полынь, кровохлебка). Появилась пыльца хмеля (*Humulus*, до 4.8 %), возможно свидетельствующая о деятельности человека на побережье бухты Заря 3500–3340 л.н. В верхней части встречена пыльца водных растений (*Sporganium*, *Aldrovanda*). Найдены единичные споры хвоща (*Equisetum*), возможно занесенные из долины ручья. Вновь найдены споры плаунов и появились споры трилетных папоротников.

*Палинозона 8 (инт. 295–310 см, 3160–2900 л.н.)*. Уменьшилось содержание пыльцы темнохвойных. Причем в среднегорье, по-видимому, были более благоприятные условия для развития ели корейской (*Picea sect. Euripicea*), более устойчивой к засухам [38]. Стало больше пыльцы широколиственных (до 35.9 %), в низкогорье большие площади занимали кедрово-широколиственные леса. Среди NAP отмечена тенденция уменьшения пыльцы осок, найдена пыльца щавеля (*Rumex*).

*Палинозона 9 (инт. 265–295 см, 2900–2390 л.н.)* характеризуется увеличением доли AP в нижней части зоны: по-видимому, в начале периода был меньший снос спор. Силь-

но увеличилось количество пыльцы хвойных, особенно ели и кедра корейского, что отражает экспансию хвойных в среднегорье Сихотэ-Алиня с 2815 л.н. Причем 2900–2820; 2640–2560 л.н. повышалось участие ели корейской (доля пыльцы *Picea sect. Euripicea* – до 17.6 %). Количество пыльцы широколиственных в нижней части снижается (до 15.3 %), что отражает более холодные условия 2820–2640 л.н. Это подтверждается и пиками содержания спор сфагновых мхов (до 17.2 %). Обилие мелких углей свидетельствует о частых пожарах. Возможно, за счет влияния пирогенного фактора увеличилось и участие берез. Роль широколиственных несколько возростала 2560–2480 л.н. и снижалась в конце периода (2480–2390 л.н.). Пыльца граба стала встречаться единично и, скорее всего, была принесена с юга. В группе NAP преобладает пыльца растений, растущих на болотах и сырых лугах (осоковые, лютиковые, гречишные и др.). Постоянно встречается пыльца горца почечуйного, обитателя сырых участков, берегов ручьев, а также нарушенных земель. На пересыпи было много щавеля. Количество спор резко увеличилось в верхней части. Встречаются споры плаунов. В кровле отложений этой зоны найдено зерно *Cryptomeria*.

*Палинозона 10 (инт. 235–265 см, 2390–2150 л.н.)*. Отмечена тенденция увеличения доли AP и NAP. Снижается количество пыльцы темнохвойных, причем следует отметить снижение доли *Pinus sect. Euripicea*. Исключением является инт. 245–250 см, в котором сумма пыльцы темнохвойных достигает 43.8 %, что свидетельствует о более активном переносе пыльцы со среднегорья, где расширялся пояс елово-пихтовых лесов 2240–2210 л.н. «Холодный» сигнал подтверждается и пиком спор сфагновых мхов (до 9.9 %). Судя по присутствию пыльцы аралии, 2240–2180 л.н. растительность на близлежащих склонах стала более разреженной. Появление в этом слое пыльцы ежеголовника может быть свидетельством развития на болоте небольших озерков. Пыльца ольхи, включая ее пыльники, активно поступала в отложения в начале периода в условиях частых наводнений. Количество пыльцы широколиственных увеличивается (до 42.2 %) в верхней части; по-видимому,

основное поступление пыльцы происходило с ближайших склонов. Здесь же резко увеличилась доля пыльцы берез (до 20.9 %), снизился привнос пыльцы хвойных – скорее всего, в конце периода (2180–2150 л.н.) стало суше. Среди NAP возросла доля луговых таксонов, в том числе полыни, на болоте стала в обилии расти кровохлебка. Количество спор снижается вверх по разрезу, в верхней части становится меньше спор *Osmunda*.

*Палинозона 11 (инт. 200–235 см, 2150–1910 л.н.)* отражает более широкое развитие по обрамлению озерной котловины зарослей ольхи (*Alnus*, до 30.3 %). Повысилось и содержание пыльцы ольховника. В травянистом покрове было много калужницы. Доля пыльцы темнохвойных несколько снижается, в составе темнохвойных лесов стало больше пихты. Содержание пыльцы широколиственных остается высоким (до 44.3 %). Среди NAP стало встречаться больше пыльцы лугового разнотравья, на аккумулятивной форме в обилии росла полынь (*Artemisia*, до 15.5 %), гвоздичные, зонтичные, возможно, были густые заросли шиповника (*Rosaceae*, до 10.3 %), среди болотной растительности увеличилось участие кровохлебки (*Sanguisorba*, до 33 %). Появилась пыльца маревых, предпочитающих открытые пространства и более сухие условия. К этому семейству относятся сорные и рудеральные растения. В нижней части встречена пыльца амброзии, это также является признаком появления нарушенных участков [39] 2120–2080 л.н. Количество спор снижается вверх по разрезу. Обращает внимание высокое содержание спор *Sphagnum*, что предполагает более широкое развитие сфагновых мхов, которые, как и в настоящее время, могли встречаться в обилии в напочвенном покрове ольшаников. Найдена аллохтонная пыльца *Cryptomeria*.

*Палинозона 12 (инт. 155–200 см, 1910–1610 л.н.)*. Доля пыльцы *Alnus* достигает 61.8 %, встречаются пыльники. Доля пыльцы темнохвойных снижается, за исключением инт. 185–190 см (1810–1780 л.н.). Особенно мало пыльцы темнохвойных в торфе из инт. 155–165 см, образованном 1680–1610 л.н. В этом же интервале увеличивается доля пыльцы ольховника (до 13.7 %). Доля пыльцы ши-

роколиственных в целом ниже, но выделяется пик (до 34 %) в слое торфа, образованном 1750–1710 л.н. Возможно, в обрамлении бухты Заря рос граб (*Carpinus*, до 2.2 %). Среди NAP преобладает пыльца осок, лютиковых, довольно много пыльцы полыни, гречишных, в верхней части увеличивается доля пыльцы злаков и кровохлебки. Небольшой пик пыльцы *Polygonum persicaria*, возможно, свидетельствует об антропогенном нарушении земель в раннем средневековье. Количество спор сильно варьирует. Количество спор *Sphagnum* в целом стало меньше.

*Палинозона 13 (140–155 см, 1610–1380 л.н.)*. Увеличивается содержание пыльцы темнохвойных, отмечена тенденция увеличения роли кедра корейского (в верхней части до 15.6 %). В лесах стало больше берез (*Betula*, до 24.3 %): возможно, расширился пояс каменноберезняков в среднегорье. В подлеске было много леспедецы. Количество пыльцы широколиственных существенно снижается вверх по разрезу, что отражает похолодание. На болоте более широко представлены береза овальнолиственная и сфагновые мхи. Количество пыльцы ольхи снижается – котловина стала более обводнена. Доля NAP увеличилась, ведущими таксонам наряду с осоками являются кровохлебка, лютиковые, полынь и другие представители разнотравья. Присутствует пыльца далекого разноса – *Cryptomeria*, принесенная в период 1460–1380 л.н.

*Палинозона 14 (инт. 115–140 см, 1380–980 л.н.)*. Палиноспектры отражают развитие кедрово-широколиственных лесов с участием пихты, участие которой особенно велико 1140–980 л.н. (*Abies*, до 8.5 %). Вероятно, больше пихты стало и в лесах среднегорья. Участие ели было высоким в начале периода (1380–1300 л.н.). В лесах около болота появились грушанковые (*Rugolaceae*). Состав широколиственных разнообразный, максимальное количество отмечено в торфе, образованном 1070–980 л.н. В низкогорье мог расти граб (*Carpinus*, до 1.6 %). Существенно стало меньше зарослей ольхи, возможно, за счет обводнения болота. Среди NAP стало больше злаков, полыни и других представителей астровых, розоцветных, гречишных, зонтичных. Количество спор растет вверх по разрезу.

*Палинозона 15* (инт. 100–115 л.н., 980–680 л.н.) характеризуется снижением количества AP и увеличением доли спор. Среди пыльцы темнохвойных уменьшилось содержание пыльцы пихты и увеличилось – *Picea sect Eurpicea*, в среднегорье стала более распространена ель аянская. Увеличивается доля пыльцы ольхи, при снижении увлажнения на болоте развивается кустарниковый ярус. Стало меньше пыльцы осок, больше кровохлебки, злаков. Единично найдена пыльца хмеля. Снижается содержание спор *Osmunda*.

*Палинозона 16* (инт. 80–95 см, 680–550 л.н.). Увеличивается доля пыльцы темнохвойных (до 45.3 %), особенно в торфе, образованном 680–630 л.н. Количество пыльцы широколиственных резко снижается, что более проявлено в первой половине периода (680–590 л.н.). Пыльца граба встречается единично (0.2 %) и явно занесена с юга. Из аллохтонной встретила пыльца *Cryptomeria*, *Fagus*. Среди NAP появляется пыльца капустовых. Присутствие пыльцы амброзии свидетельствует о появлении нарушенных участков в результате хозяйственной деятельности 590–550 л.н. На болоте стал развит покров из сфагновых мхов (*Sphagnum*, до 21.7 %). Обнаружены споры плаунов и в верхней части – кониограммы.

*Палинозона 17* (инт. 65–80 см, 550–430 л.н.). Снижается содержание пыльцы темнохвойных (8–16.5 %), кедра корейского и увеличивается доля пыльцы берез, в том числе кустарниковой. Высокая доля пыльцы *Betula sect. Albae* (до 10.3 %) говорит о развитии на месте кедрово-широколиственных лесов производных белоберезняков. Сумма пыльцы широколиственной стала несколько выше, но исчезла пыльца граба, в низкогорье были развиты дубняки. Максимум широколиственных таксонов отмечен в торфе, образованном 510–470 л.н. В этом же интервале встречено очень мало пыльцы кедра корейского, отмечен пик пыльцы кустарниковой березы (3.5 %), стало больше пыльцы ольховника. Вверх по разрезу увеличивается количество пыльцы ольхи, в группе NAP – злаков и кровохлебки. Количество спор сфагновых мхов несколько снизилось, споры *Osmunda* встречаются единично. Найдена аллохтонная пыльца *Cryptomeria*.

*Палинозона 18* (инт. 45–65 см, 430–270 л.н.). Резко увеличивается доля AP и NAP. В лесной растительности существенно возросло участие темнохвойных и кедра корейского. Вверх по разрезу доля пыльцы берез снижается. Пыльцы широколиственных меньше в нижней части зоны (16.4 %). Единичная пыльца граба является аллохтонной. Пыльцы ольхи и ольховника стало существенно меньше. Увеличивается содержание пыльцы кустарниковой березы (до 8.5 %). Среди NAP количество пыльцы злаков снизилось, увеличилась доля пыльцы полыни и розоцветных. Более половины спор принадлежит *Sphagnum*. Вероятно, это фиксирует климатический минимум Маундера.

*Палинозона 19* (инт. 20–45 см, 270 л.н. – начало XX). Количество пыльцы темнохвойных снижается вверх по разрезу, что отражает их сокращение при хозяйственном освоении территории. Особенно сильно насаждения хвойных пострадали с середины XIX в.: снизились доли пыльцы ели аянской и кедра корейского. В палиноспектрах увеличилось участие пыльцы берез, в том числе березы белой (*Betula sect. Albae*, до 11.3 %) – в конце XIX в. появились вторичные березовые леса на месте вырубленных или сгоревших хвойных и кедрово-широколиственных лесов. В обилии отмечена пыльца ольхи (до 36.8 %). Пыльцы широколиственных стало меньше (13.5–24.8 %), но разнообразие ее увеличилось. В группе NAP преобладает пыльца кровохлебки, пыльца осок доминирует только в верхней части. Увеличивается количество пыльцы злаков (до 14.3 %). В нижней части встречается пыльца хмеля, горца почечуйного и щавеля. Возможно, на побережье бухты жили люди. Доля спор стала намного выше, существенно снижается роль сфагновых мхов. Встречаются споры плаунов. В основании зоны обнаружена пыльца *Ephedra*.

*Палинозона 20* (инт. 0–20 см, с первой половины XX в. до настоящего времени) характеризует изменения в растительности после организации Южно-Уссурийского (Судзухинского) заказника в 1928 г. и Лазовского (Судзухинского заповедника) в 1935 г. Увеличилось количество AP, а в их составе – пыльцы всех хвойных таксонов, включая пихту (*Abies*, до 8.4 %). Ближайшие насаждения хвойных

находятся на Заповедном хребте в 1.8 км к северу. Содержание пыльцы темнохвойных снизилось (до 17 %) в верхней части разреза, а затем в кровле увеличилось до 23.8 %. Отмечено более высокое содержание пыльцы кедра корейского. Доля пыльцы широколиственных также увеличилась, в ее составе встречена пыльца клена (*Acer*). Появилась пыльца винограда (*Vitis*). Такие изменения отражают прекращение вырубки хвойных пород и восстановление площади елово-пихтовых, кедровников и кедрово-широколиственных лесов. Увеличение доли широколиственных (до 25.9 %) отражает и климатическую тенденцию – тренд на потепление. Пыльца граба (<0.7 %) является заносной, северная граница его ареала на побережье проходит в районе бухты Киевка в 40 км южнее. В кровле торфяника найдена пыльца *Cryptomeria*, перенесенная с Японских о-вов. В составе NAP преобладает пыльца осоковых. Количество спор сильно снижается. Довольно много спор сфагновых мхов, преобладающих в моховом покрове болота [27], которые, по видимому, являются реликтом малого ледникового периода. Чаше стали встречаться споры *Osmunda*.

### Отражение короткопериодных климатических изменений в палиноспектрах

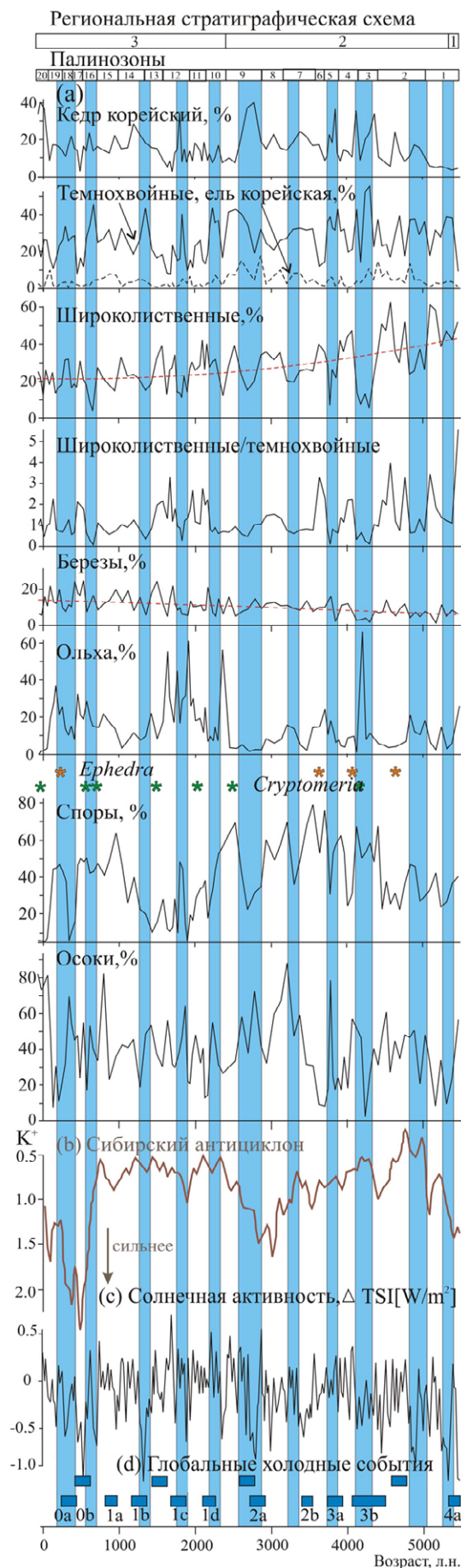
Полученные данные позволяют восстановить динамику растительности побережья, низкогорья и среднегорья в обрамлении бухы Заря с высоким временным разрешением и оценить реакцию биотических компонентов на квазивековые и мультидекадные климатические изменения за последние 5500 лет. Следует учитывать, что большую роль в формировании палиноспектров озерно-болотных отложений играл не только ветровой перенос пыльцы, но и плоскостной смыв и поступление таксонов с текущими водами. Этот процесс давал значительный вклад в периоды высокой повторяемости наводнений, связанных с частым прохождением сильных тайфунов.

Наиболее ярко перенос за счет плоскостного смыва иллюстрируется на примере спор, в составе которых преобладают папоротники,

распространенные в лесном покрове близлежащих склонов и по окраинам болота. Распределение содержания спор на временной шкале (рис. 4) является индикатором усиления частоты прохождения залповых осадков. Индикатором уменьшения увлажнения в какой-то мере выступает содержание пыльцы ольхи, для которой условия развития по окраинам болота становятся более благоприятными. Вклад в состав палиноспектров могли оказывать ольховые заросли по обрамлению болота и на шлейфах в нижних частях склонов. Пик пыльцы ольхи наблюдается в торфе, образованном 4210–4150 л.н., что фиксирует реакцию болотной растительности на холодное «сухое» событие. Холодные условия 4200 л.н. зафиксированы в отложениях оз. Зеркальное [26] и отложениях береговых палеозер п-ова Песчаный [23].

Это похолодание хорошо проявилось и в других регионах Восточной Азии [13]. Аридизация климата была отмечена в том числе и на северо-востоке Китая в разрезе кратерного озера Удалянчи (*Wudalianchi*) и других геологических записях на обширной территории востока и юго-востока. Снижение интенсивности летнего муссона связывают с процессами в низких широтах на западе Тихого океана [40]. Аналогичные положительные пики (рис. 4) пыльцы ольхи также связаны с уменьшением увлажнения при кратковременных похолоданиях 2390–2320, 1910–1880, 1780–1750, 1650–1610 л.н., вызванных снижением величины солнечной активности [41], сопровождавшимся снижением температуры поверхности Тихого океана (ТПО) в тропиках [42] и уменьшением интенсивности течения Куроисио [14]. Во втором из названных периодов (1910–1880 л.н.) происходила активизация Сибирского антициклона [43], в двух последних (1780–1750, 1650–1610 л.н.) – интенсификация Эль-Ниньо [44]. Наиболее широкое развитие ольхи 1910–1610 л.н. (палинозона 12) отмечено в условиях снижения увлажнения и образования болота с осушками. Увеличение содержания ольхи отмечено и в отложениях оз. Латвия, расположенном на побережье Восточного Приморья в 50 км южнее [25].

Во время похолодания 1610–1380 л.н. обводнение котловины оз. Заря в силу локальных



**Рис. 4.** Изменение содержания отдельных таксонов пыльцы и спор во времени и сопоставление с глобальными и региональными палеоклиматическими данными. Региональная стратиграфическая схема: 1 – барабашевские, 2 – амбинские, 3 – рязановские слои [37]. (а) биотические компоненты по данным изученного разреза отложений оз. Заря; (б) интенсивность Сибирского антициклона, восстановленная по распределению содержания  $K^+$  в ледяном керне GISP2 Гренландии [43]; (с) флуктуации солнечной активности, реконструированные по измерению  $^{10}Be$  в полярных ледяных кернах [41]; (д) глобальные холодные события северного полушария, обозначенные синими прямоугольниками; 0a–4a – номера событий (по [47, 48]). Голубыми полосами показаны похолодания, выделенные по пыльцевой записи в отложениях оз. Заря.

**Fig. 4.** Temporal changes in the content of pollen and spore taxa and comparison to global and regional paleoclimatic data. Regional stratigraphical scheme: 1, Barabashevskie; 2, Ambinskie; 3, Ryazanovskie units [37]. (a) biotic components according to the data from the studied section of Zarya Lake sediments; (b) intensity of Siberian High, reconstructed from the distribution of the  $K^+$  content in the GISP2 ice core, Greenland [43]; (c) fluctuation of solar activity, reconstructed based on the measurements of  $^{10}Be$  from polar ice cores [41]; (d) global cold events of Northern Hemisphere, marked by dark blue rectangles; 0a–4a are numbers of the events (according to [47, 48]). Light blue columns show cooling according to the pollen and spore record from Zarya Lake sediments.

причин (например, блокирование стока из котловины), отражено в снижении доли пыльцы ольхи в палиноспектрах (палинозона 13). В то же время палиноспектры показывают, что в более холодных и сухих условиях в горах расширялся пояс каменноберезняков. Данные по развитию горных ландшафтов и растительности на других участках побережья также свидетельствуют, что во время похолодания, сопоставляемого с холодной стадией Кофун на Японских о-вах [45], в Восточном Приморье климат стал суше [19, 20]. Снижение увлажнения во второй половине средневекового климатического оптимума (980–680 л.н.) было причиной более широкого развития ольхи в кустарниковом ярусе болота и на берегах озера. В верховьях бассейна р. Милоградовка переход от оптимума к малому ледниковому периоду (770–660 л.н.) также характеризовался иссушением [21]. На Васьковском болоте фиксируются более сухие условия около 920–830 л.н. [24]. На побережье зал. Находка сухой период выделен в интервале 840–730 л.н. [20]. В малый ледниковый период (палинозоны 15–17) при высоком увлажнении ольха могла развиваться на склоновых шлейфах. Увеличение ольховых зарослей в озерной котловине, связанное со снижением увлажнения в период 270 л.н. – конец XIX в. хорошо сопоставляется с данными по бассейну р. Милоградовка, где сухие условия фиксируются 240–140 л.н., а на главном водоразделе Сихотэ-Алиня (урочище Мута) суше стало 270 л.н. [21, 46].

Похолодания в изученном разрезе озерно-болотных отложений маркируются увеличением пыльцы темнохвойных пород. Основным источником пыльцы являлся пояс пихтово-еловых лесов среднегорья Заповедного хребта. Расширение их площади и увеличение участия темнохвойных пород в смешанных хвойно-широколиственных лесах обычно взаимосвязаны и четко фиксируются в палиноспектрах. Пыльца темнохвойных могла поступать и со среднегорья главного водораздела, а в наводнения смываться с верховьев ручьев. Среди похолоданий выделяются как более длительные периоды, отвечающие квазивековым изменениям, ход которых хорошо совпадает с глобальными похолоданиями [47], так и отдельные пики

пыльцы темнохвойных, фиксирующие мультидекадные события.

Увеличение содержания пыльцы темнохвойных пород около 5420–5260 л.н. совпадает с концом термического оптимума голоцена. Похолодание отмечено и в озерных отложениях на п-ове Песчаный [23]. Близкое по возрасту событие выделено для Северного полушария [48]. Существенное увеличение роли темнохвойных и снижение доли пыльцы широколиственных пород 4920–4790 л.н. также фиксируют похолодание, отвечающее глобальному событию 4800–4500 л.н. [47].

Площади пихтово-еловых лесов значительно увеличивались 4380–4150 л.н. (палинозона 3) в похолодание, близкое по возрасту к холодному событию 4200 л.н. [40]. Повышенные роли темнохвойных пород зафиксировано в это время на п-ове Песчаный [23]. Увеличение роли пихты белокорой (палинозона 4), развитию которой мог способствовать устойчивый снежный покров [38], в более теплых условиях 4150–3900 л.н. является свидетельством усиления интенсивности зимнего циклогенеза в условиях ослабления Сибирского антициклона (рис. 4). Небольшое расширение пояса темнохвойных лесов 3590–3160 л.н. (палинозона 7) происходило при тренде на похолодание и в других районах юга Дальнего Востока [49]. В районе оз. Зеркальное похолодание зафиксировано ~3560 л.н. [26]. Увеличение пыльцы пихты и ели для этого периода отмечено в разрезе лагунной террасы бухты Кит [50], а пыльцы ели – в отложениях оз. Латвия [25].

Экспансия темнохвойных пород в среднегорье в обрамлении бухты Заря отмечена начиная с 2900 л.н. (палинозона 9). Особенно широко распространилась ель, причем не только аянская, но и корейская, способная выдерживать иссушение [38]. Резко увеличивается содержание пыльцы темнохвойных пород в это время и в отложениях оз. Латвия [25]. Похолодание 2850–2140 л.н. фиксируется также в отложениях оз. Зеркальное [26] и палеоозера на побережье Амурского залива [22]. Данные по верховьям бассейна р. Милоградовка показывают, что с 2920 л.н. на фоне низкого увлажнения стали часто проходить наводнения [21]. Часть пыльцы темнохвойных с верх-

него пояса на побережье могла поставляться с плоскостным смывом. Южнее, на Шкотовском плато, распространение темнохвойных лесов началось с 2630 л.н. [51]. Такие изменения в растительности были вызваны длительным похолоданием, имевшим глобальный масштаб и сопровождавшимся в Восточной Азии иссушением [47]. Снижение увлажнения зафиксировано и во многочисленных разрезах озерно-болотных отложений на юге Дальнего Востока [52].

Полученные данные показывают сложную динамику пояса темнохвойных лесов во второй половине позднего голоцена. Расширение пояса елово-пихтовых лесов 2320–2180 л.н. является сигналом кратковременного похолодания, сопоставляемого с холодным событием Северного полушария (2270–2110 л.н.) [48]. Более широкое развитие пихты 2150–1910 л.н., вероятно, маркирует период с усилением зимнего циклогенеза. Сибирский антициклон был ослаблен [43]. Более активный привнос пыльцы темнохвойных 1810–1780 л.н. близок по возрасту к холодному событию, выделяемому в Корее [53]. Более широкое развитие ели отмечено в похолодание 1610–1380 л.н. (палинозона 13), ярко проявившееся в Восточном Приморье [19, 20]. Похолодание 1750–1350 л.н. имело глобальный масштаб в Северном полушарии [47]. В средневековый климатический оптимум увеличение роли пихты в лесах среднегорья 1140–980 л.н., по-видимому, фиксирует увеличение активности зимнего циклогенеза. В это время был ослаблен Сибирский антициклон [43], наблюдались высокие значения ТПО [42] и течение Курисио было активно [14].

Пояс темнохвойных лесов сильно расширился в малый ледниковый период (палинозоны 16, 18, начало 19), характеризовавшийся на юге Дальнего Востока высоким увлажнением [52]. Резкие изменения содержания пыльцы темнохвойных отражают общую нестабильность климатических условий. В более сухих условиях 550–430 л.н. пояс темнохвойных несколько сократился (палинозона 17), что, по-видимому, связано с уменьшением количества атмосферных осадков в похолодание XV в., сопоставимое с минимумом Шпёрера солнечной активности [54]. На наводнения в это время

указывает пик спор. Это согласуется с результатами реконструкций развития поймы р. Цукановка на крайнем юге Приморья [55].

Участие кедра корейского в лесной растительности вблизи оз. Заря в конце среднего голоцена было менее значимым, чем на горных склонах в обрамлении бухты Кит [50]. Возможно, побережье бухты Заря было закрыто низким водораздельным хребтом от поступления пыльцы кедра с кедрово-широколиственных лесов, распространенных на других участках низкогорья. Находки углей в озерных отложениях показывают, что в обрамлении оз. Заря часто происходили пожары.

Роль кедра корейского увеличилась 5050–4380 л.н. (палинозона 2) и особенно (палинозона 3) с 4380 л.н. в более прохладных условиях. Экологический оптимум кедра корейского – сумма активных температур 1500–3000 °С, гидротермический коэффициент 2–4.2, эта порода является мезофитом [38]. Снижение его участия 4270–4150 л.н., вероятно, связано с уменьшением увлажнения, вызванным снижением интенсивности летнего муссона в холодное событие 4200 л.н. [40]. Широкое развитие кедрово-широколиственных лесов (палинозона 5) 3900–3730 л.н. происходило в теплых влажных условиях. Снижение участия кедра корейского, скорее всего, также обусловлено уменьшением увлажнения, что подтверждается ростом пыльцы ольхи. Наибольший расцвет кедровников был в похолодание 2820–2640 л.н. Это же зафиксировано и в разрезе оз. Латвия [25]. Далее участие кедра корейского в лесной растительности в окрестностях оз. Заря снизилось вплоть до 1810 л.н. Возможно, на Заповедном хребте не было чистых кедровников. Пик пыльцы кедра корейского свидетельствует о кратковременной фазе (1810–1780 л.н.) усиления циклогенеза, когда часто проходили наводнения, что подтверждается и другими данными о проявлении палеопаводков на восточном макросклоне Сихотэ Алия [21]. Севернее района исследований, в 175 км, в районе оз. Зеркальное, распространение кедра корейского в лесной растительности на низких уровнях рельефа зафиксировано 1880–1830 л.н., что можно связать с более прохладными летними температурами [26].

Увеличение участия кедра корейского начиная с 1300 л.н. хорошо совпадает с повышением увлажнения при перестройке климатической системы на потепление, зафиксированной и в разрезах других торфяников Восточного Приморья [24]. Кедр корейский был широко распространен в лесной растительности и в средневековый климатический оптимум, и в малый ледниковый период. Эта же тенденция отмечена для обрамления оз. Зеркальное [26]. Минимум пыльцы в изученном разрезе фиксирует более сухие условия в похолодание, сопоставимое с минимумом Шпёрера. Возможно, причиной были пожары на близлежащих склонах, обусловившие развитие дубняков на месте кедрово-широколиственных лесов. Засухи в это время отмечены и на Корейском п-ове [56].

Участие берез в лесной растительности было невелико. Отмечен тренд увеличения их роли от среднего голоцена к позднему и современным условиям (рис. 4). Как правило, пики пыльцы древесных берез приурочены к более сухим фазам, а увеличение их роли началось последние 2500 лет, что может быть связано со снижением интенсивности летнего муссона [2]. Более широкое развитие пояса камнеберезняков было зафиксировано в похолодание 1610–1380 л.н. (палинозона 13). В малом ледниковом периоде одним из природных факторов увеличения участия берез в лесах могли быть ветровалы, как это предполагалось при реконструкции развития растительности Шкотовского плато [51]. Современные данные показали, что площадь таких нарушений в верхних поясах гор после прохождения сильнейших тайфунов может быть значительна [57] и в периоды усиления циклонической активности, как это наблюдалось в малый ледниковый период [52], ветровалы могли быть триггером для существенного изменения растительного покрова.

Полученные данные указывают на тренд снижения содержания пыльцы широколиственных пород от среднего голоцена к позднему и к настоящему времени, несмотря на значительное распространение вторичных дубовых лесов в низкогорье. Доля пыльцы широколиственных существенно варьирует

на временной шкале, максимумы отвечают потеплениям, отдельные пики часто приурочены к кратковременным сухим фазам, когда перенос пыльцы шел в основном с низкогорья. Минимумы четко фиксируют похолодания. Наибольшего расцвета за последние 5500 лет полидоминантные широколиственные леса достигли в теплые фазы конца среднего голоцена: 5500–5050, 4790–4440 л.н. (палинозоны 1, 2). В позднем голоцене наибольшее содержание широколиственных таксонов отвечает потеплениям 4150–3900, 3730–3590, 2150–1910, 1070–980 л.н. (палинозоны 4, 6, 11, 14). Резкое снижение суммы пыльцы широколиственных фиксирует похолодания. Особенно значительное снижение отмечено 4380–4150 л.н. (палинозона 3), 2820–2640 (нижняя часть палинозоны 9), 1606–1378 л.н. (палинозона 13) и в начале малого ледникового периода – 680–590 л.н. (нижняя часть палинозоны 16). Выделяются и отдельные минимумы, например 3790–3760 л.н., что отражает кратковременное похолодание. Кратковременное ухудшение климата (похолодание и иссушение) 3700 л.н. зафиксировано и в пыльцевых записях Корейского п-ова [13]. Резкое снижение содержания пыльцы кедра корейского в изученном разрезе (рис. 4) также свидетельствует о снижении увлажнения.

Чтобы исключить влияние на состав палиноспектров локальной растительности на болоте и побережье, в первую очередь развития ольховников по обрамлению озера, хорошим показателем изменения климата является соотношение долей широколиственных таксонов и темнохвойных. Содержание пыльцы ольхи сильно колеблется и затушевывает температурный сигнал. Изменение соотношения суммы пыльцы широколиственных таксонов и суммы пыльцы темнохвойных во времени (рис. 4) хорошо согласуется с ходом вариации солнечной радиации [41] и солнечной активности [58].

Распределение аллохтонной пыльцы *Cryptomeria* и *Fagus*, которая, скорее всего, поступала с Японских островов за 600 км, показывает, что ее занос стал чаще во второй половине позднего голоцена (рис. 4). По-видимому, атмосферные процессы стали более динамичными и циклоническая активность в целом

возросла. Такое же заключение сделано и для района Курильских о-вов, где во вторую половину позднего голоцена усилился перенос аллохтонной пыльцы с юга [59]. Первая находка пыльцы *Cryptomeria* в торфе, который накапливался 4150–4090 л.н., близка к холодному событию 4200 л.н. Пыльца *Cryptomeria* переносилась и в другие холодные периоды, но есть и в поверхностном слое торфа.

Пыльца хвойника заносилась более часто в конце среднего – начале позднего голоцена (~4660–4600; 4090–4030; 3680–3590 л.н.), а также в малом ледниковом периоде 270–230 л.н. Данные по распределению эолового кварца на о. Чеджу и по изучению донных осадков Японского моря показывают, что в эти периоды западное струйное течение смещалось на север [15, 16]. Возможно, пыльца *Ephedra* поступала из районов Монголии, с севера и северо-запада Китая с материалом пыльных бурь, повторяемость которых на юге российского Дальнего Востока при смещении струйного течения на север увеличивалась. Изучение современного пыльцевого дождя показало, что пыльца *Ephedra* в обилии переносится с пыльными бурями [60]. Но нельзя исключать и близкий источник пыльцы: хвойник мог расти на песчаных аккумулятивных формах на берегу оз. Заря. Бухта находится в 40 км к северу от устья р. Киевка, где этот редкий для Приморья вид найден в составе сообщества разнотравного луга на дюнах [30, 38].

### Признаки антропогенного воздействия на ландшафты

Первые признаки присутствия древнего человека в районе оз. Заря, зафиксированные в палиноспектрах появлением пыльцы хмеля, отмечены в торфе, образованном 3500–3340 л.н. Возраст близок к рубежу позднего неолита – эпохи бронзы. На берегу бухты Заря на штормовом вале известно поселение Глазковка-8, двуслойный памятник, относящийся к эпохе бронзы и средневековья\*. Многослой-

ное поселение Глазковка-2 также было заселено в эпоху бронзы. Возможно, и пыльца щавеля свидетельствует о наличии на песчаной аккумулятивной форме участков с эродированным почвенным покровом 3160–2900 л.н.

Пыльца амброзии, как маркер нарушенных участков [39], найдена в торфе, образованном 2115–2080 л.н. В это время побережье Приморья активно осваивалось. Стоянки раннего железного века (янковская культура) на побережье Восточного Приморья (археологические памятники Киевка, о-в Петрова, Олений А) датируются 2200–1800 л.н. [61]. Известны стоянки раннего железного века и в районе бухты Кит (Глазковка 5, 6, Кит-1), Валентин (археологический памятник Валентин-Перешеек) [62] и бассейне р. Черная («Сокольчи-1», кроуновская культура).

Пыльца хмеля встречена и в отложениях, образованных в X–XIII вв. Появление пыльцы капустовых и амброзии в отложениях XIII–XIV вв. также могло быть связано с освоением территории. Средневековые поселения известны на побережье бухты Заря (Глазковка-8), Кит (Глазковка-1) и Валентин (Валентин-Перешеек) [62].

Наибольшие изменения лесной растительности произошли в последние столетия. Признаки развития вторичных березняков отмечены для XV–XVI вв. Темнохвойные сократили участие в лесной растительности с середины XIX – начала XX вв. Поселок Глазковка образовался в 1897 г., здесь велась активная хозяйственная деятельность, в том числе сеяли хлеб и разводили оленей. В 1934 г. был организован оленеводческий совхоз. В 1928 г. создан Южно-Уссурийский (Судзухинский) заказник, а в 1935 г. – Лазовский (Судзухинский) заповедник, филиал Сихотэ-Алинского. В 1940 г. был образован самостоятельный заповедник, закрытый в 1951 г. на 10 лет. После закрытия заповедника с 1951 по 1957 г. на большей части территории велись лесозаготовки\*\*. Возможно, палиноспектры запечатлели изменения лесов как последствия рубок, когда на большей

\* Исторические памятники Лазовского района. URL: <https://m.ok.ru/group/50686511677588/topic/61542261607316?ysclid=mfltpomvnh967171701>

\*\* <http://old.lazovzap.ru/pages/geobotan.html>

части территории был снят заповедный режим. С 1970-х до начала 2000-х годов рубки велись и на отдельных участках будущего Национального парка «Зов тигра», организованного в 2007 г. [63]. Палиноспектры из кровли разреза отражают постепенное восстановление кедрово-широколиственных лесов на месте производных и темнохвойного пояса в горах.

## Заключение

Короткопериодные климатические изменения четко фиксируются в палиноспектрах и отражают реакцию растительности на похолодания, потепления и изменение увлажнения, связанное с интенсивностью летнего муссона и активностью циклогенеза. Сигналом кратковременных похолоданий является увеличение доли темнохвойных таксонов в палиноспектрах, отражающих в первую очередь расширение пояса елово-пихтовых лесов в среднегорье.

Выделено 20 локальных палинозон, отвечающих фазам развития растительности за 5500 лет. Продолжительность их снижается с конца среднего голоцена (450–670 лет) к позднему голоцену (240–300 лет), более часто растительность стала видоизменяться в последние 680 лет (120–160 лет).

Наибольший расцвет кедровников наблюдался в похолодание 2820–2640 л.н. Снижение его участия отмечено в фазы уменьшения увлажнения. Кедрово-широколиственные леса получали широкое распространение в теплые влажные периоды. За охваченный период наиболее длительная фаза их устойчивого развития отмечена в конце среднего голоцена (5050–4380 л.н.). Более высокие содержания пыльцы широколиственных приурочены к периодам потеплений, отдельные пики фиксируют кратковременные сухие фазы, когда шел активный перенос пыльцы с низкогогорья. Соотношение пыльцы широколиственных и темнохвойных таксонов хорошо согласуется с вариациями солнечной активности. Следует подчеркнуть, что роль темнохвойных увеличивалась в похолодание на границе среднего–позднего голоцена (холодное событие ~4200 л.н.) и в начале малого ледникового периода. Отмечен тренд

повышения роли древесных берез от среднего голоцена к позднему и современным условиям. Увеличение содержания пыльцы ольхи является индикатором уменьшения увлажнения в краевой части болота по обрамлению озера. Кустарниковый ярус стал наиболее развит начиная с 3160 л.н. в условиях ослабления летнего муссона. Поступление аллохтонной пыльцы дальнего разноса более активно проходило во второй половине позднего голоцена. В переносе спор, представленных в основном папоротниками, большую роль играл плоскостной смыв, поставивший в сильные ливни материал с лесного покрова. Выделены признаки антропогенного воздействия на ландшафты, начиная с эпохи бронзы. Наиболее значительные изменения в лесной растительности происходили в конце XIX – начале XX в. до установления заповедного режима.

## Список литературы

1. Киселев А.А., Махоткина Е.Л., Павлова Т.В. (ред.) *Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*. СПб.: Научно-технологические, 2022, 124 с.
2. Li C., Wu Ya., Hou X. Holocene vegetation and climate in Northeast China revealed from Jingbo Lake sediment. *Quaternary International*. 2011,229:67–73. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.12.015>
3. Chu G., Sun Q., Xie M., Lin Y., Shang W., Zhu Q., Shan Y., Xu D., Rioual P., Wang L., Liu J. Holocene cyclic climatic variations and the role of the Pacific Ocean as recorded in varved sediments from northeastern China. *Quaternary Science Reviews*. 2014,102:85–95. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.08.008>
4. Stebich M., Rehfeld K., Schlutz F., Tarasov P.E., Liu J., Mingram J. Holocene vegetation and climate dynamic of NE China based on the pollen record from Sihailongwan Maar Lake. *Quaternary Science Reviews*. 2015,124:275–289. <https://doi.org/10.1016/J.QUASCIREV.2015.07.021>
5. Zhang M., Bu Z., Jiang M., Wang S., Liu S., Jin Q., Shi P. Mid-late Holocene maar lake-mire transition in northeast China triggered by hydroclimatic variability. *Quaternary Science Reviews*. 2019,220:215–229. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.07.021>
6. Zhang M., Bu Z., Wang S., Jiange M. Moisture changes in Northeast China since the last deglaciation: Spatiotemporal out-of-phase patterns and possible forcing mechanisms. *Earth-Science Reviews*. 2020,201:102984. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102984>

7. Park J., Bahk J., Park J., Kim H., Choi J. Mid-to-late Holocene climate variability in coastal East Asia and its impact on ancient Korean societies. *Scientific Report*. 2023,13:15379. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42551-x>
8. Лобанов В.Б., Данченков М.А., Лучин Е.В., Мезенцева Л.И., Пономарев В.И., Соколов О.В. и др. Дальневосточные моря России. В кн.: Ясюкевич В.В., Говоркова В.А., Корнева И.А. и др. (ред.) *Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*. М.: Росгидромет, 2014, раздел 5.4, с. 684–743.
9. Мезенцева Л.И., Гришина М.А., Кондратьев И.И. Траектории и глубина циклонов, выходящих на территорию Приморского края. *Вестник ДВО РАН*. 2019,4:29–38.
10. Бышев В.И., Нейман В.Г., Пономарев В.И., Романов Ю.А., Серых И.В., Цурикова Т.В. Роль глобальной атмосферной осцилляции в формировании климатических аномалий Дальневосточного региона России. *Доклады Академии наук*. 2014,458(1):92–96. <http://dx.doi.org/10.7868/S0869565214250148>
11. Бышев В.И., Гусев А.В., Сидорова А.Н. Концептуальные основы альтернативной физической модели современного климата. *Океанологические исследования*. 2024,52(1):5–33. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(1\).1](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).1)
12. Ponomarev V.I., Trusenkov O.O., Trousenkov S.T., Ustinova E.I., Kaplunenko D.D., Polyakova A.M. The ENSO signal in the Northwest Pacific. *PICES Scientific Report*. 1999,10:9–31.
13. Park J., Park J., Yi S., Kim J.C., Lee E., Choi J. Abrupt Holocene climate shifts in coastal East Asia, including the 8.2 ka, 4.2 ka, and 2.8 ka BP events, and societal responses on the Korean Peninsula. *Scientific Reports*. 2019,9:10806. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47264-8>
14. Ding X., Hu B., Li J., Lan J., Zgeb X., Yi L. Late Holocene orbital forcing and solar activity on the Kuroshio Current of subtropical north Pacific at different time-scales. *Frontiers of Earth Science*. 2022,10:845228. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.845228>
15. Lim J., Matsumoto E. Fine aeolian quartz records in Cheju Island, Korea, during the Last 6500 years and pathway change of the westerlies over East Asia. *J. of Geophysical Research: Atmospheres*. 2008,113:D08106. <http://dx.doi.org/10.1029/2007JD008501>
16. Nagashima K., Tada R., Toyoda S. Westerly Jet – East Asian summer monsoon connection during the Holocene. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2013,14:5041–5053. <https://doi.org/10.1002/2013GC004931>
17. Безрукова Е.В., Решетова С.А., Кулагина Н.В., Щетников А.А., Филинов И.А., Кузьмин М.И. Растительность и климат на севере Минусинской котловины в позднем голоцене с декадным разрешением: запись из озера Шира. Доклады Российской академии наук. 2024,518(2):359–365. <https://doi.org/10.31857/S2686739724100181>
18. Novenko E.Yu., Mazei N.G., Kupriyanov D.A., Babeshko K.V., Kusilman M.V., Zyuganova I.S., Tsyganov A.N., Mazei Yu.A., Phelps L.N., Davis B.As. A 1300-year multi-proxy palaeoecological record from the northwest Putorana Plateau (Russian Subarctic): environmental changes, vegetation dynamics and fire history. *The Holocene*. 2023,33(2):181–193. <https://doi.org/10.1177/09596836221131693>
19. Назарова Л.Б., Разжигаета Н.Г., Головаток Л.В., Бискаборн Б.К., Гребенникова Т.А., Ганзей Л.А., Мохова Л.М., Дикман Б. Развитие экологических условий позднего голоцена в Восточном Приморье (Дальний Восток, Россия). *Сибирский экологический журнал*. 2021,3:274–290. <https://doi.org/10.15372/SEJ20210302>
20. Лящевская М.С., Базарова В.Б., Макарова Т.Р. Развитие природной среды и эволюция озера Гнилое (юго-восточное Приморье) за последние 3300 лет. *Геоморфология и палеогеография*. 2023,54(3):108–123. <https://doi.org/10.31857/S2949178923030064>
21. Разжигаета Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Копотева Т.А., Климин М.А., Арсланов Х.А. и др. Биоиндикационные признаки атмосферных аномалий в разрезах торфяников на восточном макросклоне Сихотэ-Алиня в позднем голоцене. *Тихоокеанская геология*. 2023,42(1):45–59. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-1-45-59>
22. Разжигаета Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Мохова Л.М., Чаков В.В., Копотева Т.А., Климин М.А., Симонова Г.В. Проявление глобальных похолоданий позднего голоцена на морском побережье юга Дальнего Востока. *Геоморфология и палеогеография*. 2023,54(1):112–130. <https://doi.org/10.31857/S0435428123010115>
23. Разжигаета Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Мохова Л.М., Арсланов Х.А. Озерные палеоархивы изменения природной среды полуострова Песчаный, Японское море (Южное Приморье). *Геосистемы переходных зон*. 2023,7(4):375–404. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.375-404>
24. Разжигаета Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Мохова Л.М., Белянин П.С., Кудрявцева Е.П., Шекман Е.А., Копотева Т.А., Климин М.А. Васьковское болото как природный архив изменений среды Сихотэ-Алинского биосферного района в позднем голоцене. *Тихоокеанская география*. 2025,3:44–64. [https://doi.org/10.35735/26870509\\_2025\\_23\\_4](https://doi.org/10.35735/26870509_2025_23_4)
25. Lozhkin A.V., Anderson P.M., Brown T.A., Grebennikova T.A., Korzun J.A., Tsigankova V.I. Lake development and vegetation history in coastal Primor'ye: implications for Holocene climate of the southeastern

- Russian Far East. *Boreas*. 2021,50:983–997. <https://doi.org/10.1111/bor.12477>
26. Lozhkin A.V., Cherepanova M.V., Grebennikova T.A., Anderson P.M., Brown T., Korzun J.A., Tsygankova V.I. Middle and late-Holocene coastal environments of far southeastern Russia as inferred from palynological and diatom data. *The Holocene*. 2026,36(2):223–233. <https://doi.org/10.1177/09596836251387251>
  27. Жудова П.П. *Растительность и флора Судзунского государственного заповедника Приморского края*. Владивосток: Дальневост. кн. изд-во, 1967, 245 с. (Труды Сихотэ-Алинского государственного заповедника; вып. 4).
  28. *Лазовский заповедник*. М.: Агропромиздат, 1989, 206 с.
  29. Лаптев Л.А. Физико-географическая характеристика. В кн.: Азбукина З.М. (ред.) *Флора, мико- и лишениобиота Лазовского заповедника (Приморский край)*. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990, с. 4–9.
  30. Крестов П.В., Верхолат В.П. *Редкие растительные сообщества Приморья и Приамурья*. Владивосток: ДВО РАН, 2003, 200 с.
  31. Пшеничкова Л.М. Водные растения российского Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2005, 106 с.
  32. Краснопеев С.М., Розенберг В.А. (ред.) *Атлас лесов Приморского края*. Владивосток: ДВО РАН, 2005, 76 с.
  33. Покровская И.М. Методика камеральных работ. В кн.: *Палеопалинология*. Л.: Недра, 1966, т. 1, с. 32–61. (Труды ВСЕГЕИ; т. 141)..
  34. Grimm E. *Tilia software 2.0.2*. Illinois State Museum Research and Collection Center, Springfield, 2004.
  35. Vlaauw M., Christen J.A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*. 2011,6(3):457–474.
  36. Ганзей Л.А., Разжигаева Н.Г., Нишимура Ю., Гребенникова Т.А., Кайстренко В.М., Горбунов А.О., Арсланов Х.А., Чернов С.Б., Наумов Ю.А. Осадки исторических и палеоцунами на побережье Восточного Приморья. *Тихоокеанская геология*. 2015,34(1):79–95.
  37. Короткий А.М., Караулова Л.П., Троицкая Т.С. *Четвертичные отложения Приморья. Стратиграфия и палеогеография*. Новосибирск: Наука, 1980, 234 с.
  38. Урусов В.М., Лобанова И.И., Варченко Л.И. *Хвойные Российского Дальнего Востока – ценные объекты изучения, охраны, разведения и использования*. Владивосток: Дальнаука, 2007, 440 с.
  39. Vazarova V.B., Lyashchevskaya M.S., Kudryavtseva E.P., Piskareva Y.V., Astashenkova Y.V. Holocene population of Ambrosia on South of Russian Far East. *Geography, Environment, Sustainability*. 2023,16(1):16–25. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2022-123>
  40. Zhou X., Liu X., Zhan T., Oyebanji D.B., Zhang J., Tu L., Jiang S. Low-latitude forcing on 4.2 ka event indicated by records in the Asian monsoon region. *Global and Planetary Change*. 2024,235:104401. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2024.104401>
  41. Steinhilber F., Beer J., Fröhlich C. Total solar irradiance during the Holocene. *Geophysics Research Letters*. 2009,36:L19704. <https://doi.org/10.1029/2009GL040142>
  42. Stott L., Cannariato K., Thunell R., Haug G.H., Koutavas A., Lund S. Decline of surface temperature and salinity in the western tropical Pacific Ocean in the Holocene epoch. *Nature*. 2004,431:56–59. <https://doi.org/10.1038/nature02903>
  43. Mayewski P.A., Rohling E.E., Stager J.C., Karle W., Maasch K.A., Meeker L.D., et al. Holocene climate variability. *Quaternary Research*. 2004,62:243–255.
  44. Conroy J.L., Overpeck J.T., Cole J.E., Shanahan T., Steinitz-Kannan M. Holocene changes in eastern tropical Pacific climate inferred from a Galapagos lake sediment record. *Quaternary Science Review*. 2008,27:1166–1180. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.02.015>
  45. Sakaguchi Y. Warm and cold stages in the past 7600 years in Japan and their global correlation. *Bulletin of the Department of Geography University of Tokyo*. 1983,15:1–31.
  46. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Mokhova L.M., Markarova T.R., Kudryavtseva E.P., Panichev A.M., Arslanov Kh.A. Climate and human impact on vegetation in the upper part of the Ussuri River basin in late Holocene, Russian Far East. *Geography, Environment, Sustainability*. 2019,2(12):162–172.
  47. Wanner H., Solomina O., Grosjean M., Ritz S.P., Jettel M. Structure and origin of Holocene cold events. *Quaternary Science Review*. 2011,30:3109–3123. <https://doi.org/10.1016/J.QUASCIREV.2011.07.010>
  48. Gorbarenko S.A., Shi X., Liu Y., Bosin A.A., Vasilenko Y.P., Artemova A.V., Yanchenko E.A., Zou J., Yao Z., Kirichenko I.S. Reconstructing Holocene centennial cooling events: synthesized temperature changes, chronology, and forcing in the Northern Hemisphere. *Frontiers of Earth Science*. 2024,12:1415180. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1415180>
  49. Lozhkin A., Minyuk P., Cherepanova M., Anderson P., Finney B. Holocene environments of central Iturup Island, southern Kuril archipelago, Russian Far East. *Quaternary Research*. 2017,88:23–38. <https://doi.org/10.1017/qua.2017.21>
  50. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Kudryavtseva E.P., Arslanov Kh.A.,

- Maksimov F.E., Starikova A.A. Landscape and environmental changes of Eastern Primorye coast at middle–late Holocene: climatic changes and human impact effects. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018,158:160–172. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.02.013>
51. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Мохова Л.М., Макарова Т.Р., Паничев А.М., Кудрявцева Е.П., Арсланов Х.А., Максимов Ф.Е., Старикова А.А. Развитие ландшафтов Шкотовского плато Сихотэ-Алиня в позднем голоцене. *Известия РАН. Серия географическая*. 2016,3:65–80. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-3-65-80>
  52. Razjigaeva N., Ganzey L., Grebennikova T., Ponomarev V. “Cold-Dry” and “Cold-Wet” events in the Late Holocene, Southern Russian Far East. *Climate*. 2023,11:91. <https://doi.org/10.3390/cli11040091>
  53. Park J., Park J., Yi S., Lim J., Kim J.C., Jin Q., Choi J. Holocene hydroclimate reconstruction based on pollen, XRF, and grain-size analysis and its implications for past societies of the Korean Peninsula. *The Holocene*. 2021,31(9):1489–1500. <https://doi.org/10.1177/09596836211019115>
  54. Wanner H., Pfister C., Neukom R. The variable European Little Ice Age. *Quaternary Science Reviews*. 2022,287:107531. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107531>
  55. Базарова В.Б., Макарова Т.Р., Лящевская М.С., Макаревич Р.А., Разжигаева Н.Г., Гельман Е.И., Пискарева Я.Е., Асташенкова Е.В. Природные обстановки пойменного осадконакопления в малый ледниковый период в дельтовой зоне р. Цукановки (юго-западное Приморье). *Тихоокеанская геология*. 2025,44(3):72–89. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2025-44-3-72-89>
  56. Park J., Han J., Jin Q., Bahk J., Yi S. The link between ENSO-like forcing and hydroclimate variability of coastal East Asia during the Last Millennium. *Scientific Reports*. 2017,7:8166. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08538-1>
  57. Dziziurowa V.D., Korznikov K.A., Petrenko T.Y., Dudov S.V., Krestov P.V. Assessment of the mixed coniferous broadleaved forest canopy disturbance induced by typhoon Maysak (2020) using drone-borne images near Vladivostok, Russia. *Botanica Pacifica*. 2022,11(2):81–87. <https://doi.org/10.17581/bp.2022.11214>
  58. Usoskin I.G., Solanki S.K., Kovaltsov G.A. Grand minima and maxima of solar activity: New observational constraints. *Astronomy & Astrophysics*. 2007,471(1):301–309. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077704>
  59. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Ponomarev V.I., Makhova L.M., Grebennikova T.A. Application bioaerosol records for recovery of atmospheric circulation anomalies over the Kuril Islands in the Late Glacial-Holocene. *Quaternary Science Review*. 2025,353:109222. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2025.109222>
  60. Мохова Л.М. Особенности состава спорово-пыльцевого дождя во время прохождения пыльных бурь на юге Дальнего Востока. В кн.: Афонин С.А., Токарев П.И. (ред.). *Материалы XI Всероссийской палинологической конференции*. М.: ПИ РАН, 2005, с. 173–174.
  61. Кузмин Я.В., Болдин В.И., Никитин Ю.Г. Хронология культур раннего железного века и средневековья Приморья. *Россия и АТР*. 2005,4:44–53.
  62. Андреева Ж.В., Гарковик А.В., Жущиховская И.С., Кононенко Н.А. (ред.) *Валентин-перешеек – поселок древних рудокопов*. М.: Наука, 1987, 248 с.
  63. Бакланов П.Я., Берсенев Ю.И. (ред.) *Национальный парк «Зов тигра»*. Владивосток: Дальнаука, 2014, 147 с.

## References

1. Kiselev A.A., Makhotkina E.L., Pavlova T.V. (eds) [*The Third assessment report on climate change and its impacts on the territory of the Russian Federation*]. St.-Petersburg: Naukoemkie Tekhnologii [High-Tech Publ.], 2022, 124 p. (In Russ.).
2. Li C., Wu Ya., Hou X. Holocene vegetation and climate in Northeast China revealed from Jingbo Lake sediment. *Quaternary International*. 2011,229:67–73. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.12.015>
3. Chu G., Sun Q., Xie M., Lin Y., Shang W., Zhu Q., Shan Y., Xu D., Rioual P., Wang L., Liu J. Holocene cyclic climatic variations and the role of the Pacific Ocean as recorded in varved sediments from northeastern China. *Quaternary Science Reviews*. 2014,102:85–95. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.08.008>
4. Stebich M., Rehfeld K., Schlutz F., Tarasov P.E., Liu J., Mingram J. Holocene vegetation and climate dynamic of NE China based on the pollen record from Sihailongwan Maar Lake. *Quaternary Science Reviews*. 2015,124:275–289. <https://doi.org/10.1016/J.QUASCIREV.2015.07.021>
5. Zhang M., Bu Z., Jiang M., Wang S., Liu S., Jin Q., Shi P. Mid-late Holocene maar lake-mire transition in northeast China triggered by hydroclimatic variability. *Quaternary Science Reviews*. 2019,220:215–229. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.07.021>
6. Zhang M., Bu Z., Wang S., Jiange M. Moisture changes in Northeast China since the last deglaciation: Spatiotemporal out-of-phase patterns and possible forcing mechanisms. *Earth-Science Reviews*. 2020,201:102984. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102984>
7. Park J., Bahk J., Park J., Kim H., Choi J. Mid-to-late Holocene climate variability in coastal East Asia and its impact on ancient Korean societies. *Scientific Report*.

- 2023,13:15379. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42551-x>
8. Lobanov V.B., Danchenkov M.A., Luchin E.V., Mesentseva L.I., Ponomarev V.I., Sokolov O.V., et al. Far East Seas of Russia. In: Yasyukevich V.V., Govorkova V.A., Korneva I.A., et al. (eds) [*Roshydromet's second assessment report on climate change and its impacts on the territory of the Russian Federation*]. Moscow: Rosgidromet, 2014, Chapter 5.4, p. 684–743. (In Russ.).
  9. Mezentseva M.I., Grishina M.A., Kondrat'ev I.I. Trajectories and depth of cyclones entering the territory of Primorsky Krai. *Vestnik of the FEB RAS*. 2019,4:29–38. (In Russ.).
  10. Byshev V.I., Neiman V.G., Ponomarev V.I., Romanov Y.A., Serykh I.V., Tsurikova T.V. The influence of global atmospheric oscillation on formation of climate anomalies in the Russian Far East. *Doklady Earth Sciences*. 2014,458(1):1116–1120. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14090025>
  11. Byshev V.I., Gusev A.V., Sidorova A.N. Conceptual foundations of an alternative physical model of modern climate. *Journal of Oceanological Research*. 2024,52(1):5–33. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(1\).1](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).1) (In Russ.).
  12. Ponomarev V.I., Trusenkova O.O., Trousenkov S.T., Ustinova E.I., Kaplunenko D.D., Polyakova A.M. The ENSO signal in the Northwest Pacific. *PICES Scientific Report*. 1999,10:9–31.
  13. Park J., Park J., Yi S., Kim J.C., Lee E., Choi J. Abrupt Holocene climate shifts in coastal East Asia, including the 8.2 ka, 4.2 ka, and 2.8 ka BP events, and societal responses on the Korean Peninsula. *Scientific Reports*. 2019,9:10806. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47264-8>
  14. Ding X., Hu B., Li J., Lan J., Zgeb X., Yi L. Late Holocene orbital forcing and solar activity on the Kuroshio Current of subtropical north Pacific at different time-scales. *Frontiers of Earth Science*. 2022,10:845228. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.845228>
  15. Lim J., Matsumoto E. Fine aeolian quartz records in Cheju Island, Korea, during the Last 6500 years and pathway change of the westerlies over East Asia. *J. of Geophysical Research: Atmospheres*. 2008,113:D08106. <http://dx.doi.org/10.1029/2007JD008501>
  16. Nagashima K., Tada R., Toyoda S. Westerly Jet – East Asian summer monsoon connection during the Holocene. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2013,14:5041–5053. <https://doi.org/10.1002/2013GC004931>
  17. Bezrukova E.V., Reshetova S.A., Kulagina N.V., Shchetnikov A.A., Filinov I.A., Kuzmin M.I. Vegetation and climate in the north of the Minusinsk basin in the late Holocene: a record from shira lake resolved by decade. *Doklady Earth Sciences*. 2024,518(2):1755–1760. <https://doi.org/10.1134/S1028334X2460316X>
  18. Novenko E.Yu., Mazei N.G., Kupriyanov D.A., Babeshko K.V., Kusilman M.V., Zyuganova I.S., Tsyganov A.N., Mazei Yu.A., Phelps L.N., Davis B.As. A 1300-year multi-proxy palaeoecological record from the northwest Putorana Plateau (Russian Subarctic): environmental changes, vegetation dynamics and fire history. *The Holocene*. 2023,33(2):181–193. <https://doi.org/10.1177/09596836221131693>
  19. Nazarova L.B., Razjigaeva N.G., Golovatyuk L.V., Biskaborn B.K., Grebennikova T.A., Ganzey L.A., Mokhova L.M., Diekmann B. Reconstruction of environmental conditions in the Eastern Part of Primorsky Krai (Russian Far East) in the Late Holocene. *Contemporary Problems of Ecology*. 2021,14:218–230. <https://doi.org/10.1134/S1995425521030094>
  20. Lyashchevskaya M.S., Bazarova V.B., Makarova T.R. Environment development and the evolution of Gniloe Lake (south-eastern Primorye) during the last 3300 years. *Geomorphology and Paleogeography*. 2023,54(3):108–123. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178923030064>
  21. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Kopoteva T.A., Klimin M.A., Arslanov Kh.A., et al. Atmospheric anomaly bioindicators in peat sections on the eastern macroslope of the Sikhote-Alin Range in the Late Holocene. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2023,17(1):41–53. <https://doi.org/10.1134/S1819714023010086>
  22. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Chakov V.V., Klimin M.A., Simonova G.V. Global cooling events of the Late Holocene preserved in the coastal sediments in the southern Far East of Russia. *Geomorphology and Paleogeography*. 2023,54(1):112–130. <https://doi.org/10.31857/S0435428123010115>
  23. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Arslanov Kh.A. Lacustrine paleoarchives of environmental changes of Peschany Peninsula, Sea of Japan (South Primorye). *Geosistemy pererodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*. 2023,7(4):375–404. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.375-404>
  24. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Belyanin P.S., Kudryavtseva E.P., Shekman E.A., Kopoteva T.A., Klimin M.A. Vaskovskoye Peatland as a natural archive of environmental changes in the Sikhote-Alin Biosphere Region in the late Holocene. *Pacific Geography*. 2025,3:44–64. (In Russ.). [https://doi.org/10.35735/26870509\\_2025\\_23\\_4](https://doi.org/10.35735/26870509_2025_23_4)
  25. Lozhkin A.V., Anderson P.M., Brown T.A., Grebennikova T.A., Korzun J.A., Tsigankova V.I. Lake development and vegetation history in coastal Primor'ye: implications for Holocene climate of the southeastern Russian Far East. *Boreas*. 2021,50:983–997. <https://doi.org/10.1111/bor.12477>

26. Lozhkin A.V., Cherepanova M.V., Grebennikova T.A., Anderson P.M., Brown T., Korzun J.A., Tsygankova V.I. Middle and late-Holocene coastal environments of far southeastern Russia as inferred from palynological and diatom data. *The Holocene*. 2026,36(2):223–233. <https://doi.org/10.1177/09596836251387251>
27. Zhudova P.P. [Vegetation and flora of Sudzukhinsky State Reserve of Primorye]. Vladivostok: Far East Publ., 1967, 245 p. (Bull. of Sikhote-Alin State Reserve; Issue 4). (In Russ.).
28. [Lazovsky Reserve]. Moscow: Agropromisdat, 1989, 206 p. (In Russ.).
29. Laptev L.A. Physical and geographical characteristics. In: Azbukina Z.M. (ed) *Flora, micro- and lichen biota of the Lazovskiy Reserve (Primorye)*. Vladivostok: Far East Branch of USSR Academy of Sciences, 1990, p. 4–9. (In Russ.).
30. Krestov P.V., Verkholat V.P. *Rare plant communities of Amur region*. Vladivostok: FEB RAS, 2003, 200 p. (In Russ.).
31. Pshennikova L.M. *Aquatic plants of Russian Far East*. Vladivostok: Dalnauka, 2005, 106 p. (In Russ.).
32. Krasnopeev S.P., Rozenberg V.A. (eds) *Atlas of forests of Primorye*. Vladivostok: FEB RAS, 2005, 76 p. (In Russ.).
33. Pokrovskaya I.M. A technique of cameral works. In: *Paleopalynology*. Leningrad: Nedra, 1966, vol. 1, p. 32–61. (Trudy VSEGEI; 141). (In Russ.).
34. Grimm E. *Tilia software 2.0.2*. Illinois State Museum Research and Collection Center, Springfield, 2004.
35. Blaauw M., Christen J.A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*. 2011,6(3):457–474.
36. Ganzey L.A., Razjigaeva N.G., Nishimura Yu., Grebennikova T.A., Kaistrenko V.M., Gorbunov A.O., Arslanov Kh.A., Chernov S.B., Naumov Yu.A. Deposits of historical and paleotsunamis on the Coast of Eastern Primorye. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2015,9(1):64–79. <https://doi.org/10.1134/S1819714015010029>
37. Korotkii A.M., Karaulova L.P., Troitskaya T.S. *Quaternary deposits of Primorye. Stratigraphy and paleogeography*. Novosibirsk: Nauka, 1980, 234 p. (In Russ.).
38. Urusov V.M., Lobanova I.I., Varchenko L.I. [Conifers of Russian Far East – valuable object of the study, protection, breeding and use]. Vladivostok: Dalnauka, 2007, 440 p. (In Russ.).
39. Bazarova V.B., Lyashchevskaya M.S., Kudryavtseva E.P., Piskareva Y.V., Astashenkova Y.V. Holocene population of Ambrosia on South of Russian Far East. *Geography, Environment, Sustainability*. 2023,16(1):16–25. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2022-123>
40. Zhou X., Liu X., Zhan T., Oyebanji D.B., Zhang J., Tu L., Jiang S. Low-latitude forcing on 4.2 ka event indicated by records in the Asian monsoon region. *Global and Planetary Change*. 2024,235:104401. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2024.104401>
41. Steinhilber F., Beer J., Fröhlich C. Total solar irradiance during the Holocene. *Geophysics Research Letters*. 2009,36:L19704. <https://doi.org/10.1029/2009GL040142>
42. Stott L., Cannariato K., Thunell R., Haug G.H., Koutavas A., Lund S. Decline of surface temperature and salinity in the western tropical Pacific Ocean in the Holocene epoch. *Nature*. 2004,431:56–59. <https://doi.org/10.1038/nature02903>
43. Mayewski P.A., Rohling E.E., Stager J.C., Karle W., Maasch K.A., Meeker L.D., et al. Holocene climate variability. *Quaternary Research*. 2004,62:243–255.
44. Conroy J.L., Overpeck J.T., Cole J.E., Shanahan T., Steinitz-Kannan M. Holocene changes in eastern tropical Pacific climate inferred from a Galapagos lake sediment record. *Quaternary Science Review*. 2008,27:1166–1180. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.02.015>
45. Sakaguchi Y. Warm and cold stages in the past 7600 years in Japan and their global correlation. *Bulletin of the Department of Geography University of Tokyo*. 1983,15:1–31.
46. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Mokhova L.M., Markarova T.R., Kudryavtseva E.P., Panichev A.M., Arslanov Kh.A. Climate and human impact on vegetation in the upper part of the Ussuri River basin in late Holocene, Russian Far East. *Geography, Environment, Sustainability*. 2019,2(12):162–172.
47. Wanner H., Solomina O., Grosjean M., Ritz S.P., Jettel M. Structure and origin of Holocene cold events. *Quaternary Science Review*. 2011,30:3109–3123. <https://doi.org/10.1016/J.QUASCIREV.2011.07.010>
48. Gorbarenko S.A., Shi X., Liu Y., Bosin A.A., Vasilenko Y.P., Artemova A.V., Yanchenko E.A., Zou J., Yao Z., Kirichenko I.S. Reconstructing Holocene centennial cooling events: synthesized temperature changes, chronology, and forcing in the Northern Hemisphere. *Frontiers of Earth Science*. 2024,12:1415180. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1415180>
49. Lozhkin A., Minyuk P., Cherepanova M., Anderson P., Finney B. Holocene environments of central Iturup Island, southern Kuril archipelago, Russian Far East. *Quaternary Research*. 2017,88:23–38. <https://doi.org/10.1017/qua.2017.21>
50. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Kudryavtseva E.P., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Starikova A.A. Landscape and environmental changes of Eastern Primorye coast at middle-late Holocene: climatic changes and human impact effects. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018,158:160–172. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.02.013>

51. Razzhigaeva N.G., Ganzey L.A., Mokhova L.M., Makarova T.R., Panichev A.M., Kudryavtseva E.P., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Starikoiva A.A. The development of landscapes of the Shkotovo Plateau of Sikhote-Alin in the Late Holocene. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2016,3:65–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-3-65-80>
52. Razjigaeva N., Ganzey L., Grebennikova T., Ponomarev V. “Cold-Dry” and “Cold-Wet” events in the Late Holocene, Southern Russian Far East. *Climate*. 2023,11:91. <https://doi.org/10.3390/cli11040091>
53. Park J., Park J., Yi S., Lim J., Kim J.C., Jin Q., Choi J. Holocene hydroclimate reconstruction based on pollen, XRF, and grain-size analysis and its implications for past societies of the Korean Peninsula. *The Holocene*. 2021,31(9):1489–1500. <https://doi.org/10.1177/09596836211019115>
54. Wanner H., Pfister C., Neukom R. The variable European Little Ice Age. *Quaternary Science Reviews*. 2022,287:107531. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107531>
55. Bazarova V.B., Makarova T.R., Lyashchevskaya M.S., Makarevich R.A., Razzhigaeva N.G., Gelman E.I., Piskareva Ya.E., Astashenkova E.V. Environmental conditions of floodplain sedimentation during the Little Ice Age in the deltaic zone of the Tsukanovka River (Southwestern Primorye). *Russian Journal of Pacific Geology*. 2025,19(3):284–300. <https://doi.org/10.1134/S181971402570006X>
56. Park J., Han J., Jin Q., Bahk J., Yi S. The link between ENSO-like forcing and hydroclimate variability of coastal East Asia during the Last Millennium. *Scientific Reports*. 2017,7:8166. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08538-1>
57. Dziziurova V.D., Korznikov K.A., Petrenko T.Y., Dudov S.V., Krestov P.V. Assessment of the mixed coniferous broadleaved forest canopy disturbance induced by typhoon Maysak (2020) using drone-borne images near Vladivostok, Russia. *Botanica Pacifica*. 2022,11(2):81–87. <https://doi.org/10.17581/bp.2022.11214>
58. Usoskin I.G., Solanki S.K., Kovaltsov G.A. Grand minima and maxima of solar activity: New observational constraints. *Astronomy & Astrophysics*. 2007,471(1):301–309. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077704>
59. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Ponomarev V.I., Mokhova L.M., Grebennikova T.A. Application bioaerosol records for recovery of atmospheric circulation anomalies over the Kuril Islands in the Late Glacial-Holocene. *Quaternary Science Review*. 2025,353:109222. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2025.109222>
60. Mokhova L.M. [Features of pollen rain composition during dust storms on South Far East]. In: Afonin S.A., Tokarev P.I. (eds) *Proceeding of XI Russian Pollen Conference*. Moscow: PI RAN, 2005, p. 173–174. (In Russ.).
61. Kuzmin Ya.V., Boldin V.I., Nikitin Yu.G. [Chronology of cultured of Early Iron Age and Medieval Time of Primorye]. *Russia and ATR*, 2005,4:44–53. (In Russ.).
62. Andreeva Zh.V., Garkovik A.V., Zhushikovskaya I.S., Kononenko N.A. (eds) [*Valentin-Peresheek – the settlement of ancient miners*]. Moscow: Nauka, 1987, 248 p. (In Russ.).
63. Baklanov P.Ya., Bersenev Yu.I. (eds) *National Park «Zov tигра»*. Vladivostok: Dalnauka, 2014, 147 p. (In Russ.).

## Об авторах

✉ **Разжигаева Надежда Глебовна**, доктор географических наук, главный научный сотрудник лаборатории палеогеографии и геоморфологии, Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток; ведущий научный сотрудник лаборатории глобальных климатических вызовов, Институт географии РАН, Москва, Россия, [nadyar@tigdvo.ru](mailto:nadyar@tigdvo.ru). <https://orcid.org/0000-0001-7936-1797>

**Ганзей Лариса Анатольевна**, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории палеогеографии и геоморфологии, Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия, [lganzey@mail.ru](mailto:lganzey@mail.ru). <https://orcid.org/0000-0002-2538-6603>

**Мохова Людмила Михайловна**, научный сотрудник лаборатории палеогеографии и геоморфологии, Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия. <https://orcid.org/0000-0003-0396-4756>

## About the Authors

✉ **Razjigaeva, Nadezhda G.**, Doctor Sci. in Geography, Principal Researcher of the Laboratory of paleogeography and geomorphology, Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok; Leading Researcher, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, [nadyar@tigdvo.ru](mailto:nadyar@tigdvo.ru). <https://orcid.org/0000-0001-7936-1797>

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

**Mokhova, Ludmila M.**, Researcher of the Laboratory of paleogeography and geomorphology, Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-0396-4756>

Поступила 14.01.2026

Принята к публикации 13.02.2026

Received 14 January 2026

Accepted 13 February 2026



## Значимые аномалии ТПО в северо-западной части Тихого океана по данным реанализа ERA5

Г. В. Шевченко<sup>1,2</sup>, Д. М. Ложкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО), Южно-Сахалинск, Россия

<sup>2</sup> Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

**Резюме.** Проанализированы данные реанализа ERA5 (температура поверхности океана, приземное атмосферное давление, скорость и направление ветра) за 1998–2023 гг. в северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морях. Основной задачей исследования было определение статистических характеристик аномалий ТПО и характера пространственного распределения наиболее значительных из них. Рассмотрены также распределения приземного атмосферного давления и скорости ветра в период их формирования для оценки возможной роли метеорологических условий в отклонениях термических условий от нормы. Показано, что значительные события (отклонения фактических среднемесячных значений, превышающие удвоенную величину среднеквадратического отклонения на не менее чем 5 % площади изучаемой акватории) нередки. Отрицательные аномалии составляли около 9 %, а положительные 14 % от всех рассматриваемых ситуаций. Эти аномалии неравномерно распределены во времени: на начальном отрезке преобладали отрицательные, на заключительном – положительные. С 2003 по 2019 г. наблюдался период относительной стабильности термического режима. Метеорологические условия в период формирования аномалий ТПО также отличались от обычных, но механизм их влияния неясен. Аномалии потоков скрытого и явного тепла в большинстве случаев были сравнительно невелики и редко наблюдались в районах формирования значимых аномалий ТПО.

**Ключевые слова:** температура поверхности океана, аномалия ТПО, приземное атмосферное давление, скорость ветра, поток скрытого тепла, поток явного тепла, северо-западная часть Тихого океана

## Significant SST anomalies in the northwestern Pacific Ocean based on ERA5 reanalysis data

Georgy V. Shevchenko<sup>1,2</sup>, Dmitry M. Lozhkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (SakhNIRO), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

**Abstract.** The ERA5 reanalysis data (ocean surface temperature, surface atmospheric pressure and wind speed and direction) for 1998–2023 in the northwestern part of the Pacific Ocean and the Far Eastern seas were analyzed. The main objective of the study was to determine the statistical characteristics of SST anomalies and the nature of the spatial distribution of the most significant ones. The distributions of surface atmospheric pressure and wind speed during their formation were also considered to assess the possible role of meteorological conditions in deviations of thermal conditions from the norm. We found that significant events (deviations of the actual average monthly values, which exceeded twice the value of the standard deviation by at least 5 % of the studied water area) are not rare. Negative anomalies accounted for about 9 %, and positive anomalies accounted for 14 % of all situations considered. These anomalies are unevenly distributed over time: negative anomalies predominated in the initial period, while positive anomalies prevailed in the final period. A period of relative thermal stability was observed from 2003

to 2019. Meteorological conditions during the formation of SST anomalies also differed from normal; however, the mechanism underlying their influence remains unclear. Anomalies in latent and sensible heat fluxes were, in most cases, relatively small.

**Keywords:** sea surface temperature, SST anomaly, surface atmospheric pressure, wind speed, latent heat flux, sensible heat flux, northwest Pacific Ocean

**Для цитирования:** Шевченко Г.В., Ложкин Д.М. Значимые аномалии ТПО в северо-западной части Тихого океана по данным реанализа ERA5. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 1, с. 57–68. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.1.057-068>; <https://www.elibrary.ru/tkestg>

**For citation:** Shevchenko G.V., Lozhkin D.M. Significant SST anomalies in the northwestern Pacific Ocean based on ERA5 reanalysis data. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 1, p. 57–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.1.057-068>; <https://www.elibrary.ru/tkestg>

## Введение

В условиях меняющегося климата термические условия в традиционных областях промысла российских рыбодобывающих компаний Дальневосточного региона (северо-западная часть Тихого океана (далее СЗТО) и дальневосточные моря) утратили стабильность, что негативно влияет на численность и состояние популяций, а также формирование промысловых скоплений пелагических рыб. Наиболее ярким примером этого является смещение косяков сайры от южных Курильских островов в северном направлении, что привело к снижению ее уловов, но зато в этом районе возросла добыча сардины [1]. Считается, что потепление океана привело к снижению численности такого важного для экономики региона вида, как горбуша. Эти обстоятельства определяют интерес к изучению пространственно-временной изменчивости температуры поверхностного слоя океана как важного фактора, влияющего на состояние популяций промысловых рыб [2]. В частности, к формированию значительных по величине и наблюдающихся на существенной части площади изучаемой акватории аномалий температуры поверхности океана (ТПО). В данном районе существенные отклонения термических условий в поверхностном слое от нормальных наблюдаются нередко [3, 4]. В последнее время возрос интерес к аномалиям специфического характера, которые можно отнести к «морским волнам тепла» [5, 6]. Они выявлены и в районе п-ова Камчатка [7].

Формирование значительных аномалий может быть связано с двумя основными причинами: 1) вариациями транспорта теплой воды режимообразующим течением Куроисио и его япономорской ветвью – Цусимским течением, 2) особенностями метеорологических условий (прежде всего ветровых), определяющих в значительной мере характер взаимодействия между атмосферой и океаном.

Интересно, что ряд исследований был посвящен противоположно направленным процессам, а именно влиянию аномалий температуры в поверхностном слое океана на атмосферную циркуляцию [8–10]. Вообще интерес к взаимному влиянию значительных отклонений от нормы в нижнем слое атмосферы и в океане сформировался достаточно давно [11], тем не менее и сейчас этот вопрос достаточно актуален.

Характер пространственного распределения приземного атмосферного давления над Дальним Востоком во многом определяет погодные условия в регионе – тип атмосферной циркуляции и температуру атмосферного воздуха, а также термические условия в поверхностном слое воды в дальневосточных морях и прилегающей северо-западной части Тихого океана. Поэтому исследованию пространственно-временной изменчивости метеорологических полей посвящен ряд работ специалистов рыбопромысловой науки [12–16]. В этих работах рассматриваются преимущественно особенности отдельных лет, когда гидрометеорологические условия в регионе отличались от типичных, а также предприняты попытки

поиска закономерностей в межгодовых вариациях приземного атмосферного давления.

Взаимосвязь между пространственно-временными вариациями этого параметра и температурой поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий проанализирована в работе [17], в которой для этой цели применялось разложение соответствующих полей по естественным ортогональным функциям (ЕОФ). Было показано, что отрицательные аномалии у юго-восточного побережья о. Сахалин, послужившие причиной задержки выпуска молоди с лососевых рыболовных заводов, сформировались из-за необычного характера пространственного распределения приземного атмосферного давления и атмосферной циркуляции (летний муссон был ослаблен). Аналогичные примеры приведены в [18]. В настоящее время для подобных исследований можно использовать материалы реанализов, которые представлены на различных порталах, в частности таких популярных, как Copernicus и NCEP. Данная работа основана на данных реанализа ERA5 по температуре поверхности океана, приземному атмосферному давлению и скорости ветра за 1998–2023 гг.

Главной целью было определить статистические характеристики и пространственное распределение значительных аномалий температуры поверхности океана в северо-западной части Тихого океана и выявить метеорологические факторы, влияющие на их формирование. В частности, была поставлена задача рассмотреть особенности поля ветра при экстраординарных термических условиях в поверхностном слое воды в изучаемом районе. Мы исходили также из предположения, что ветровое воздействие на поверхность океана может отражаться в потоках скрытого и явного тепла, так как эти элементы теплового баланса существенно зависят от его силы.

## Материалы и методы исследования

Для характеристики поля гидрометеорологических параметров использовались данные реанализа ERA5 за 1998–2023 гг. о при-

земном атмосферном давлении, проекциях векторов скорости ветра на параллель и на меридиан и температуре поверхности океана. Рассматриваемая область была ограничена координатами 35–60° с.ш. и 130–180° в.д., пространственное разрешение четверть градуса, дискретность по времени 1 мес. Применялись стандартные методы статистического анализа: построение усредненных распределений для различных месяцев года, расчет среднеквадратических отклонений и экстремальных значений для каждой пространственной ячейки изучаемой области. Выделение наиболее значимых аномалий проводилось по методике, описанной в статье [21]. В каждой пространственной ячейке области для каждого момента времени (месяца и года) разность между текущим и средним многолетним значениями (аномалия) сравнивалась с удвоенной величиной среднеквадратического отклонения. Если значение параметра отклоняется от нормы более чем на  $2\sigma$ , то, исходя из естественного предположения о соответствии распределения отклонений нормальному закону, можно говорить об экстраординарности ситуации. Если ячеек, в которых наблюдается такая ситуация, достаточно много (аномалия отмечена на существенной части изучаемой акватории), то можно говорить об экстремальных термических условиях в изучаемом районе в данный момент времени.

Проведена оценка статистических характеристик положительных и отрицательных аномалий, отдельно рассмотрены ситуации, когда площадь, занимаемая значительной аномалией, превышала 10 % от площади изучаемой акватории. Для них также отобраны и проанализированы пространственные распределения поля приземного атмосферного давления и скорости ветра, визуально оценены их отклонения от средних многолетних значений. Рассмотрены данные об аномалиях потока скрытого и явного тепла в анализируемый промежуток времени, рассчитанные ранее [19, 20].

Влияние метеорологических факторов на формирование отклонений термических условий от типичных анализировалось качественно, методика количественной оценки пока в стадии разработки.

## Результаты и обсуждение

### Статистические характеристики аномалий ТПО

Общая характеристика сезонных и межгодовых вариаций ТПО в рассматриваемом регионе была дана в работе [3], поэтому сразу начнем с анализа термических условий, существенно отличавшихся от обычных. Результаты расчета по описанной выше методике представлены на рис. 1 в виде гистограммы, отражающей долю площади изучаемого района, занятую отрицательными и положительными аномалиями для каждого момента времени.

Из рисунка видно, что значимые аномалии (к таковым относились занимавшие не менее 5 % площади рассматриваемой акватории) наблюдались неравномерно в течение анализируемого периода. На начальном отрезке преобладали отрицательные отклонения от нормы, в особенности в 1999 г. (превышали 5% порог с мая по сентябрь включительно) и 2001 г. (с января по октябрь, исключая апрель). Всего таких ситуаций было 29 из 312 мес. (9 %).

Затем продолжительное время система находилась в более устойчивом состоянии. С 2003 по 2019 г. только однажды – в ноябре

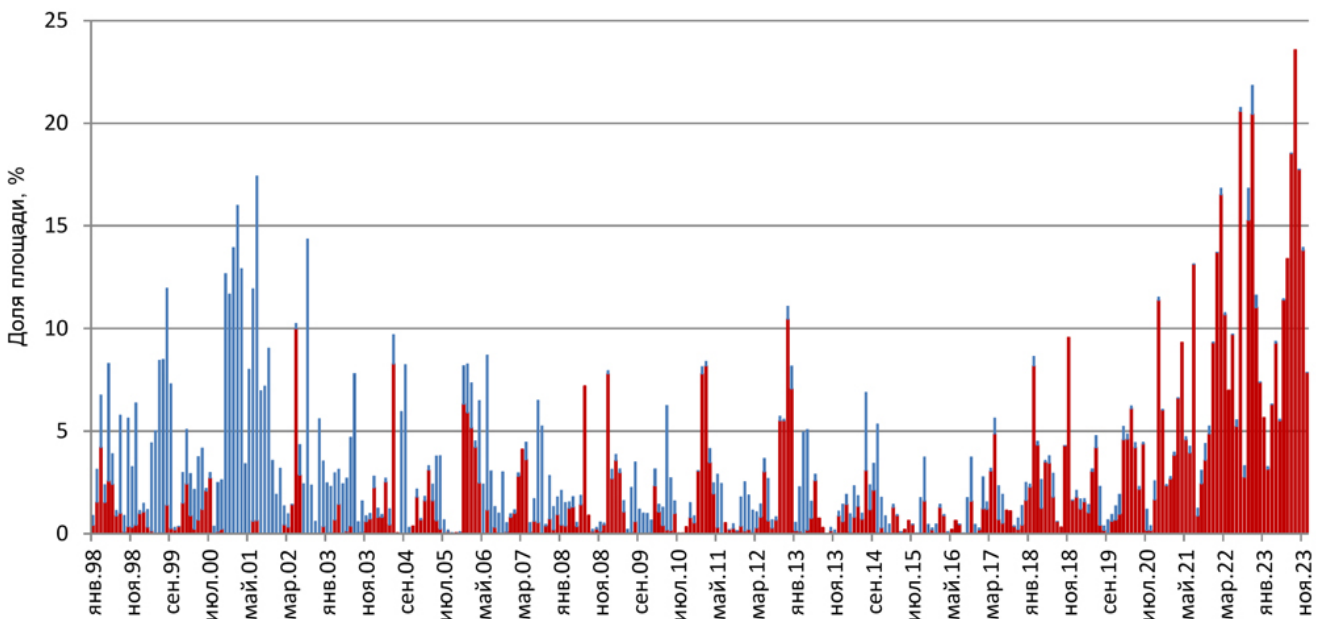
2012 г. – наблюдалась положительная аномалия на более чем 10 % площади района. С 2020 г. устойчивость нарушилась, и значимые положительные аномалии отмечались гораздо чаще, что, вероятно, можно рассматривать как проявление глобального потепления в СЗТО. Ситуаций, когда площадь положительной аномалии превышала 5 % площади изучаемой области, было больше – 44 (повторяемость 14 %). В 2022–2023 гг. подобные явления наблюдались почти круглогодично, в 2022 г. исключение составил февраль, в 2023 – август.

Рассмотрим детально экстраординарные события, когда доля площади превышала 10 % (см. таблицу).

### Анализ экстраординарных ситуаций

Прежде чем приступить к анализу наиболее значительных событий, которые можно характеризовать как «термические катастрофы» [22], рассмотрим характерные поля метеорологических параметров в различные сезоны года, чтобы сравнить их с метеорологическими условиями в период, когда наблюдались аномалии ТПО.

На рис. 2 представлены среднемесячные векторы скорости ветра, наложенные на пространственное распределение приземного



**Рис. 1.** Доля площади изучаемого района (в %), занятая отрицательными (синие фигуры) и положительными (красные) аномалиями ТПО, превышающими величину  $2\sigma$ .

**Fig. 1.** The percentage of the study area occupied by negative (blue) and positive (red) SST anomalies exceeding  $2\sigma$ .

**Таблица.** Время возникновения значительных положительных и отрицательных аномалий ТПО в СЗТО и доля площади изучаемого района ( $S$ , %), занятая ими

**Table.** The time of occurrence of significant positive and negative SST anomalies in the NW Pacific Ocean and the percentage of the study area ( $S$ , %) occupied by them

Год	Месяц	$S$ , %
<i>Положительные (positive) аномалии</i>		
2012	11	10.46
2020	10	11.37
2021	7	13.13
2022	1	13.70
2022	2	16.52
2022	3	10.67
2022	7	20.58
2022	9	15.27
2022	10	20.44
2022	11	11.03
2023	6	11.38
2023	7	13.38
2023	8	18.53
2023	9	23.55
2023	10	17.74
2023	11	13.81
<i>Отрицательные (negative) аномалии</i>		
1999	8	10.58
2000	11	12.65
2000	12	11.66
2001	1	13.93
2001	2	15.99
2001	3	12.88
2001	6	11.32
2001	7	16.79
2002	8	14.35

атмосферного давления, для различных сезонов года: зимы (январь), весны (апрель), лета (июль) и осени (октябрь). Они характеризуют известные особенности сезонной пространственно-временной изменчивости метеорологических полей над северо-западной частью Тихого океана [23].

Зимой атмосферную циркуляцию над северо-западной частью Тихого океана в основном определяет наличие мощного крупномасштабного минимума приземного атмосферного давления – Алеутской депрессии, центр которой, как отмечалось выше, находится в центральной части Алеутской островной дуги. Вокруг этого минимума формируется циклонический круговорот, который определяет воздушные потоки не только над СЗТО, но и над дальневосточными морями (зимний муссон). Это сильные и устойчивые ветры, во многом определяющие взаимодействие между атмосферой и океаном (влияют на формирование потоков скрытого и явного тепла и иные процессы).

Весной градиенты приземного атмосферного давления невелики, атмосферная циркуляция не выражена. В несколько меньшей степени это относится к метеорологическим условиям в осенний период: скорости ветра выше, чем весной. Летом над Азией формируется область низкого давления, а в юго-восточной части изучаемой области сказывается влияние Гонолульского максимума. Над акваторией формируются воздушные потоки, ориентированные на север, северо-запад и северо-восток.

Обратимся теперь к анализу конкретных ситуаций. Рассмотрим вначале термические и метеорологические условия, сложившиеся в ноябре 2000 г. В этот период площадь, занимаемая отрицательной аномалией, не была самой большой (см. таблицу), но с него начинается серия значимых отклонений от нормы, продолжающаяся по март 2001 г. включительно.

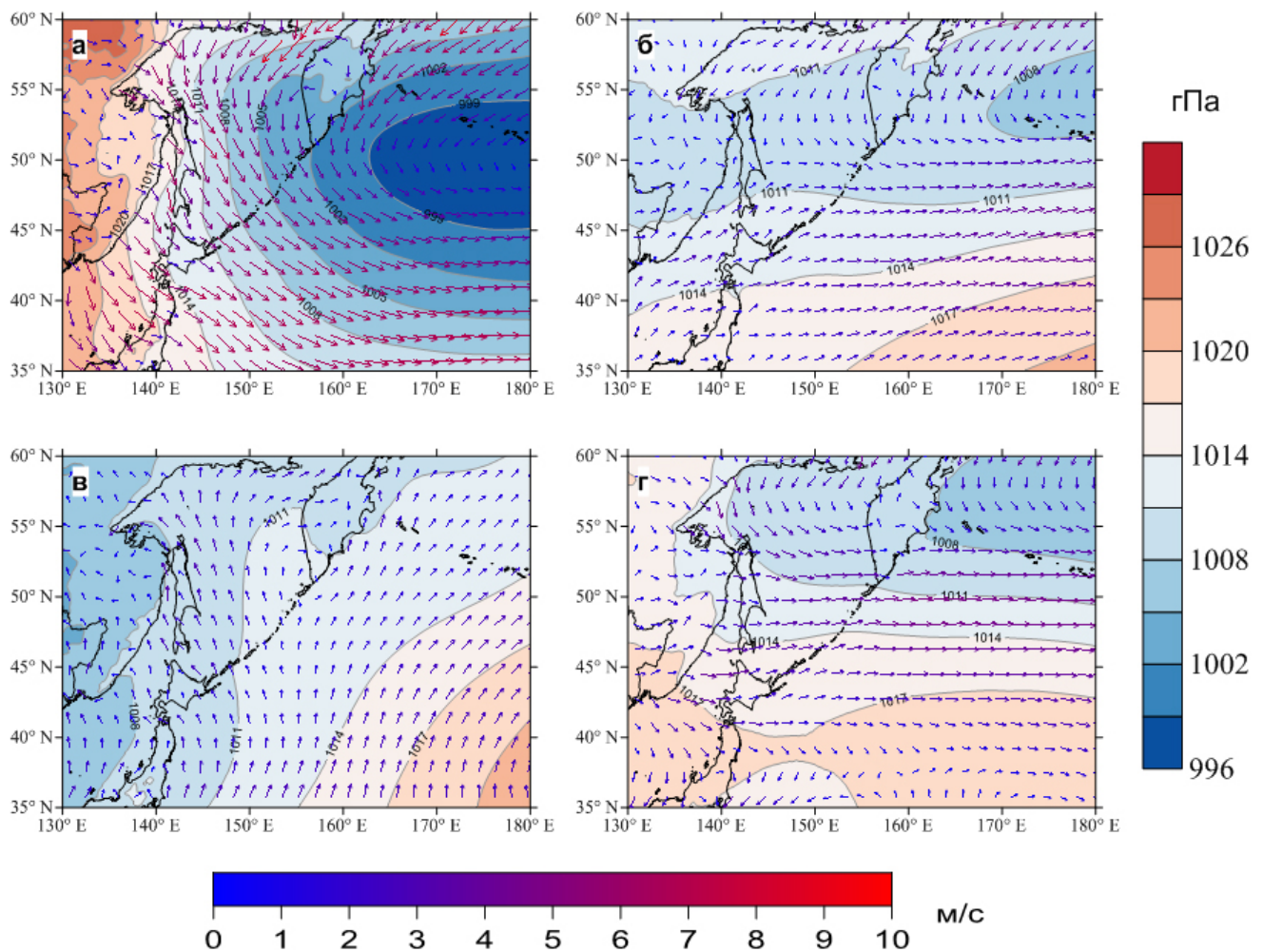
В ноябре 2000 г. отрицательные аномалии величиной 2–4 °С (это немало для ноября) наблюдались на значительной части СЗТО и в южной части Охотского моря (рис. 3). Эта ситуация важна еще и тем, что отрицательные отклонения от нормы сохранялись до марта 2001 г.

Алеутская депрессия в этот период была выражена гораздо сильнее, чем обычно, и ее центр находился южнее своего характерного положения (в ноябре обычно этот центр действия атмосферы находится еще над Беринговым морем). Сибирский максимум давления над материком также проявился интенсивнее, и его влияние распространялось дальше на восток. Соответственно, ветер был гораздо сильнее, чем характерно для ноября, и над южной частью области был не западным или запад-северо-западным, а, скорее, северо-западным. Вероятно, это обстоятельство привело к более существенному выхолаживающему влиянию (другой причиной могло быть также ослабление течения Курисио и его япономорской ветви – Цусимского течения, либо оба

фактора воздействовали на термические условия в поверхностном слое СЗТО).

Отрицательные аномалии ТПО отмечены в полосе, которая начинается в юго-западной части Охотского моря и в прибрежных районах о. Хоккайдо и, постепенно расширяясь, протягивается к юго-восточному краю изучаемой области. Такая картина хорошо согласуется с упомянутым выше возможным эффектом усиления ветра по южной периферии Алеутской депрессии.

На основе материалов, проанализированных ранее [19, 20], нами было построено пространственное распределение аномалий потока скрытого и явного тепла в ноябре 2000 г. (рис. 4). Действительно, более высокие по сравнению с типичными для



**Рис. 2.** Пространственное распределение среднего многолетнего поля приземного атмосферного давления и скорости ветра (показано векторами) в январе (а), апреле (б), июле (в) и октябре (г).

**Fig. 2.** Spatial distribution of the average long-term field of surface atmospheric pressure and wind speed (shown as vectors) in January (a), April (б), July (в), and October (г).

рассматриваемого периода скорости ветра привели к увеличению отдачи тепла из поверхностного слоя океана в атмосферу. В то же время пространственные распределения аномалий ТПО и скрытого тепла заметно различаются. В частности, в южной части Охотского моря и прикурильском районе теплообмен между атмосферой и океаном был на среднем многолетнем уровне, что указывает на сложный характер влияния атмосферных процессов на вариации теплосодержания поверхностного слоя воды. Роль потока явного тепла в теплообмене между атмосферой и океаном в целом меньше, в данном случае аномалии этого параметра наблюдались на северном шельфе Охотско-

го моря и у восточного побережья о. Сахалин и п-ова Камчатка, т.е. очень далеко от области проявления аномалии ТПО.

Следует отметить, что важную роль в формировании аномалий ТПО в СЗТО могут играть межгодовые вариации интенсивности течения Куроисио. По мнению китайских ученых [24], именно этот фактор является основным в изменчивости термического режима во внутренних морях северо-западной Пацифики (Желтом и Восточно-Китайском), но данными о вариациях адвекции теплой воды в СЗТО в данный момент мы не располагаем. Однако только часть области, в которой сформировались аномалии ТПО, находится в зоне влияния

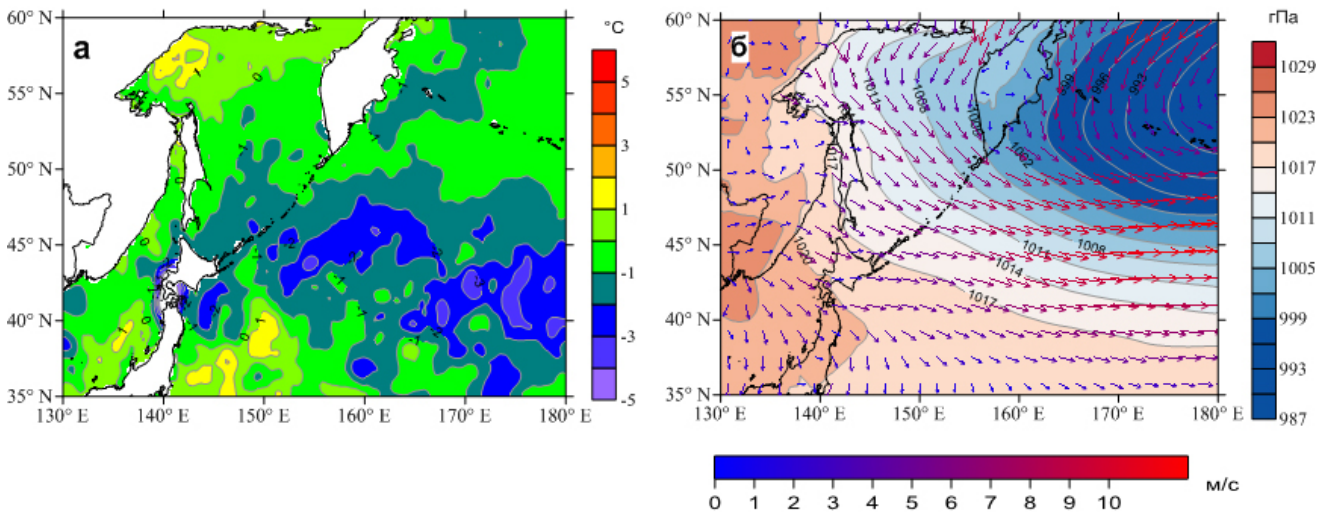


Рис. 3. Пространственное распределение аномалий ТПО (а), а также поля приземного атмосферного давления и скорости ветра (б) в ноябре 2000 г.

Fig. 3. Spatial distribution of SST anomalies (a), as well as the fields of surface atmospheric pressure and wind speed (b) in November 2000.

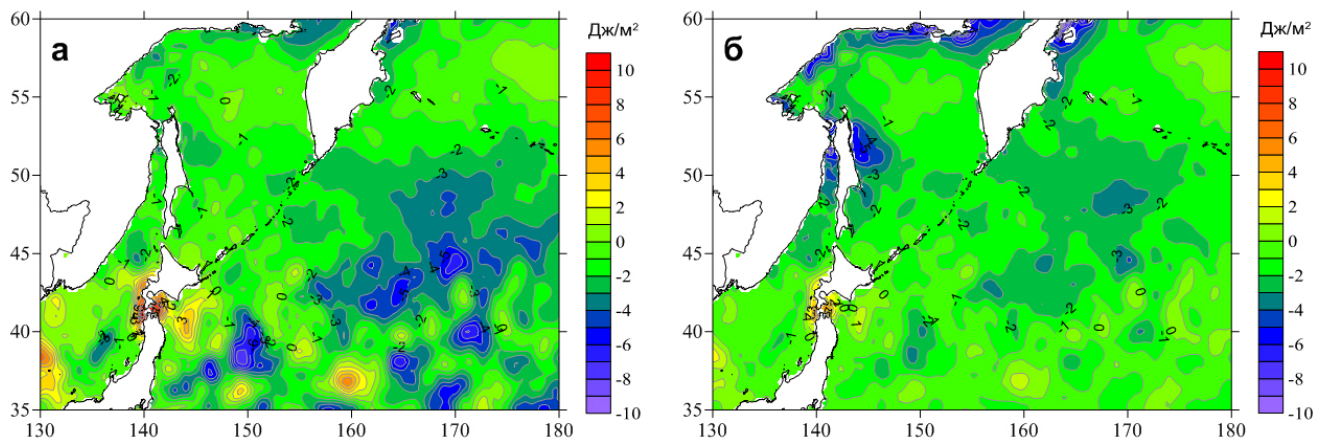


Рис. 4. Пространственное распределение аномалий потока скрытого тепла (а) и потока явного тепла (б) в ноябре 2000 г.

Fig. 4. Spatial distribution of anomalies in latent heat flux (a) and sensible heat flux (b) in November 2000.

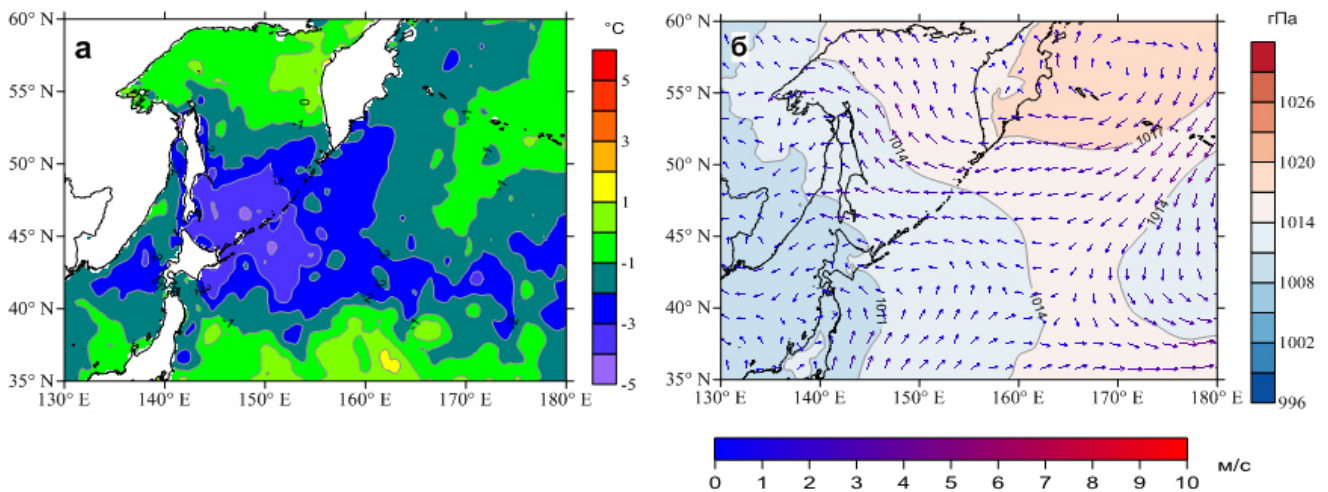
Курисио. Это говорит о том, что вопрос формирования значимых отклонений термического режима от средних многолетних значений не имеет простого объяснения.

В августе 2002 г. наблюдалась значительная отрицательная аномалия ТПО: отклонения от средних многолетних значений в южной части Охотского моря и прилегающей к Курильским островам акватории СЗТО составляли 4–5 °С (рис. 5). Эта ситуация уже рассматривалась ранее в работах [17, 21] для акватории Охотского моря, здесь изучается ее пространственное распределение в более обширной области. Ранее было установлено, что одной из основных причин формирования этой аномалии была необычно плотная облачность в районе Курильской островной гряды. Распределение приземного атмосферного давления существенно отличалось от типичного для данного месяца. Зона высокого давления, обычно наблюдающаяся на юго-восточной периферии изучаемой области (Гонолульский максимум), отсутствовала, вместо нее сформировалась область высокого давления в северо-восточной части, к востоку от Камчатки. Соответственно, характер воздушных потоков также совершенно отличался от ветров юго-западного и юго-восточного румбов, типичных для летнего муссона (летний муссон как таковой отсутствовал в регионе). Эти необычные метеоусловия могли привести к формирова-

нию особенно плотной облачности над Охотским морем и прилегающей к Курильским островам частью СЗТО.

Отметим, что эти аномалии наблюдались в целом севернее зоны действия течения Курисио, поэтому роль вариаций его интенсивности вряд ли была существенной. Значимых аномалий потоков скрытого и явного тепла также не было отмечено. Вероятно, наблюдался только дефицит солнечной радиации.

Рассмотрим теперь примеры положительных аномалий ТПО. В июле 2022 г. отличия распределения приземного атмосферного давления от обычного были сравнительно невелики. Они заключались главным образом в более высоких значениях параметра в северной части изучаемой области. Это привело к формированию двух антициклонов: одного над акваторией Охотского моря, второго над Беринговым морем, с центром в районе Алеутской островной гряды (рис. 6). В зоне влияния этих антициклонов и сформировались значимые положительные аномалии температуры поверхностного слоя воды: до 4–5 °С в центральной части Охотского моря и в Карагинском заливе Берингова моря. Эти области не испытывают непосредственного воздействия течения Курисио, поэтому его возможное влияние вряд ли стоит рассматривать. Значимых аномалий элементов теплового баланса также не было отмечено.



**Рис. 5.** Пространственное распределение аномалии ТПО (а), а также поля приземного атмосферного давления и скорости ветра (б) в августе 2002 г.

**Fig. 5.** Spatial distribution of the SST anomaly (a), as well as the fields of surface atmospheric pressure and wind speed (b) in August 2002.

Совсем нетипичными были метеоусловия над СЗТО в августе 2023 г. Область высокого давления, обычно занимающая небольшую часть на юго-востоке изучаемого района, была смещена на запад, до меридиана 155° в.д. (рис. 7). На северо-востоке установилась зона низкого давления, что нехарактерно для теплого сезона. В южной части акватории СЗТО (к югу от параллели 42° с.ш.) атмосферная циркуляция еще была близка к картине, наблюдающейся при летнем муссоне, особенно в западных районах. Однако на основной части направление воздушных потоков было су-

щественно отклонено на восток по сравнению с обычным. Над Охотским морем сформировался нечетко выраженный антициклон.

При этом значительные положительные аномалии сформировались южнее, в зоне влияния теплого течения Куроисио, а также между ней и Курильскими островами и в восточной части Японского моря, где действует теплое Цусимское течение. Область с более высоким прогревом поверхностного слоя воды отмечена в северной части Охотского моря. Нелегко с уверенностью указать причину этого явления, в частности его нельзя полностью объяснить

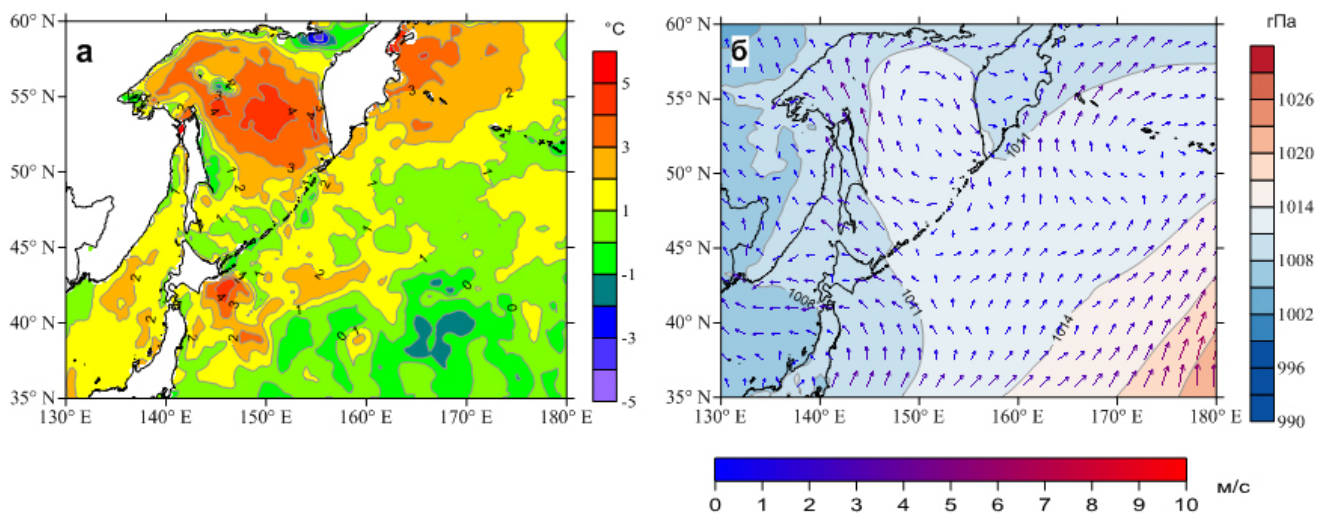


Рис. 6. Пространственное распределение аномалий ТПО (а), а также поля приземного атмосферного давления и скорости ветра (б) в июле 2022 г.

Fig. 6. Spatial distribution of the SST anomalies (a), as well as the fields of surface atmospheric pressure and wind speed (b) in July 2022.

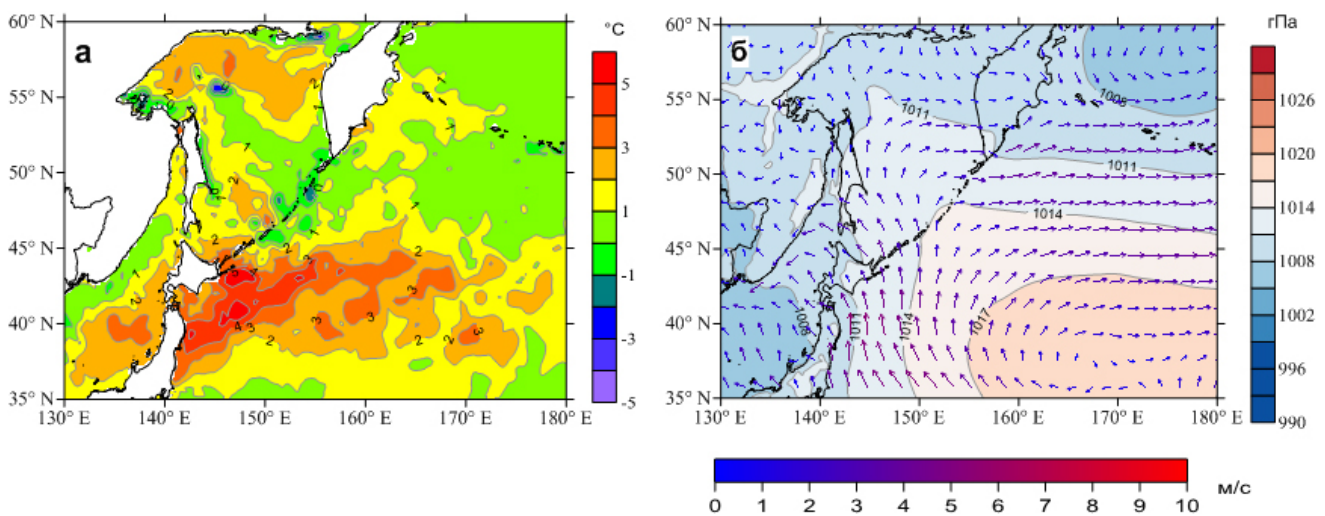


Рис. 7. Пространственное распределение аномалий ТПО (а), а также поля приземного атмосферного давления и скорости ветра (б) в августе 2023 г.

Fig. 7. Spatial distribution of the SST anomaly (a), as well as the fields of surface atmospheric pressure and wind speed (b) in August 2023.

высокой интенсивностью течения Куроиси, хотя, вероятно, именно это обстоятельство сыграло определяющую роль в формировании аномалий ТПО. Но, возможно, сложившаяся синоптическая ситуация также способствовала теплым условиям в СЗТО. В частности, такой характер атмосферной циркуляции мог привести к уменьшению влияния облачности в центральной части изучаемого района.

## Заключение

Выполненный анализ данных реанализа ERA5 по температуре поверхности океана показал, что значительные аномалии параметра (к таковым относились ситуации, когда отклонения от средних многолетних значений превышали величину среднеквадратического отклонения не менее чем на 5 % площади региона) достаточно часто наблюдаются в северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морях. За период с 1998 по 2023 г. зафиксировано 29 отрицательных и 44 положительных аномалий (9 и 14 % из общего числа анализируемых месячных интервалов). Нередки и экстраординарные ситуации, когда доля площади, на которой наблюдались значимые отклонения от нормы, превышала 10 % (9 случаев для отрицательных и 16 для положительных аномалий).

Подобные нарушения термического режима неравномерно распределены во времени. На начальном отрезке преобладали отрицательные аномалии, затем наступил период относительной стабильности (2003–2019 гг.), после чего стало резко нарастать число положительных аномалий. Подобная динамика в СЗТО и Беринговом море, очевидно, связана с наличием тенденции к повышению ТПО, в Охотском и Японском морях она не выражена [3].

Наиболее значимые события проявлялись в различных частях изучаемой области, но чаще всего в центральной части СЗТО, что может быть связано с влиянием межгодовых вариаций интенсивности теплового течения Куроиси. Экстраординарные события наблюдались обычно при существенных отклонениях пространственного распределения полей призем-

ного атмосферного давления от характерного для рассматриваемых интервалов времени. Однако механизм влияния метеорологических условий на формирование аномалий ТПО неясен, методика количественной оценки такого воздействия пока не разработана. За редким исключением, в зонах формирования значимых аномалий ТПО для соответствующих месяцев не выявлено существенных отклонений от средних многолетних значений элементов теплового баланса (потоков скрытого и явного тепла). Предположение, что отклонения скорости и направления ветра от средних многолетних показателей отражаются в этих элементах и, таким образом, способствуют формированию аномалий ТПО, не подтвердилось. Вероятно, механизм влияния метеорологических условий на теплосодержание поверхностного слоя океана более сложен и нуждается в дальнейшем изучении.

## Список литературы

1. Tskhay Zh., Filatov V. Spatial and temporal variations in thermal conditions during the saury fishery in the North-West Pacific based on satellite data. In: *2024 International Conference on Ocean Studies (ICOS), Vladivostok, Russian Federation*. Vladivostok, 2024, p. 105–108. doi:10.1109/ICOS63634.2024.10775995
2. Кляшторин Л.Б., Любушин А.А. *Циклические изменения климата и рыбопродуктивности*. М.: Изд-во ВНИРО, 2005, 235 с.
3. Цхай Ж.Р., Шевченко Г.В., Ложкин Д.М. Анализ термических условий в северо-западной части Тихого океана по спутниковым данным. *Исследование Земли из космоса*. 2022,1:30–37. doi:10.31857/S0205961422010079
4. Мороз В.В., Шатилина Т.А., Рудых Н.И. Особенности формирования аномальных состояний термического режима вод в Курило-Камчатском районе. *Морской гидрофизический журнал*. 2025,41(4):436–452. EDN: OYVMBC
5. Hobday A.J., Alexander I., Perkins S., et al. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*. 2016,141:227–238.
6. Joyce P., Tong C., Yip Y-L., Falkenber L. Marine heatwaves as drivers of biological and ecological change: implications of current re-search patterns and future opportunities. *Marine Biology*. 2024,171(20). https://doi.org/10.1007/s0022(-023-04340-y
7. Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Жабин И.А. Экстремальные явления морских волн тепла у восточного

- побережья полуострова Камчатка и в прилегающих районах в условиях современного глобального потепления. *Морской гидрофизический журнал*. 2025,41(4):417–435. EDN KYTEWK
8. Liu Z., Wu L. Atmospheric response to North Pacific SST: The role of ocean–atmosphere coupling. *Journal of Climate*. 2004,17:1859–1882.
  9. Liu Q., Wen N., Liu Z. An observational study of the impact of the North Pacific SST on the atmosphere. *Geophysical Research Letters*. 2006,33:L18611. doi:10.1029/2006GL026082
  10. Frankignoul C., Sennéchaël N. Observed influence of North Pacific SST anomalies on the atmospheric circulation. *Journal of Climate*. 2007,20(3):592–606. <https://doi.org/10.1175/jcli4021.1>
  11. Iwasaka N., Hanawa K., Toba Y. Analysis of SST anomalies in the North Pacific and their relation to 500 mb height anomalies over the Northern Hemisphere during 1969–1979. *Journal of Meteorological Society of Japan*. 1987,65(1):103–114. [https://doi.org/10.2151/jmsj1965.65.1\\_103](https://doi.org/10.2151/jmsj1965.65.1_103)
  12. Глебова С.Ю. Особенности развития атмосферных процессов над Охотским морем в 2000–2006 гг. *Известия ТИНРО*. 2007,150:200–216.
  13. Глебова С.Ю., Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д. Долгопериодные тенденции в ходе атмосферных процессов и термического режима дальневосточных морей за последний 30-летний период. *Известия ТИНРО*. 2009,159:285–298.
  14. Шатилина Т.А., Анжина Г.И. Особенности атмосферной циркуляции и климата на Дальнем Востоке в начале 21-го века. *Известия ТИНРО*. 2008,152:225–239.
  15. Шатилина Т.А., Анжина Г.И. Изменчивость интенсивности дальневосточного муссона в 1948–2010 гг. *Известия ТИНРО*. 2011,167:146–159.
  16. Мезенцева Л.И., Федулов А.С. Климатические тенденции атмосферной циркуляции на Дальнем Востоке. *Известия КГТУ*. 2017,46:175–183.
  17. Новиненко Е.Г., Шевченко Г.В. Пространственно-временная изменчивость температуры поверхности Охотского моря по спутниковым данным. *Исследование Земли из космоса*. 2007,5:50–60.
  18. Ложкин Д.М., Шевченко Г.В. Сезонная изменчивость приземного атмосферного давления на Дальнем Востоке России. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021,18(4):249–260. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-4-249-260
  19. Шевченко Г.В., Ложкин Д.М. Пространственно-временная изменчивость потока скрытого тепла в северо-западной части Тихого океана по данным реанализа ERA5. *Морской гидрофизический журнал*. 2024,40(3):426–437.
  20. Шевченко Г.В., Ложкин Д.М. Пространственно-временная изменчивость потока явного тепла на поверхности северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морей по данным реанализа ERA5. *Океанологические исследования*. 2024,52(3):77–94.
  21. Цхай Ж.Р., Шевченко Г.В. Оценка температурных аномалий поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным. *Исследование Земли из космоса*. 2013,2:50–61. <https://doi.org/10.1134/s0001433813090223>
  22. Ustinova E. Extreme events in the thermal state of the Far-Eastern Seas and adjacent waters of the Northwestern Pacific. In: *PICES-2021 Virtual Annual Meeting: Book of abstracts*. Victoria, BC, Canada, 2021, 26.
  23. Самойленко В.С. (ред.) *Тихий океан. Метеорологические условия над Тихим океаном*. М.: Наука, 1966, 390 с.
  24. Liu N., Wu D., Lin X., Meng Q. Seasonal variations of air-sea heat fluxes and sea surface temperature in the northwestern Pacific marginal seas. *Acta Oceanologica Sinica*. 2014,33(3):101–110. <https://doi.org/10.1007/s13131-014-0433-6>

## References

1. Tskhay Zh., Filatov V. Spatial and temporal variations in thermal conditions during the saury fishery in the North-West Pacific based on satellite data. In: *2024 International Conference on Ocean Studies (ICOS), Vladivostok, Russian Federation*. Vladivostok, 2024, p. 105–108. doi:10.1109/ICOS63634.2024.10775995
2. Klyashtorin L.B., Lyubushin A.A. *Cyclic climate changes and fish productivity*. Moscow: Izd-vo VNIRO, 2005, 235 p. (In Russ.).
3. Tskhay Zh.R., Shevchenko G.V., Lozhkin D.M. Analysis of thermal conditions in the Northwest Pacific Ocean from satellite data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022,58,975–980. <https://doi.org/10.1134/s0001433822090213>
4. Moroz V.V., Shatilina T.A., Rudykh N.I. Features of forming the water abnormal thermal regimes in the Kuril-Kamchatka region. *Physical Oceanography*. 2025,32(4):464–478. EDN OYVMBC
5. Hobday A.J., Alexander I., Perkins S., et al. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*. 2016,141:227–238. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>
6. Joyce P., Tong C., Yip Y-L., Falkenber L. Marine heatwaves as drivers of biological and ecological change: implications of current re-search patterns and future opportunities. *Marine Biology*. 2024,171(20). [https://doi.org/10.1007/s0022\(-023-04340-y](https://doi.org/10.1007/s0022(-023-04340-y)
7. Rostov I.D., Dmitrieva E.V., Zhabin I.A. Extreme events of marine heat waves off the eastern coast of Kamchatka Peninsula and in the adjacent areas under conditions of modern global warming. *Physical Oceanography*. 2025,32(4):446–463. EDN KYTEWK

8. Liu Z., Wu L. Atmospheric response to North Pacific SST: The role of ocean–atmosphere coupling. *Journal of Climate*. 2004,17:1859–1882.
9. Liu Q., Wen N., Liu Z. An observational study of the impact of the North Pacific SST on the atmosphere. *Geophysical Research Letters*. 2006,33:L18611. DOI:10.1029/2006GL026082
10. Frankignoul C., Sennéchal N. Observed influence of North Pacific SST anomalies on the atmospheric circulation. *Journal of Climate*. 2007,20(3):592–606. <https://doi.org/10.1175/jcli4021.1>
11. Iwasaka N., Hanawa K., Toba Y. Analysis of SST anomalies in the North Pacific and their relation to 500 mb height anomalies over the Northern Hemisphere during 1969–1979. *Journal of Meteorological Society of Japan*. 1987,65(1):103–114. [https://doi.org/10.2151/jmsj1965.65.1\\_103](https://doi.org/10.2151/jmsj1965.65.1_103)
12. Glebova S.Yu. Features of atmospheric processes development over the Okhotsk Sea in 2000–2006. *Izvestiya TINRO*, 2007,150:200–216. (In Russ.).
13. Glebova S.Yu., Ustinova E.I., Sorokin Yu.D. Long-term tendencies of atmospheric processes and thermal regime in the Far-Eastern seas of Russia in the last three decades. *Izvestiya TINRO*. 2009,159:285–298. (In Russ.).
14. Shatilina T.A., Anzhina G.I. Features of atmospheric circulation and climate in the Far East in the beginning of 21 century. *Izvestiya TINRO*. 2008,152:225–239. (In Russ.).
15. Shatilina T.A., Anzhina G.I. Variability of the Far-Eastern monsoon intensity in 1948–2010. *Izvestiya TINRO*. 2011,167:146–159. (In Russ.).
16. Mezentseva L.I., Fedulov A.S. Climate trends of the atmospheric circulation in the Far East region. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2017,46,175–183. (In Russ.).
17. Novinenko E.G., Shevchenko G.V. Spatiotemporal variability of the Sea of Okhotsk surface temperature based on satellite data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2007,5:50–60. (In Russ.).
18. Lozhkin D.M., Shevchenko G.V. Seasonal variability of sea level pressure in the Russian Far East. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from the Space*. 2021,18(4):249–260. (In Russ.). DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-4-249-260
19. Shevchenko G.V., Lozhkin D.M. Spatial and temporal variability of a latent heat flux in the Northwest Pacific Ocean based on the ERA5 reanalysis data. *Physical Oceanography*. 2024,31(3):387–397.
20. Shevchenko G.V., Lozhkin D.M. Spatial and temporal variability of the sensible heat flux on the surface of the Northwestern Pacific Ocean and the Far Eastern seas according to the data of the ERA5 reanalysis. *Okeanologicheskie issledovaniya = Journal of Oceanological Research*. 2024,52(3):77–94. (In Russ.). [https://doi.org/10.29006/1564-2291.jor-2024.52\(3\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.jor-2024.52(3).5)
21. Tskhai Zh.R., Shevchenko G.V. Estimation of surface temperature anomalies of the Sea of Okhotsk and adjacent areas based on satellite data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013,49:952–962. <https://doi.org/10.1134/s0001433813090223>
22. Ustinova E. Extreme events in the thermal state of the Far-Eastern Seas and adjacent waters of the Northwestern Pacific. In: *PICES-2021 Virtual Annual Meeting: Book of abstracts*. Victoria, BC, Canada, 2021, p. 26.
23. Samoilenko V.S. (ed.) *The Pacific Ocean. Meteorological conditions over the Pacific Ocean*. Moscow: Nauka, 1966, 390 p. (In Russ.).
24. Liu N., Wu D., Lin X., Meng Q. Seasonal variations of air-sea heat fluxes and sea surface temperature in the northwestern Pacific marginal seas. *Acta Oceanologica Sinica*. 2014,33(3):101–110. <https://doi.org/10.1007/s13131-014-0433-6>

## Об авторах

✉ Шевченко Георгий Владимирович, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией океанографии, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО), Южно-Сахалинск, Россия, shevchenko\_zhora@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0785-4618>

Ложкин Дмитрий Михайлович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории океанографии, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО), Южно-Сахалинск, Россия. <https://orcid.org/0000-0002-7073-681X>

## About the Authors

✉ Shevchenko, Georgy V., Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Laboratory of Oceanography, Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, shevchenko\_zhora@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0785-4618>

Lozhkin, Dmitry M. Cand. Sci (in Physics and Mathematics), Leading Researcher of the Laboratory of Oceanography, Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia. <https://orcid.org/0000-0002-7073-681X>

Поступила 17.10.2025  
Принята к публикации 22.02.2026

Received 17 October 2025  
Accepted 22 February 2026

© Авторы, 2026 г.  
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2026.  
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 556,574.58

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.1.069-088>  
<https://www.elibrary.ru/sumuza>

## Структура и пространственное распределение ландшафтов литорали в восточной части бухты Лососей (залив Анива, Охотское море)

Т. А. Кокорина, Р. Т. Гон

*Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО), Южно-Сахалинск, Россия*

**Резюме.** В работе впервые проведена комплексная типологизация и картографирование ландшафтов литорали восточной части бухты Лососей (зал. Анива Охотского моря, южный берег о. Сахалин) на основе методов типологии подводных ландшафтов (бентем) Японского моря. Использование данных, собранных в приливно-отливной полосе, обеспечило репрезентативную выборку по рельефу, типу грунтов, их скелетности, состоянию макробентоса. Описаны семь основных типов бентем: метагест, skateбра, фрактум, сеgetий, ареноид, пельтий, саксозий. Для каждого ландшафта приведены ключевые морфологические, гранулометрические и биотические параметры, а также эдификаторы и характерные виды. В ходе исследования установлено, что следы жизнедеятельности организмов (вистигивитные признаки) способствуют более точному определению границ ландшафтов. Полученные результаты демонстрируют применимость типологии бентем сублиторали к условиям литорали и подтверждают ее эффективность для распознавания и структурного картографирования динамичных прибрежных экосистем. Система классификации, интегрирующая физико-географические и биотические параметры, может быть использована для мониторинга состояния прибрежных экосистем и сравнительных исследований в прибрежных акваториях, а также позволит объективно картографировать ландшафты литорали.

**Ключевые слова:** подводный ландшафт, бентема, литораль, приливно-отливная зона, донные отложения, макробентос, бухта Лососей

## Structure and spatial distribution of landscapes of the littoral zone in the eastern part of Salmon Bay (Aniva Bay, the Sea of Okhotsk)

Tatyana A. Kokorina, Ruslan T. Gon

*Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, (SakhNIRO), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

**Abstract.** This study presents, for the first time, a comprehensive typological classification and mapping of the littoral landscapes in the eastern part of Salmon Bay (Aniva Bay, the Sea of Okhotsk, southern coast of Sakhalin Island), using methods of underwater landscape (bentema) typology developed for the Sea of Japan (according B.V. Preobrazhensky et al.). The research utilized data collected in the intertidal zone, which provided a representative sampling of relief forms, substrate types and skeletal content, as well as the state of the macrobenthos. Seven main types of bentema are described: metagest, skatebra, fractum, segetium, arenoid, peltium, and saxosium. For each landscape type, key morphological, granulometric, and biotic parameters are provided, as well as the main edifiers and characteristic species. The study found that traces of organism activity (vestigial features) contribute to a more accurate determination of landscape boundaries. The results demonstrate the possibility of adapting the sublittoral bentema typology to the littoral zone and confirm its effectiveness for the recognition and structurally mapping of the dynamic coastal ecosystems.

The classification system, which integrates physico-geographical and biotic parameters, can be used to monitor the state of coastal ecosystems and conduct comparative studies in coastal waters, as well as to objectively map the landscapes of the littoral.

**Keywords:** underwater landscape, bentema, littoral zone, intertidal zone, bottom sediments, macrobenthos, Salmon Bay

### Финансирование и благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания Сахалинского филиала ГНЦ Российской Федерации Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (№ 076-00005-25-00).

Авторы выражают благодарность доктору биологических наук В.С. Лабаю за ценные советы при подготовке работы.

*Для цитирования:* Кокорина Т.А., Гон Р.Т. Структура и пространственное распределение ландшафтов литорали в восточной части бухты Лососей (залив Анива, Охотское море). *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 1, с. 69–88. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.1.069-088>; <https://www.elibrary.ru/sumuza>

### Funding and Acknowledgements

The research was carried out within the framework of the state assignment of the Sakhalin Branch of the State Scientific Center of the Russian Federation "Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography" (SakhalNIRO) (No. 076-00005-25-00).

The authors thank Dr Vyacheslav S. Labay, Leading Researcher of the Sakhalin Branch of the VNIRO, for valuable advice during the preparation of this study.

*For citation:* Kokorina T.A., Gon R.T. Structure and spatial distribution of landscapes of the littoral zone in the eastern part of Salmon Bay (Aniva Bay, the Sea of Okhotsk). *Geosystems of transition zones*, 2026, vol. 10, No. 1, p. 69–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.1.069-088>; <https://www.elibrary.ru/sumuza>

## Введение

Литоральная зона представляет собой переходную область между сушей и морем, которая характеризуется периодической сменной условий обитания, связанной с приливо-отливными колебаниями уровня моря. Эта переходная зона является уникальной экосистемой, где изменчивость факторов среды (уровня воды, температуры, солености и др.) оказывает существенное влияние на состав и структуру обитателей литорали, их биомассу и процессы сукцессии. Такое динамичное и неоднородное пространство создает специфические условия для формирования морских ландшафтов.

Морские ландшафты отличаются высокой динамичностью, обусловленная приливо-отливными процессами, течениями и сезонными изменениями, а также уникальное биоразнообразие, включающее макрофиты и бентосные организмы. В морской среде формируются подводные ландшафты – комплексы, объединяющие геоморфологические, ги-

дрологические и биологические особенности морского дна и прилегающих водных масс, в том числе литоральной зоны. Литораль как сложный природный комплекс характеризуется сочетанием рельефа, типов грунтов, гидрологических условий, а также флоры и фауны, обладающих высокой степенью эврибионтности и адаптивности к изменяющимся условиям [1, 2].

Для обозначения специфики подводных ландшафтов и дифференциации бентосных геосистем введен специальный термин – бентема [3]. Бентема – это субаквальная система, которая принципиально отличается от традиционных субаэральных (наземных) ландшафтов. Как отмечается в работах ряда авторов, бентема не является ландшафтом в привычном понимании, поскольку такие системы формируются на стыке литосферы, гидросферы и биосферы, практически не взаимодействуя с атмосферой, и лишены почвенного покрова, а обмен вещества и энергии происходит напрямую через водную среду, что отличает их от субаэральных ландшафтов [3, 4].

Морской ландшафт представляет собой сложную систему, в которой взаимодействуют физические, химические и биологические компоненты морской среды [5], формируя уникальные экологические условия, особенно в литоральной зоне. Литоральная зона, как часть морского ландшафта, представляет собой переходную область между сушей и морем. Пограничное положение между двумя основными средами жизни – водой и воздухом – и амфибиотичность условий выделяют литораль среди других зон моря [6].

Существенную роль в формировании пространственной и функциональной структуры литоральной зоны играет периодическая смена условий обитания, связанная с приливно-отливными колебаниями уровня моря. Продолжительность и частота пребывания участка под водой или на воздухе прямо влияют на горизонтальную и вертикальную структуру сообществ, динамику биомассы, характер сукцессий, процессы седиментации и биотурбации.

Изучение литоральных ландшафтов позволяет не только выявлять структурные особенности и закономерности пространственного распределения биологических ресурсов, но и оценивать устойчивость прибрежных экосистем к воздействиям как природного, так и антропогенного характера.

Целью работы является структурирование и картирование литорали с описанием состава и структуры ландшафтов восточной части бухты Лососей (зал. Анива). Для этого необходимо было выполнить типизацию и картографирование литоральных ландшафтов; описать видовой состав и структуру прибрежных биоценозов и установить приуроченность ключевых видов гидробионтов к различным типам ландшафтов.

## Материал и методы

Залив Анива, расположенный в южной части о. Сахалин, является одним из важнейших районов промышленного рыболовства и мари-

культуры. Здесь сосредоточены нерестилища тихоокеанских лососей, промысловые скопления крабов и моллюсков. Бухта Лососей находится в северной части залива. Она представляет собой акваторию с разнообразными литоральными биотопами, что делает ее репрезентативным объектом для изучения структуры прибрежных ландшафтов.

Исследования проведены в мае–июне 2025 г. в литоральной зоне восточной части бухты Лососей (зал. Анива) на участке от с. Соловьевка до г. Корсаков в период сизигийных, максимальных отливов. Всего были выполнены 104 станции на 13 разрезах методом трансект [7] (рис. 1). Верхняя граница литорали определялась уровнем сизигийного прилива, нижняя – уровнем сизигийного отлива.

На каждой станции фиксировались: местоположение, фаза прилива и отлива, форма рельефа, гранулометрия и кольматация поверхности, наличие и характер скелета грунта (монолитный, ячеистый, разобщенный; биоподвижный/бионеподвижный), типы и выраженность следов жизнедеятельности (отверстия, «курганы» экскретов, биоглифы), макробентос, а также состояние фитобентоса (видовой состав, доля проективного покрытия). Для описания донных (бентосных) ландшафтов бухты Лососей были применены методы, разработанные в лаборатории морских ландшафтов Тихоокеанского института географии Дальневосточного отделения Российской академии наук [3]. Методика основана на комплексном подходе к типизации подводных ландшафтов и включает следующие этапы: визуальное описание морфологии дна с фиксацией форм рельефа и характера микро-рельефа; классификация субстратов по гранулометрическому составу, определение типа и фазы скелета грунта, оценка степени кольматации межскелетных пространств; идентификация структурообразующих видов биоты (эдификаторов) и характерных видов макрозообентоса с указанием их трофической группы и пространственной приуроченности; анализ вистигивитных признаков – следов жизнедеятельности организмов, которые служат

важными индикаторами типов ландшафтов; оценка состояния фитобентоса с определением видового состава, характера распределения и доли проективного покрытия (ПП).

На основе этих методов выполнена классификация бентем в соответствии с региональной типологией и номенклатурой, принятой для дальневосточных морей России [8].

Выполнена фотосъемка эталонных участков дна с фиксацией субстрата, структурных элементов, а также макрозообентоса и макрофитов. Архив фотографий включает 858 снимков.

Картографирование литоральных ландшафтов осуществлялось путем интерполяции данных между станциями на основе непрерывности выявленных типов бентем вдоль трансект. Координаты станций фиксировали с помощью GPS-навигатора. Границы ландшафтов проводили с учетом изменения комплекса диагностических признаков (типа субстрата,

характера рельефа, состава доминирующих видов и вистигивитных особенностей). Карты-схемы построены с использованием программного обеспечения ГИС, топографическая основа получена из открытых картографических источников.

Анализ литературных источников [1–3, 8 и др.] показывает, что наше исследование представляет собой первую целенаправленную попытку использования сублиторальной типологии бентем применительно к условиям литоральной зоны. На литорали пространственная структура бентем формируется под воздействием фаз приливного цикла, переработки осадка и изменчивости биомассы растительности, что отражено в диагностических признаках. Видовые названия донных организмов соответствуют базе WoRMS (World Register of Marine Species, <https://www.marinespecies.org>)

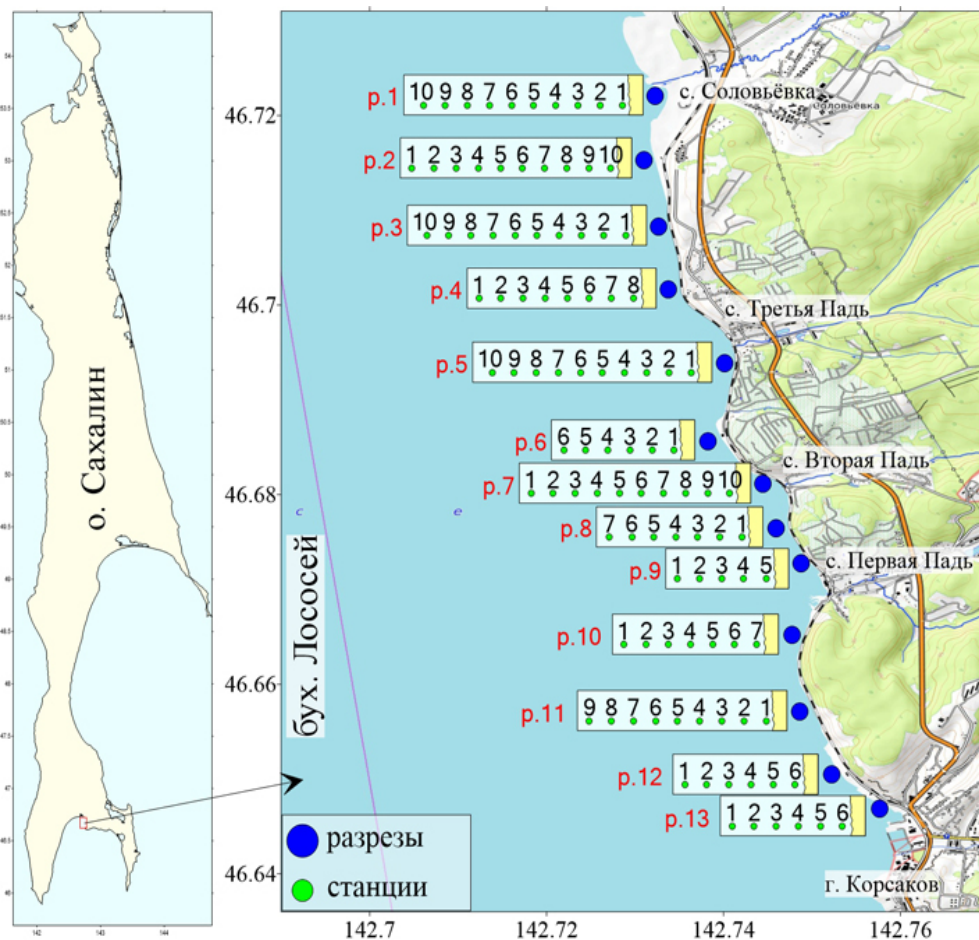


Рис. 1. Карта-схема выполненных учетных станций в восточной части бухты Лососей.

Fig. 1. The map of recording stations in the eastern part of Salmon Bay.

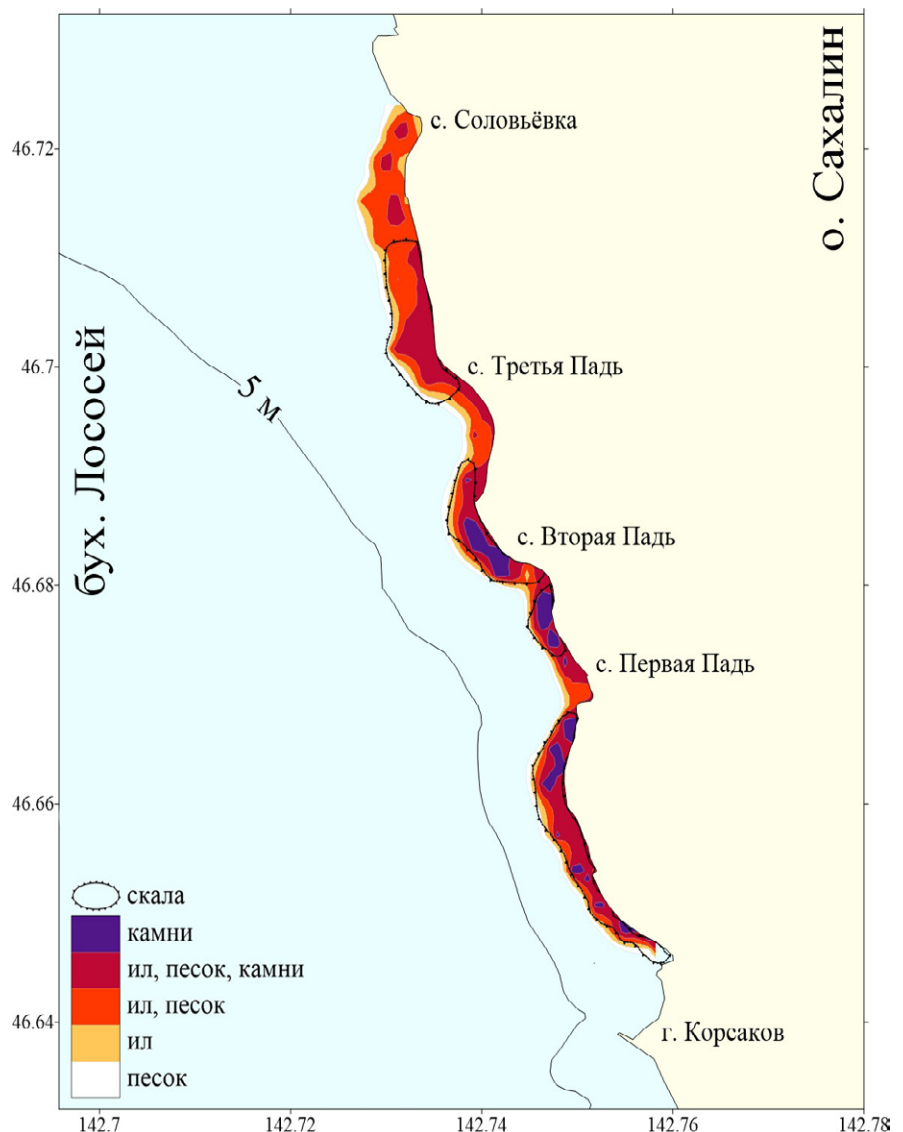
## Результаты исследования

Восточная часть бухты Лососей является уникальным объектом для изучения ландшафтов литорали благодаря сочетанию разнообразных геоморфологических условий, типов субстрата (илистый, песчаный, каменистый, скалистый) и биотических сообществ (рис. 2). Эта территория испытывает воздействие как природных факторов, включая приливно-отливные процессы, так и антропогенных. По результатам исследований для данного участка была построена подробная карта, отражающая сложную пространственную структуру прибрежной зоны и основные типы донных фаций, выделенные на основе морфологических и биотических признаков.

В пределах изученного района выделено семь различных типов бентем: метагест, skateбра, фрактум, сегетий, ареноид, пельтий и саксозий (рис. 3), что свидетельствует о значительном разнообразии ландшафтов литорали восточной части бухты.

## Характеристика бентем восточной части бухты Лососей

По результатам анализа морфологических и биотических характеристик ландшафтов в соответствии с Атласом подводных ландшафтов Японского моря [8] были систематизированы ключевые визуальные признаки, позволяющие разграничить и классифицировать типы бентем в пределах исследуемого участка

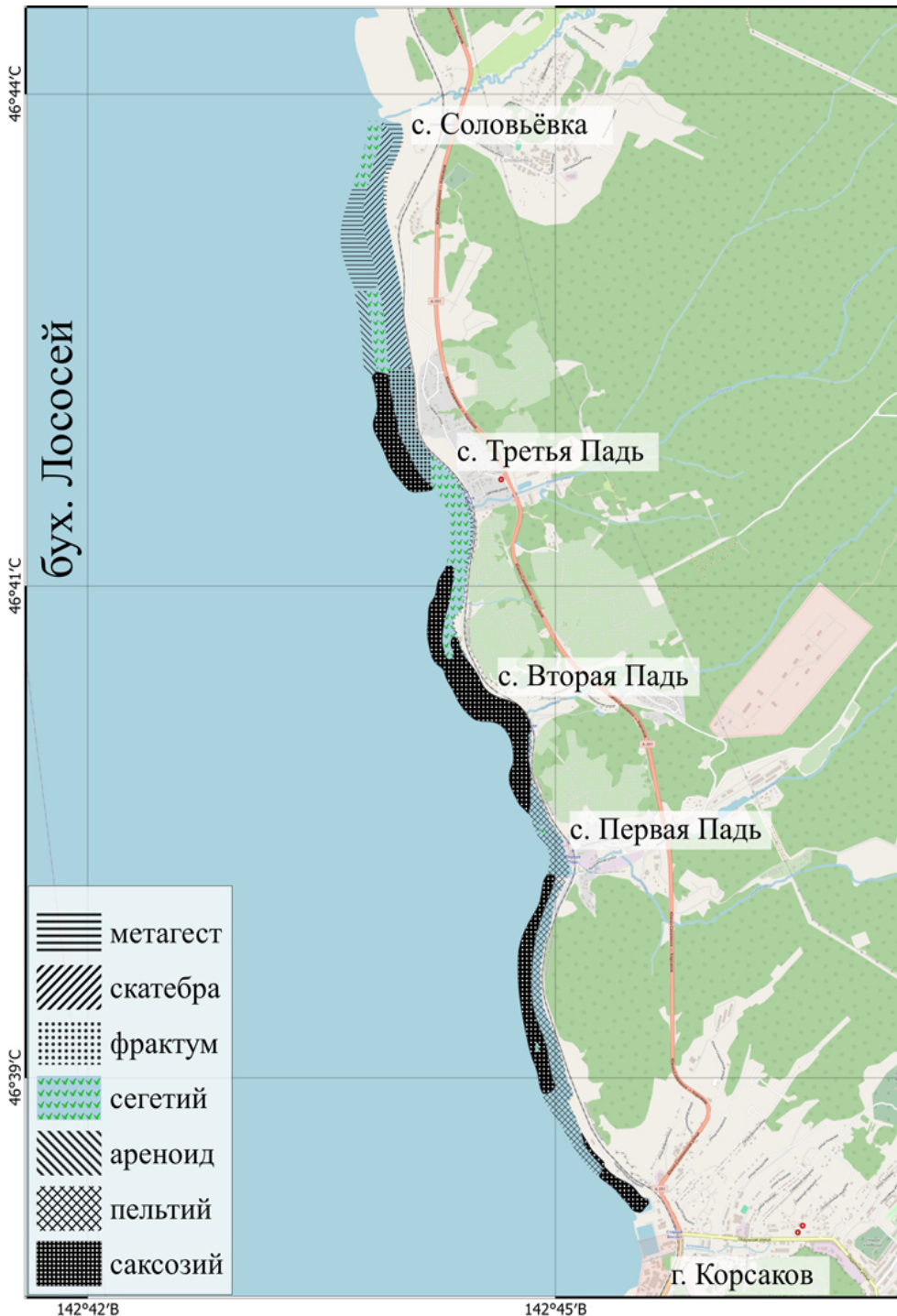


**Рис. 2.** Карта-схема распределения донных субстратов в восточной части бухты Лососей.

**Fig. 2.** The distribution map of bottom substrates in the eastern part of Salmon Bay.

(табл. 1). В таблице приведены диагностические признаки для каждого типа ландшафта, включая характеристики рельефа (скальный, глыбовый, бугристый, плоский), уклона поверхности, особенности грунта (тип скелета, его подвижность и структура), состав зообентоса с указанием трофических групп (эктобионты и эндобионты различных типов питания), вистигивитные признаки (по-

ложительные и отрицательные следы жизнедеятельности организмов), а также характер развития фитобентоса. Данная типология позволяет объективно идентифицировать ландшафты литорали на основе комплекса взаимосвязанных параметров. Пространственное распределение выделенных типов по номерам станций в разрезах литоральной зоны бухты Лососей представлено в табл. 2.



**Рис. 3.** Карта-схема распределения ландшафтов литорали в восточной части бухты Лососей.

**Fig. 3.** The distribution map of landscapes of the littoral zone in the eastern part of Salmon Bay.

**Таблица 1.** Типология подводных ландшафтов литорали восточной части бухты Лососей

**Table 1.** Typology of underwater landscapes Typology of underwater landscapes of the littoral zone in the eastern part of Salmon Bay

Признаки			Ландшафты						
			Мегатест	Скагебра	Сегетий	Ареноид	Фрактум	Пельтий	Саксозий
Рельеф	Скальный				■				■
	Глыбовый								
	Бугристый				■			■	
	Плоский	Осложненный				■	■		
		Биосложненный		■					
		Простой							
Уклон	Отвесный								
	Крутой								
	Слабонаклонный								
	Незаметный		■	■	■	■	■	■	
Грунт	С бионеподвижным скелетом	Скелетная фаза	Монолитный скелет			■			■
			Блочный скелет						
		Ячеистый скелет						■	
		Смешанная фаза	Ячеистый скелет		■		■	■	
	Разобщенный скелет								
	С биоподвижным скелетом	Скелетная фаза	Ячеистый скелет			■			
			Ячеистый скелет		■	■	■		
		Смешанная фаза	Разобщенный скелет						
			Мелкозернистый скелет	■					
	Без скелета	Бесскелетная							
Зообентос	Эктобионты	Экзофаги	■	■			■	■	
		Эпифаги							
		Эпи-, эндофаги				■	■		
		Эпи-, экзофаги							
	Эндобионты	Экзофаги					■		
		Эндофаги				■			
Вистигивитные признаки	Положительные	Кратеры		■	■		■		
		Курганчики	■						
		Экскреты	■	■	■	■			
	Отрицательные	Следы лежек животных							
		Отверстия в грунте	■	■	■	■			
		Биоглифы	■	■		■			
Фито-бентос	Морские травы	Заросли			■	■		■	
		Корки					■	■	
	Водоросли	Заросли			■		■	■	
		Маты						■	

Примечание. Ячейки, выделенные синим цветом, соответствуют данным, приведенным в Атласе подводных ландшафтов Японского моря [8], и подтверждаются нашими наблюдениями. Зеленым цветом – данные, полученные нами в ходе собственных исследований.

Note. Blue cells correspond to data according to [8], which are confirmed by the observations in this study. Green cells indicate data obtained via own research.

**Таблица 2.** Распределение типов бентем по номерам станций в разрезах литоральной зоны бухты Лососей  
**Table 2.** Distribution of bentema types by station numbers in sections of the littoral zone of Salmon Bay

Разрез	Метагест	Скатебра	Сегетий	Ареноид	Фрактум	Пельтий	Саксозий
1	1–4	5–7	8–10				
2	1–4	5–10					
3		1–6	7,8	9,10			
4					5–8		1–4
5	2,3		4–10			1	
6			4			1	2,3,5,6
7							1–10
8						1	2–7
9			2			1,3–5	
10						4–7	1–3
11			7,8			1–4	5,6,9
12			1			2–5	6
13			2				1,3,4–6

Далее приведены краткая характеристика каждого типа бентем и фототаблицы (рис. 4–10), иллюстрирующие основные результаты исследований на литорали восточной части бухты Лососей, дающие визуальное представление о субстрате, вистигивитных признаках, а также составе макрозообентоса и макрофитов выделенных бентем.

### Метагест

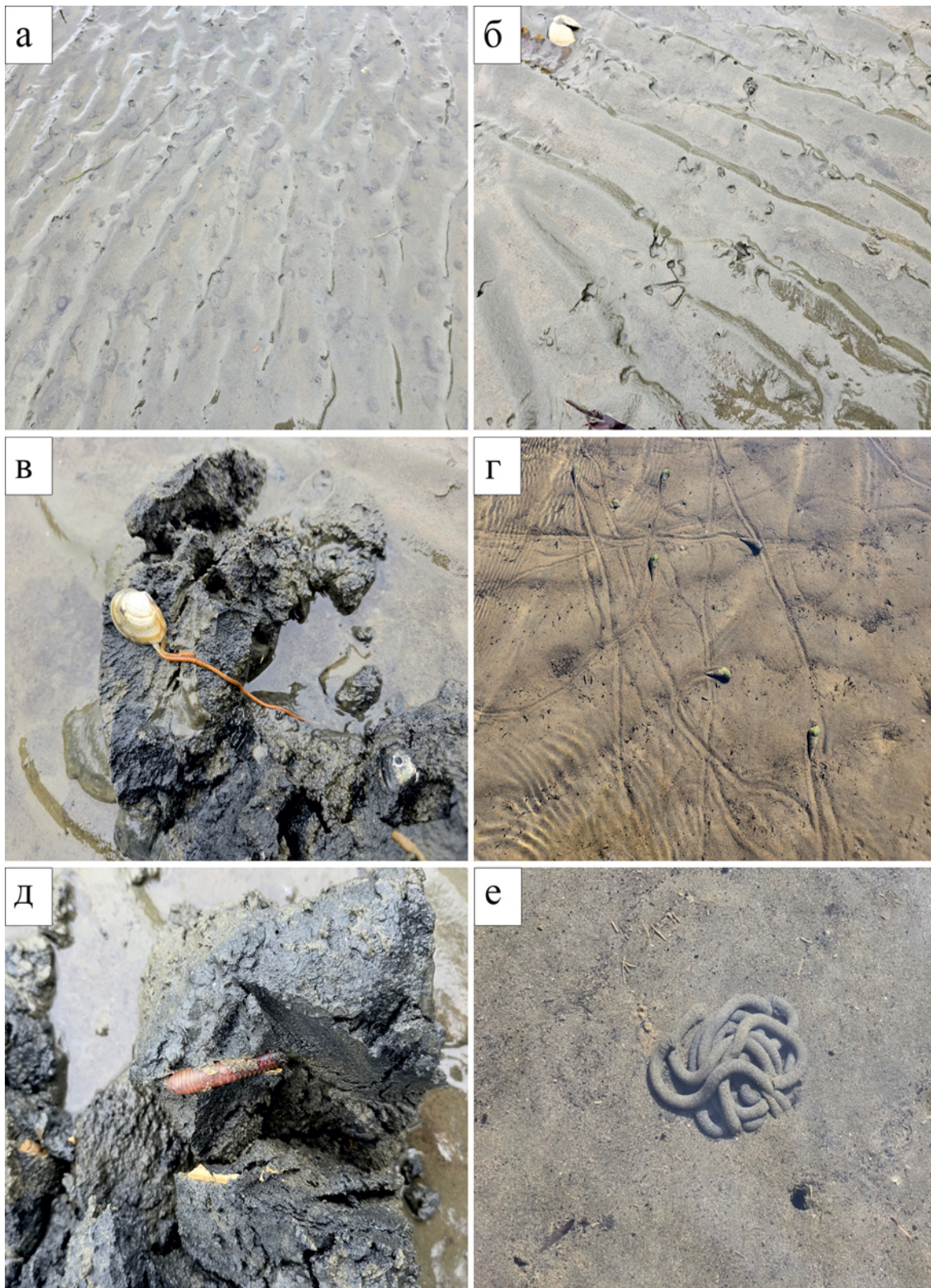
Метагест характеризуется равномерным «зернистым» рисунком поверхности, обусловленным полем мелких отверстий, одиночных отверстий и кратеров на относительно ровном фоне, на котором под воздействием приливно-отливных течений формируются волнистые формы микрорельефа (рифели) [9]. Метагест приурочен к небольшим участкам побережья в кутовых частях бухты у сел Соловьевка и Третья Падь (верхняя литораль), а также отмечается в пределах нижней литорали южной части района с. Соловьевка.

Осадки преимущественно алевропелитовые, с минимальной долей твердых вклю-

чений, верхний слой часто представлен жидким наилком. Фаза скелета бесскелетная либо слабоскелетная, биоподвижность осадков высокая.

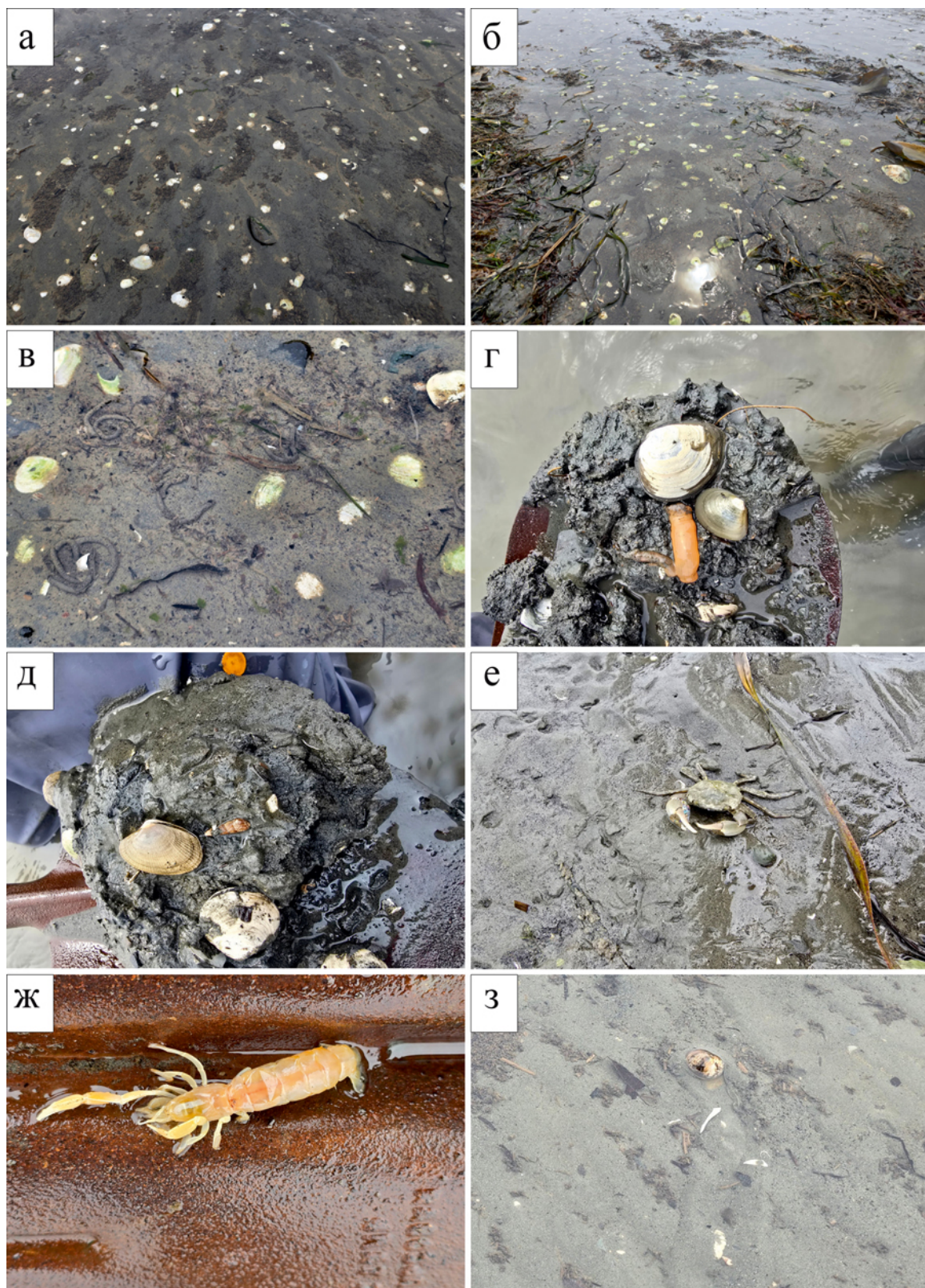
Доминируют многочисленные отверстия до 2 см в основании и небольшие бугорки, биоглифы, по всему периметру отмечаются обрывки морских трав и водорослей.

Ведущая роль в развитии ландшафта принадлежит эндобионтам, прежде всего пескожилам сем. Arenicolidae Johnston, 1835, формирующим доминирующую морфологию поверхности из спиралевидных экскретов, которым сопутствуют мелкие двустворчатые (*Macoma balthica* (Linnaeus, 1758)) и брюхоногие моллюски *Batillaria attramentaria* G.B. Sowerby II, 1855, а также полихеты. Макрофитобентос незначителен, ограничен редкими куртинами морских трав (проективное покрытие не более 10 %) *Zostera asiatica* Miki, 1932 и *Z. marina* Linnaeus, 1753, участки приурочены к наиболее заиленным кутовым зонам литорали, вблизи устьев рек (рис. 4).



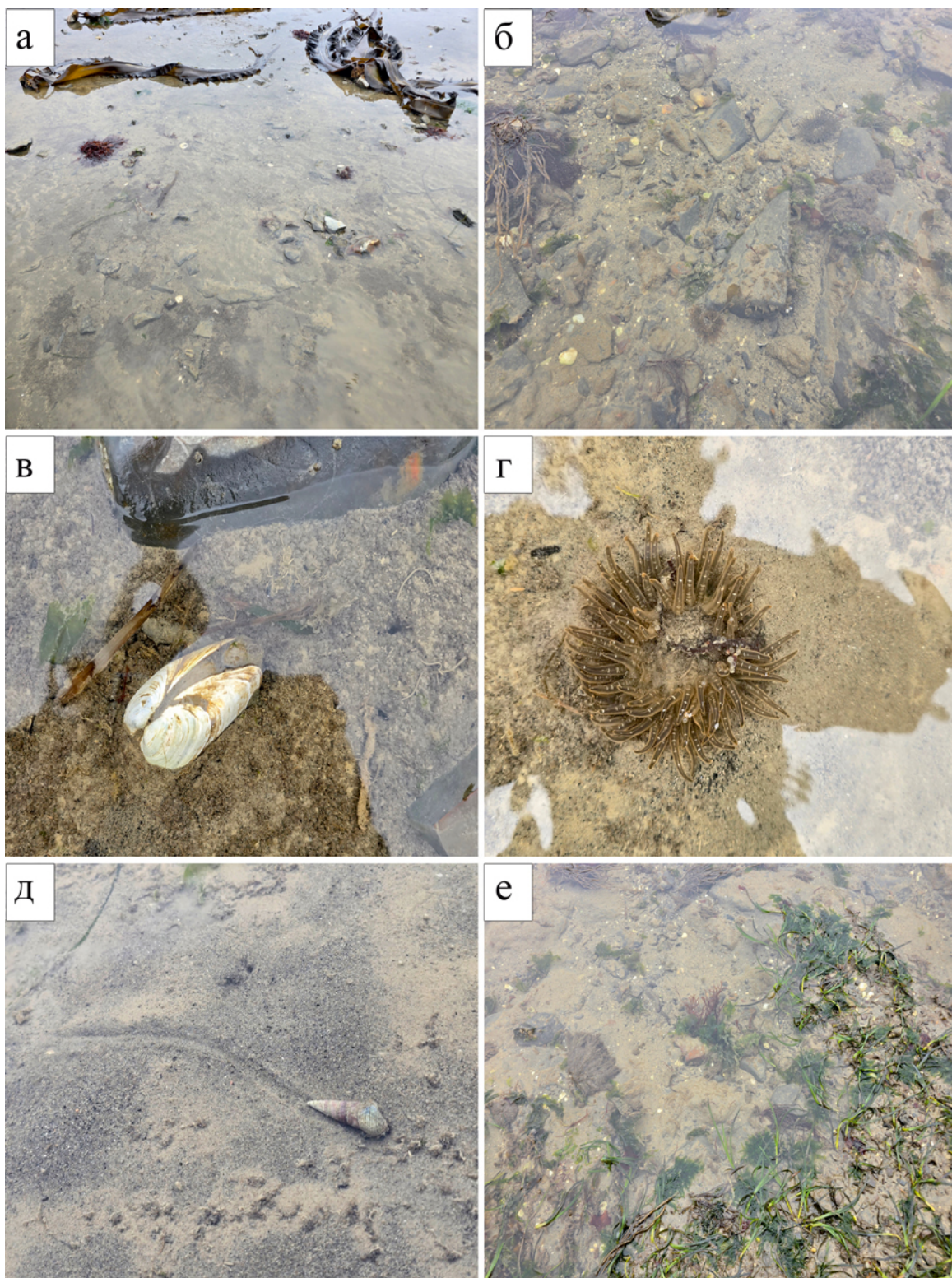
**Рис. 4.** Метагест: (а, б) общий вид, (в) макома балтийская, (г) батиллярня и биоглифы, (д) пескожил сем. Arenicolidae, (е) конус из спиралевидных экскретов пескожила.

**Fig. 4.** Metagest: (а, б) general view, (в) *Macoma balthica*, (г) *Batillaria attramentaria* and bioglyphs, (д) the lugworm of the family Arenicolidae, (е) cone of spiral-shaped excreta of the lugworm.



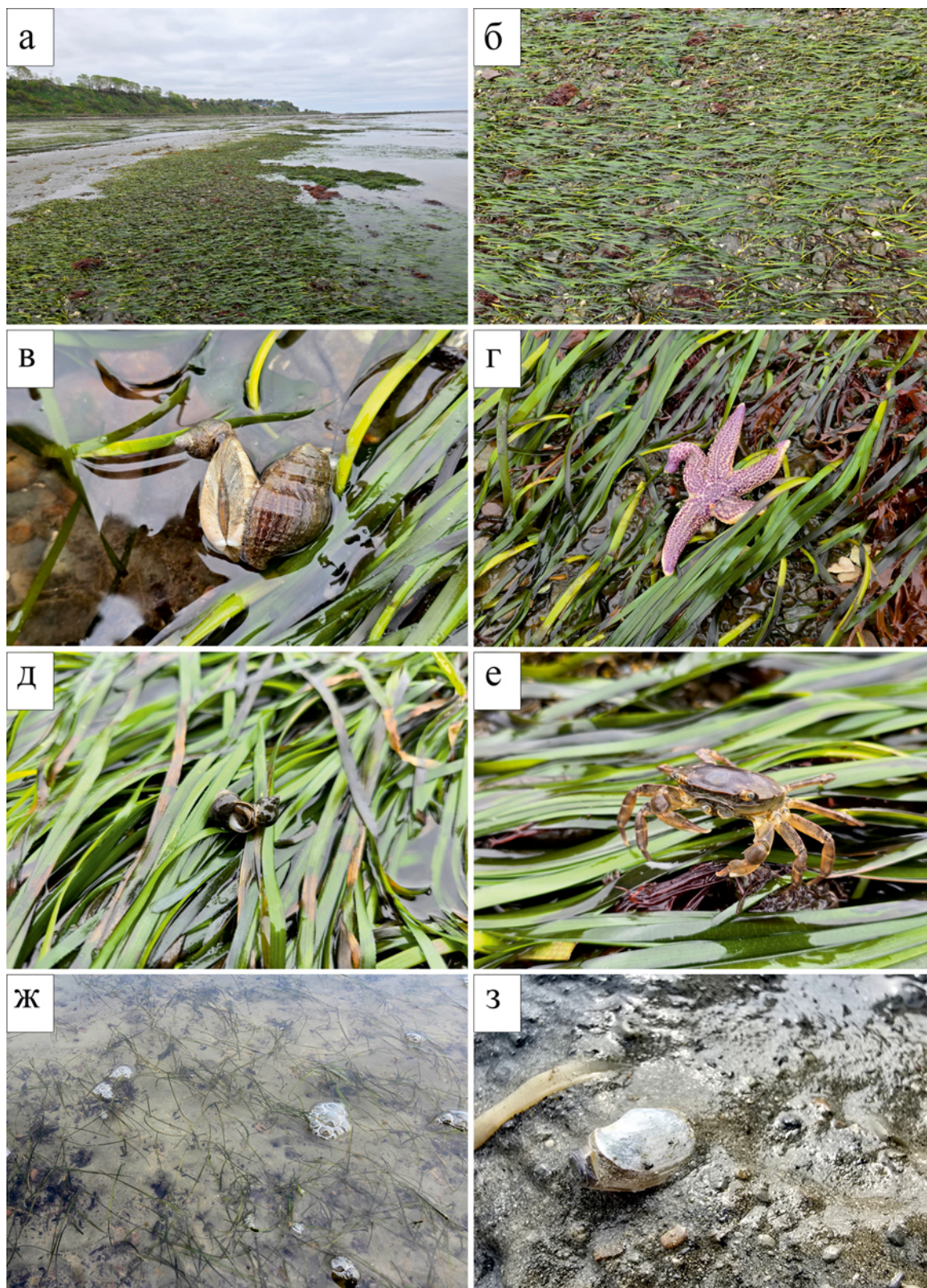
**Рис. 5.** Скатебра: (а, б) общий вид, (в) следы жизнедеятельности, (г) макома балтийская, (д) петушок тихоокеанский и фрагменты раковин моллюсков, (е) прибрежный краб, (ж) роющая креветка, (з) криптонатика янтостома.

**Fig. 5.** Scathebra: (a, б) general view, (в) traces of vital activity, (г) *Macoma balthica*, (д) *Ruditapes philippinarum* and fragments of mollusk shells, (е) *Hemigrapsus takanoi*, (ж) *Neotrypaea japonica*, (з) *Cryptonatica janthostoma*.



**Рис. 6.** Фрактум: (а, б) общий вид, (в) мия японская, (г) актиния сем. Actiniidae, (д) батиллярия, (е) zostera морская.

**Fig. 6.** Fractum: (а, б) general view, (в) *Mya japonica*, (г) sea anemona of the family Actiniidae, (д) *Batillaria attramentaria*, (е) *Zostera marina*.



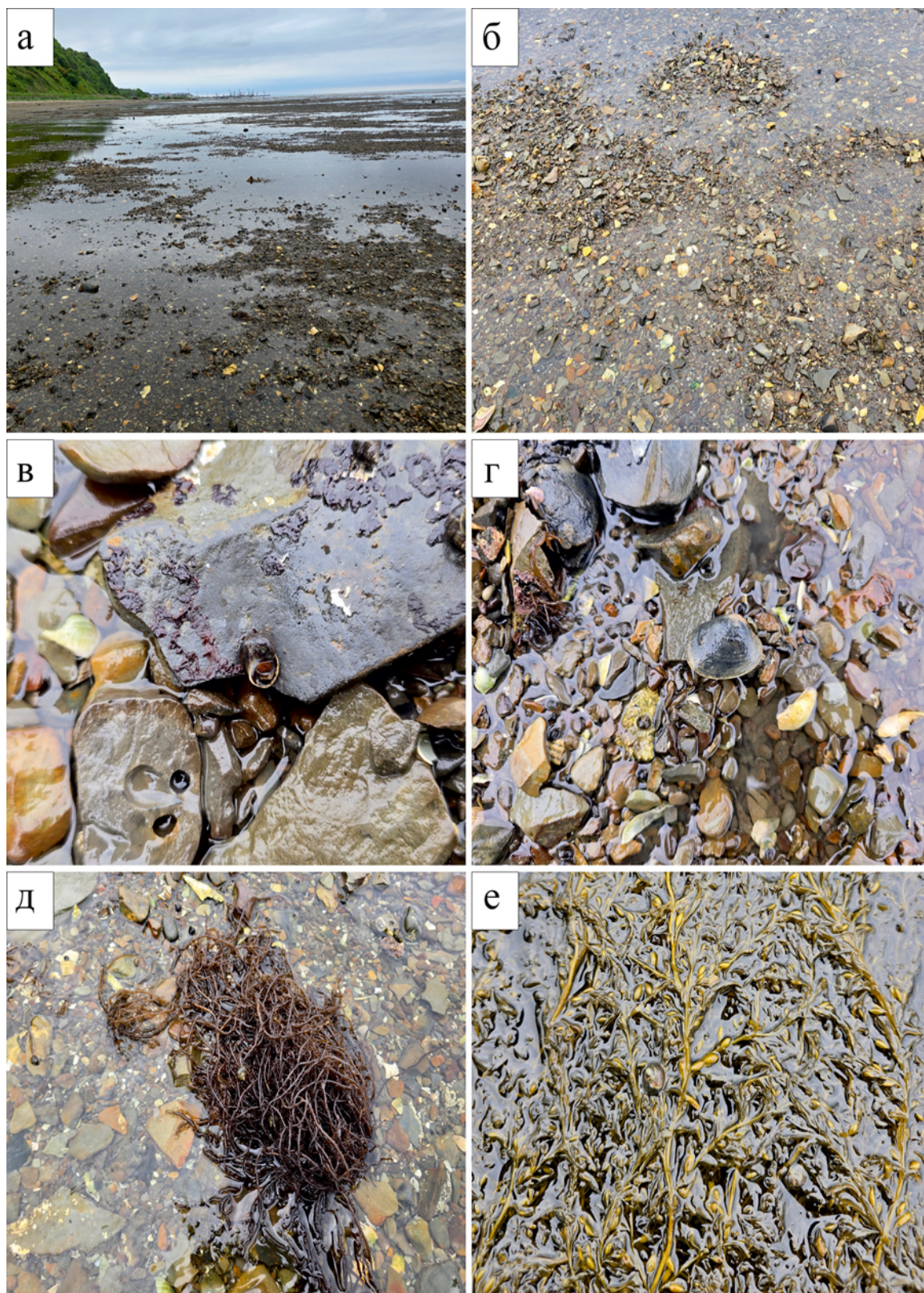
**Рис. 7.** Сеgetий: (а) общий вид, (б) zostera морская, (в) нуцелла поедает петушка тихоокеанского, (г) звезда амурская, (д) литторина грубая, (е) прибрежный краб, (ж) zostera, (з) латернула.

**Fig. 7.** Segetium: (a) general view, (б) *Zostera marina*, (в) *Nucella heyseana* feeding on *Ruditapes philippinarum*, (г) *Asterias amurensis*, (д) *Littorina squalida*, (е) *Hemigrapsus takanoi*, (ж) *Zostera noltii*, (з) *Laternula gracilis*.



**Рис. 8.** Ареноид: (а, б) общий вид, (в) спизула сахалинская, (г) силиква острая, (д) мия японская, (е) пескожил сем. Arenicolidae.

**Fig. 8.** Arenoid: (а, б) general view, (в) *Spisula sachalinensis*, (г) *Siliqua alta*, (д) *Mya japonica*, (е) the lugworm of the family Arenicolidae.



**Рис. 9.** Пельтий: (а, б) общий вид, (в) литорина грубая, (г) петушок тихоокеанский, (д) грацилярия бородавчатая, (е) саргассум Миябе.

**Fig. 9.** Peltium: (а, б) general view, (в) *Littorina squalida*, (г) *Ruditapes philippinarum*, (д) *Gracilaria verrucosa*, (е) *Sargassum miyabei*.



**Рис. 10.** Саксозий: (а, б) общий вид, (в) сахарина японская и филлоспадикс иватенский, (г) зостера морская и пальмария узкоугольная, (д) брюхоногие моллюски нептунья, нуцелла и литорина, (е) актинии сем. Actiniidae.  
**Fig. 10.** Saxosium: (a, б) general view, (в) *Saccharina japonica* and *Phyllospadix iwatensis*, (г) *Zostera marina* and *Palmaria stenogona*, (д) *Neptunea arthritica*, *Nucella heyseana*, and *Littorina squalida*, (е) sea anemones of the family Actiniidae.

### Скатебра

Скатебра занимает ровные и слабонаклонные площадки илисто-песчаных отложений. Рельеф поверхности определяется биотурбацией и представлен множеством мелких микроформ (углубления, конусы, отверстия). На более промытых участках возможна слабовыраженная волновая рябь. Этот тип ландшафта распространен от с. Соловьевка до с. Третья Падь только в пределах верхней и средней литорали.

Здесь отмечаются осадки смешанного типа: алевроит с переменной примесью песка и ракушечной дресвы. Скелет разобщенный и ячеистый за счет мелких камней и раковин в толще осадка. Осадки биоподвижны, чем обуславливается высокая пластичность верхнего слоя.

Характерны многочисленные отверстия инфауны диаметром до 2 см, локальные кратерообразные углубления, экскретные бугорки и отдельные участки биоглифов, на поверхности часто присутствуют обрывки морских трав и макроводорослей.

Эдификаторами служат эндобионты-экзофаги – двустворчатые моллюски (*Mya japonica* J.C. Jay, 1857, *Ruditapes philippinarum* (A. Adams & Reeve, 1850), местами – *Macoma balthica*), а также полихеты сем. Arenicolidae, редко встречается роющая креветка *Neotrypaea japonica* (Ortmann, 1891). Среди эктобионтов чаще встречаются крабы *Hemigrapsus takanoi* Asakura & Watanabe, 2005 и брюхоногий моллюск *Cryptonatica janthostoma* (Deshayes, 1839). Фитобентос развивается слабо и представлен фрагментарно (ПП 5 %) морской травой *Zostera marina* (рис. 5).

### Фрактум

Фрактум представляет собой пятнистую мозаику «островков» твердого субстрата (скала, камни) и «окон», кольматированных песчано-илистыми отложениями. Данная бентема занимает небольшой участок верхней и нижней литорали в северной части с. Третья Падь.

На твердых пятнах скелет бионеподвижный (монокристаллический или ячеистый), в мягких прогалинах – песчано-илистый грунт с разобщенными мелкими камнями и ракушечной дресвой. Это сочетание задает смешанный биотопный набор внутри одного ландшафта.

На твердом основании отмечаются следы прикрепления и обрастаний, в «окнах» – отверстия инфауны двустворчатых, мелкие экскретные пятна, биоглифы, а также обрывки макрофитов.

Сообщество структурно смешанное: на твердых «островках» развиты эктобионты-экзофаги (актинии сем. Actiniidae Rafinesque 1815) и эпифаги (*Littorina squalida* Broderip & G.B. Sowerby I, 1829, *Batillaria attramentaria*), в мягких «окнах» – эндобионты (*Mya japonica*, *Macoma balthica*, *Ruditapes philippinarum*) и полихеты, также обычны крабы *Hemigrapsus takanoi*. Фитобентос представлен разрозненными пятнами различных макрофитов (рис. 6).

### Сегетий

Данный тип ландшафта представляет собой площадки с биоосложненной поверхностью за счет дернины морских трав *Zostera marina*, *Z. asiatica*, *Z. noltii* Hornemann, 1832 и *Phyllospadix iwatensis* Makino, 1931. Осадочная основа – песчано-илистые и илисто-песчаные субстраты, а также скальные основания с россыпью камней. Грунт кольматированный с ячеистым скелетом, с биоподвижными и бионеподвижными элементами, а также с бионеподвижным монокристаллическим скелетом. Сегетий встречается мозаично, отмечен в нижней литорали в районе с. Соловьевка, а по мере продвижения на юг, до с. Третья Падь, его распространение смещается в верхнюю литораль.

На мелкодисперсных субстратах повсеместны отверстия инфауны двустворчатых моллюсков и полихет, а также следы их жизнедеятельности. Доминируют эндобионты-экзофаги *Ruditapes philippinarum* и *Mya japonica* в зарослях *Zostera marina* и *Laternula gracilis*

(Reeve, 1860) в *Z. noltii*. Местами встречаются морские звезды *Asterias amurensis* Lutken, 1871 и брюхоногие моллюски *Nucella heyseana* и *Littorina squalida*. Покрытие морских трав варьирует от разреженных пятен до сплошных зарослей с ПП до 80 % на отдельных участках. На твердых включениях массово отмечаются бурые водоросли *Gracilaria verrucosa* (Hudson) Papenfuss 1950, *Sargassum pallidum* (Turner) C. Agardh 1820, *Palmaria stenogona* Perestenko 1980, *Saccharina japonica* C.E. Lane, C. Mayes, Druehl & G.W. Saunders 2006 и *Ulva fenestrata* Postels & Ruprecht 1840, ПП которых не превышает 15 % (рис. 7).

### Ареноид

Ареноид представлен полосами песчаных отложений с устойчиво сформированной рябью и рифелями, отражающими действие волн и течений; рисунок поверхности дна динамичен, но морфологически устойчив. Бенгема расположена в нижней литорали на небольшом участке между селами Соловьевка и Третья Падь.

Грунт биоподвижный, представлен мелким и средним хорошо отсортированным песком (иногда илисто-песчаные смеси) с редкой примесью ракушечной дресвы.

На поверхности наблюдаются отверстия инфавны двустворчатых моллюсков, биоглифы и локальные скопления обрывков листьев морских трав.

Типичны песчаные комплексы эндобионтов-экзофагов (*Spisula sachalinensis* (Schrenck, 1861), *Mya japonica*, *Siliqua alta* (Broderip & G. B. Sowerby I, 1829)), обычны хищные гастроподы *Cryptonatica janthostoma*. Макрофиты развиты слабо, проективное покрытие не превышает 10 % (*Zostera asiatica* и *Z. marina*) (рис. 8).

### Пельтий

Ландшафт имеет каменистую поверхность с характерной ячеистостью. Фаза скелета – бионеподвижная, ячеистого типа. Грунт представлен галькой и гравием диаметром

от нескольких миллиметров до 10–20 см, местами с примесью раковинной дресвы. Межкамневые ячейки кольматированы тонкодисперсным материалом. Между камнями и в ячейках встречаются отверстия инфавны, узкие ходы и другие следы жизнедеятельности организмов. Данный ландшафт распространяется от верхней литорали в районе с. Третья Падь вдоль береговой полосы на юг и постепенно расширяется, охватывая нижнюю литораль в районе г. Корсаков. По мере уменьшения количества и размеров обломочного материала пельтий постепенно переходит в саксозий.

Эктобионты пельтия представлен актиниями сем. Actiniidae и литоринами *Littorina squalida*; в межкамневых карманах обычны эндобионты-экзофаги (*Mya japonica*, *Ruditapes philippinarum*), на песчано-илистых прогалинах встречается *Cryptonatica janthostoma*. Проективное покрытие макрофитами редко превышает 20 %, наиболее встречаемые виды: *Gracilaria verrucosa*, *Saccharina japonica*, *Sargassum miyabei* Yendo 1907 (рис. 9).

### Саксозий

В литоральной зоне саксозий представлен коренными выходами горных пород в виде плит и гряд с ровной до слабонаклонной поверхностью. Микрорельеф формируют трещины, узкие уступы и прогалины с алевритовыми и песчаными осадками. Этот тип ландшафта широко распространен до нижней литорали, зачастую переходящей в сублитораль.

Субстрат относится к скелетной фазе с монолитным бионеподвижным скелетом. В прогалинах аккумулируются илисто-песчаный материал и раковинная дресва. На скале возможно появление тонкого слоя мелкозернистого материала.

В период осушки на поверхности и в прогалинах отмечаются отверстия инфавны и небольшие участки биоглифов.

На открытых твердых субстратах доминирует эпибентос: актинии сем. Actiniidae,

брюхоногие моллюски *Neptunea arthritica* (Valenciennes, 1858), *Littorina squalida* и *Nucella heyseana*, крабы *Hemigrapsus takanoi*, а также морские звезды *Asterias amurensis* и серые морские ежи *Strongylocentrotus intermedius* (A. Agassiz, 1864); в песчано-илистых прогалинах встречаются двустворчатые моллюски *Ruditapes philippinarum*. Фитобентос разнообразен и варьирует от пятен красных (ПП составляет 25 %) (*Palmaria stenogona*, *Gracilaria verrucosa*, *Chondrus pinnulatus* (Harvey) Okamura, 1930, кораллиновые и др.) и зеленых водорослей (*Ulva fenestrata*, нитчатые) до устойчивых зарослей сахарины (проективное покрытие не более 50 %) *Saccharina japonica*; нередки куртины морских трав, таких как *Phyllospadix iwataensis* и *Zostera marina*, ПП которых не превышало 20 % (рис. 10).

## Обсуждение результатов

Результаты исследования подтверждают применимость сублиторальной типологии бентем к литоральной зоне при учете специфических модификаций признаков, обусловленных условиями периодического осушения. Смена бентем сопряжена с изменением литологических характеристик донных отложений, что обеспечивает возможность типологической стандартизации ландшафтов литорали в соответствии с гранулометрическим составом и морфологией субстрата.

Особую ценность в условиях литорали приобретают вистигивитные признаки. Периодическое обнажение дна усиливает контрастность и различимость следов жизнедеятельности организмов: отверстия инфауны, экскретные конусы, биоглифы и другие маркеры становятся более заметными, что облегчает диагностику домиформной группы ландшафтов\*, таких как skateбра и метагест. В сублиторали эти признаки часто маски-

руются донными осадками, что затрудняет их идентификацию. Сочетание вистигивитных признаков с характеристиками субстрата, такими как фаза и тип скелета, позволяет стандартизировать диагностику ландшафтов на уровне, достаточном для детального картографирования.

В соответствии с используемой методикой [3, 8], выделение бентем на литорали основывается преимущественно на качественных показателях, тогда как описание сообществ базируется на количественных. Знание структуры сообщества, характерного для определенной бентемы, позволяет осуществить переход от качественных характеристик к количественным. При этом, учитывая существующие публикации по сообществам литорали на Дальнем Востоке, например работы О.Г. Кусакина с соавторами, А.П. Цурпало, М.Б. Ивановой, И.В. Бутова с соавторами, в дальнейшем представляется возможным дополнить характеристики бентем количественными показателями, по крайней мере по основным фоновым образующим видам. Это позволит установить корреляцию между различными подходами к описанию ландшафтов литорали и связать их результаты с методами хорологических исследований.

## Заключение

В результате проведенного исследования охарактеризована структура и пространственное распределение ландшафтов литоральной зоны восточной части бухты Лососей (зал. Анива Охотского моря). На основе анализа морфологических параметров донных отложений, гранулометрического состава и состава биотических сообществ выделено семь основных типов бентем: метагест, skateбра, фрактум, сегетий, ареноид, пельтий и саксозий. Установлено, что распределение данных типов связано с текстурой субстрата,

\* Группа домиформных ландшафтов (от лат. domus – купол). Название дано по характерной отличительной черте этих ландшафтов: многочисленным бугоркам, холмикам, кратерам, отверстиям в грунте и т. д. – результату жизнедеятельности организмов, обитающих в грунте и на его поверхности [8].

степенью скелетности грунтов, а также уровнем развития макрозоо- и фитобентоса.

В ходе исследования показано, что вистигивитные признаки – например, отверстия, созданные инфауной, экскретные образования, разнообразные следы жизнедеятельности (биоглифы) – имеют важное диагностическое значение для характеристики литоральных ландшафтов. Подобные признаки особенно выражены в периоды отлива, что существенно облегчает определение и разграничение ландшафтных единиц, таких как skateбра и метагест. В отличие от сублиторали, где биогенные структуры часто маскируются слоем донных отложений, в зоне периодического осушения они служат яркими маркерами доминирующих групп организмов и типа грунта.

Применение единых диагностических критериев (типы грунтов, формы рельефа, следы биотурбации) обеспечивает унификацию подходов к картографированию литоральных ландшафтов и способствует получению сопоставимых данных при исследованиях различных прибрежных акваторий. Предложенная типология обеспечивает систематизацию морфологических и биотических характеристик, способствуя единообразному описанию литоральных комплексов.

Регулярные обследования ключевых участков позволяют фиксировать изменения в пространственной структуре литорали, включая изменение границ между типами бентом, перестройку видового состава доминирующих организмов, появление или исчезновение характерных биогенных структур. Подобные данные необходимы для количественной оценки экологических изменений и определения устойчивости прибрежных экосистем к внешним воздействиям.

Представленная систематизация ландшафтов литорали может быть использована для картографирования и мониторинга состояния прибрежных морских экосистем дальневосточных морей России.

## Список литературы

1. Гурьянова Е.Ф. Теоретические основы составления карт подводных ландшафтов. *Труды Третьей сессии Всесоюзного палеонтологического о-ва*. М.: Госгеолтехиздат, 1959, с. 52–61.
2. Чупахин В.М. *Основы ландшафтоведения*. М.: Агропромиздат, 1987, 168 с.
3. Преображенский Б.В., Жариков В.В., Дубейковский Л.В. *Основы подводного ландшафтоведения: (Управление морскими экосистемами)*. Владивосток: Дальнаука, 2000, 352 с.
4. Скаридова М.А. *Правовое регулирование защиты морских ландшафтов: учебное пособие*. СПб.: Academus, 2017, 32 с.
5. Шуйский Ю.Д. Физико-географические природные системы в Мировом океане. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2021,1:35–49.
6. Кусакин О.Г. Литоральные сообщества. В кн.: *Биология океана. Т. 2: Биологическая продуктивность океана*. М.: Наука, 1977, с. 111–132.
7. Блинова Е.И., Вилкова О.Ю., Милютин Д.М., Пронина О.А., Штрик В.А. *Методы ландшафтных исследований и оценки запасов донных беспозвоночных и водорослей морской прибрежной зоны*. М.: Изд-во ВНИРО, 2005, 135 с. (Изучение экосистем рыбохозяйственных водоемов, сбор и обработка данных о водных биологических ресурсах, техника и технология их добычи и переработки; вып. 3).
8. Арзамасцев И.С., Преображенский Б.В., Иванов Н.А., Обезьянов К.А. *Атлас подводных ландшафтов Японского моря*. М.: Наука, 1990, 224 с.
9. Косьян Р.Д. Об образовании и существовании рифелей при волнении в береговой зоне водоемов. *Водные ресурсы*. 1987,1:52–60.

## References

1. Guryanova E.F. [Theoretical foundations for compiling underwater landscape maps. In: *Proceedings of the Third Session of the All-Union Paleontological Society*]. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1959, p. 52–61. (In Russ.).
2. Chupakhin V.M. [*Fundamentals of landscape science*]. Moscow: Agropromizdat, 1987, 168 p. (In Russ.).
3. Preobrazhensky B.V., Zharikov V.V., Dubeykovsky L.V. *Basics of underwater landscape studies (management of marine ecosystems)*. Vladivostok: Dalnauka, 2000, 352 p. (In Russ.).
4. Skaridova M.A. [*Legal regulation of the marine landscape protection: Textbook*]. Saint Petersburg: Academus, 2017, 32 p. (In Russ.).

5. Shuysky Yu.D. Physical-geographical natural systems in the World Ocean. *Journal of the Belarusian State University. Geography. Geology*. 2021,1:35–49.
6. Kusakin O.G. Littoral communities. In: *Ocean biology*. Vol. 2: *Biological productivity of the Ocean*. Moscow: Nauka, 1977, p. 111–132. (In Russ.).
7. Blinova E.I., Vilkova O.Yu., Milyutin D.M., Pronina O.A., Shtrik V.A. *Methods for landscape research and assessment of stocks of benthic invertebrates and algae in the marine coastal zone*. Moscow: Publ. VNIRO, 2005, 135 p. (Study of ecosystems of fisheries water bodies, collection and processing of data on aquatic biological resources, techniques and technologies for their extraction and processing; Issue 3). (In Russ.).
8. Arzamastsev I.S., Preobrazhensky B.V., Ivanov N.A., Obezyanov K.A. *Atlas of underwater landscapes of the Sea of Japan*. Moscow: Nauka, 1990, 224 p. (In Russ.).
9. Kosyan R.D. On the formation and existence of ripples during waves in the coastal zone of water bodies. *Water Resources*. 1987,1:52–60. (In Russ.).

## Об авторах

✉ **Кокорина Татьяна Александровна**, специалист лаборатории аквакультуры беспозвоночных и водорослей, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО), Южно-Сахалинск, Россия, kokorinata@sakhniro.vniro.ru. <https://orcid.org/0009-0000-8650-7651>

**Гон Руслан Тутчерневич**, старший специалист лаборатории аквакультуры беспозвоночных и водорослей, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО), Южно-Сахалинск, Россия, gonrt@sakhniro.vniro.ru. <https://orcid.org/0009-0001-7939-3112>

## About the Authors

✉ **Kokorina, Tatyana A.**, Specialist of the Laboratory of aquaculture of invertebrates and algae, Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (SakhNIRO), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, kokorinata@sakhniro.vniro.ru. <https://orcid.org/0009-0000-8650-7651>

**Gon, Ruslan T.**, Senior Specialist of the Laboratory of aquaculture of invertebrates and algae, Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (SakhNIRO), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, gonrt@sakhniro.vniro.ru. <https://orcid.org/0009-0001-7939-3112>

Поступила 25.11.2025

Принята к публикации 21.02.2026

Received 25 November 2025

Accepted 21 February 2026

© Авторы, 2026 г.  
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2026.  
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 504.054

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.1.089-100>  
<https://www.elibrary.ru/jfeyyf>

## Оценка химического загрязнения почв города Калининграда

Е. А. Архипов, С. И. Зотов, Ю. В. Королева, М. И. Колягина

*Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия*

**Резюме.** Проведено комплексное исследование почв г. Калининграда с целью оценки уровня и структуры химического загрязнения. В работе показана принципиальная важность использования локального урбанизированного фона, а не глобальных кларков для достоверной оценки техногенной нагрузки. Установлено, что почвы города характеризуются устойчивым поликомпонентным загрязнением, с формированием четко локализованных геохимических аномалий. Методами статистического анализа и геоинформационного картографирования выявлены два основных очага загрязнения, пространственно совпадающих с зонами интенсивной промышленной и портовой деятельности. Наиболее значительное накопление отмечено для свинца и цинка, уровни содержания которых достигают уровней «сильного» загрязнения. С применением системы индексов (Igeo, PI, EF, NPI, PLI, Zc) территория дифференцирована по степени загрязнения почв, идентифицирован характер источников поступления загрязняющих веществ. Полученные результаты доказывают необходимость проведения геоэкологического мониторинга и разработки целевых природоохранных мероприятий для выявленных зон экологического неблагополучия.

**Ключевые слова:** урбанизированная территория, почвы, тяжелые металлы, фоновые концентрации, индекс загрязнения, пространственное распределение, геохимические аномалии

## Assessment of chemical contamination of Kaliningrad soils

Egor A. Arkhipov, Sergey I. Zotov, Yulia V. Koroleva, Maria I. Kolyagina

*Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia*

**Abstract.** A comprehensive study of Kaliningrad soils was conducted to assess the level and structure of chemical pollution. The study demonstrates the fundamental importance of using a local background, rather than global clarkes, for reliable assessment of anthropogenic impact. The stable polycomponent pollution of soils in Kaliningrad was identified, with the formation of clearly localized geochemical anomalies. The methods of statistical analysis and geographic information mapping revealed two main sources of pollution, spatially coinciding with the zones of intensive industrial and port activity. The most significant accumulation was found for lead and zinc, the levels of which reached the levels of “severe” pollution. The application of the index system (Igeo, PI, EF, NPI, PLI, Zc) made it possible to differentiate the territory by the degree of soil pollution and identify the nature of the sources of pollutants. The results obtained prove the need for geoecological monitoring and the development of targeted environmental protection measures for identified areas of environmental pollution.

**Keywords:** urbanized area, soils, heavy metals, background concentrations, pollution index, spatial distribution, geochemical anomalies

**Для цитирования:** Архипов Е.А., Зотов С.И., Королева Ю.В., Колягина М.И. Оценка химического загрязнения почв города Калининграда. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 1, с. 89–100. <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.1.089-100>; <https://www.elibrary.ru/jfeyyf>

**For citation:** Arkhipov E.A., Zotov S.I., Koroleva Yu.V., Kolyagina M.I. Assessment of chemical contamination of Kaliningrad soils. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 1, p. 89–100. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.1.089-100>; <https://www.elibrary.ru/jfeyyf>

## Введение

Урбанизированные территории характеризуются комплексным воздействием антропогенных факторов на компоненты окружающей среды, при этом почвы выступают важным индикатором состояния среды. Актуальность исследования химического загрязнения почв г. Калининград обусловлена высокой степенью урбанизации территории: согласно данным Калининградского статистического управления, доля городского населения в области составляет 77.5 %, при этом сам регион характеризуется развитой транспортной инфраструктурой.

Предыдущие исследования почв Калининграда выявили значительное превышение содержания тяжелых металлов в промышленных и транспортных зонах по сравнению с рекреационными территориями [1, 2]. В частности, содержание свинца в верхнем гумусовом горизонте на наиболее загрязненных участках достигало 103.5 мг/кг, что более чем в 3 раза превышает ПДК [3]. На примере почв городских парков Калининграда показано, что даже рекреационные зоны подвержены антропогенной трансформации [4]. Диагностированы урбаноземы и техноземы с наличием артефактов, повышенной плотностью сложения, изменением химических свойств и аккумуляцией биогенных элементов, что свидетельствует о глубоком изменении почвенного покрова в условиях урбанизации.

Несмотря на наличие отдельных исследований, посвященных загрязнению городских почв Калининграда, не существует комплексной пространственной геохимической оценки почв, в том числе на основе локального фона. В этой связи целью настоящего исследования является комплексная оценка химического состояния почвенного покрова Калининграда с установлением закономерностей пространственного распределения преобладающих загрязнителей. Перед авторами стояли задачи: определение валового содержания тяжелых металлов и нефтепродуктов в городских почвах; последовательный расчет индивидуальных и комплексных индексов загрязнения для оценки уровня и структуры техногенной нагрузки; и на этой основе оценка простран-

ственного распространения загрязнения с выделением зон поликомпонентного загрязнения. Особое внимание уделено сопоставительному анализу промышленных, транспортных, селитебных и рекреационных территорий как основе для выявления зон экологического риска и для дальнейшей разработки научно обоснованных рекомендаций по оптимизации природоохранной деятельности в условиях урбанизированной среды.

## Объекты и методы исследований

Для комплексной оценки химического загрязнения почв на территории Калининграда было отобрано 10 проб почв в пунктах мониторинга. Критерии репрезентативности проб устанавливались с учетом функционального зонирования территории, ветрового режима и расположения относительно источников негативного воздействия на окружающую среду.

Сеть из 10 пунктов мониторинга (плотность сети – 1 проба примерно на 15 км<sup>2</sup>) была сформирована для проведения скрининговой оценки загрязнения почв и выявления ключевых зон экологического риска.

Отбор проб производился в соответствии с требованиями ГОСТ 17.4.3.01-2017 методом конверта в сезонные периоды 2025 г. – весной (апрель) и осенью (октябрь). Почвенные образцы отбирали из поверхностного гумусового горизонта (глубина 0–10 см). Тип почв исследуемых образцов – урбаземы, преимущественно супесчаного гранулометрического состава с техногенными включениями, в том числе дорожной пыли.

Аналитические исследования выполнены на базе Высшей школы живых систем Балтийского федерального университета им. И. Канта. Пробоподготовка почвенных образцов включала высушивание до воздушно-сухого состояния, удаление растительных остатков, измельчение и просеивание через сито (1 мм). Валовое содержание металлов (Zn, Cu, Pb, Ni, Cr, MnO, Co, TiO<sub>2</sub>, V, Sr, As) определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре (Спектроскан МАКС G, Россия) по методике ФР.1.31.2016.25423. Метрологические

характеристики методики: предел обнаружения (ПО), мг/кг: Zn – 4, Cu – 4, Pb – 9, Ni – 2, Cr – 11, Mn – 37, Co – 4, V – 8, Sr – 3, As – 2. Нижний предел количественного определения, мг/кг: Zn – 14, Cu – 14, Pb – 31, Ni – 7, Cr – 36, Mn – 124, Co – 14, V – 26, Sr – 10, As – 5.

Содержание нефтепродуктов устанавливали флуориметрически на спектрометре RF-5301PC (Shimadzu, Япония) в соответствии с ПНД Ф 16.1:2.21-98. При определении концентрации нефтепродуктов предел обнаружения составил 5.6 мг/кг, нижний предел количественного определения – 18.7 мг/кг. Величину рН солевой вытяжки измеряли потенциометрически (рН-метр HANNA HI 2210, Германия) по ГОСТ 26483-85. Все измерения проведены в трехкратной повторности.

В перечень наблюдаемых загрязняющих веществ включены тяжелые металлы и нефтепродукты, характеризующиеся высокой токсичностью, устойчивостью в окружающей среде и являющиеся типичными техногенными маркерами для урбанизированных территорий. Указанные поллютанты также рассматриваются как приоритетные в рамках природоохранного законодательства Российской Федерации, в том числе при проведении инженерно-экологических изысканий в соответствии с СП 502.1325800.2021. Важно отметить, что проведенная оценка основана на анализе валовых форм элементов и не дает прямой информации о биодоступности и подвижности металлов, которые могут оказать влияние на живые организмы.

Интегральная оценка загрязнения почв проведена на основании индивидуальных и комплексных индексов.

#### *Индивидуальные индексы*

Индекс геоаккумуляции Igeo (Geoaccumulation Index) служит геохимическим критерием [5, 6] для выявления загрязнения:  $I_{geo} = \log_2 (C_i / 1.5 GB_i)$ , где  $C_i$  – содержание i-го металла в верхнем горизонте;  $GB_i$  – фоновое содержание i-го металла.

Индекс загрязнения PI (Single Pollution Index) рассчитывается по формуле [6]:  $PI = C_i / GB_i$ , используется для выявления наличия загрязнения отдельными поллютантами

и является основой для расчета комплексных показателей загрязнения.

#### *Комплексные индексы*

Коэффициент загрязнения PLI (Pollution Load Index) представляет собой геометрическое среднее [6, 7] от PI:  $PLI = (PI_1 * PI_2 * \dots * PI_n)^{1/n}$ .

Коэффициент концентрации EF (Enrichment Factor) рассчитывается с учетом концентрации стабильного элемента [8]. В соответствии с общепринятой практикой в геохимии, в качестве референтного элемента для расчета EF выбран титан (Ti). Титан связан преимущественно с литогенной фракцией почвы, характеризуется низкой подвижностью и слабо вовлекается в техногенные потоки, что делает его надежным индикатором для нормирования содержаний других металлов. Формула для расчета данного коэффициента:  $EF = (C_i / C_{Ti}) / (GB_i / GB_{Ti})$ , где  $C_i$  – содержание i-го металла;  $C_{Ti}$  – содержание Ti;  $GB_i$  – фоновое содержание i-го металла;  $GB_{Ti}$  – фоновое содержание Ti.

Индекс загрязнения NPI (Nemerow Pollution Index) широко используется для оценки качества [9, 10], поскольку учитывает вклад не только каждого загрязнителя, но и потенциальную опасность металла-загрязнителя с наибольшим содержанием:

$NPI = \sqrt{0.5(PI_{1max}^2 + PI_{lave}^2)}$ , где  $PI_{1max}$  – максимальное значение PI среди n металлов, а  $PI_{lave}$  – среднее значение PI.

В природоохранном законодательстве Российской Федерации (СанПиН 1.2.3685-21) применяется суммарный показатель химического загрязнения Zc, который определяется по формуле:  $Zc = (KC_1 + \dots + KC_n) - (n - 1)$ , где n – число определяемых суммируемых веществ с  $KC_i > 1$ ;  $KC_i$  – коэффициент концентрации i-го химического элемента, равный кратности превышения его содержания над фоновым значением.

Ввиду отсутствия установленного геохимического фона в почвах исследуемого региона, в качестве эталона сравнения были использованы средние содержания химических элементов в верхней части земной коры (кларки) для городов от 300 тыс. до 700 тыс. чел., в данную категорию попадает г. Калининград [11].

Также применялись предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) по СанПиН 1.2.3685-21, за исключением стронция, кобальта и хрома ввиду отсутствия установленных нормативов для валовых форм этих элементов.

Содержание нефтепродуктов для почв и грунтов в Российской Федерации не нормируется. Согласно данным Ю.И. Пиковского [12], содержание нефтепродуктов в почве до 100 мг/кг соответствует «фоновой» концентрации, 100–500 мг/кг – «повышенно фоновый», 500–1000 мг/кг – «умеренный» уровень загрязнения, 1000–2000 мг/кг – «умеренно опасное» загрязнение, 2000–5000 мг/кг – «сильное» загрязнение, более 5000 мг/кг – «опасное» загрязнение. На данный момент при проведении инженерно-экологических изысканий и смежных экологических работ применяют норматив в 1000 мг/кг, в соответствии с Письмом Минприроды РФ от 9 марта 1995 г. N 25/8-34 «О Методических рекомендациях по выявлению деградированных и загрязненных земель».

Статистическую обработку данных проводили с расчетом стандартных параметров выборок в Microsoft Excel (пакет R). Распределения концентраций большинства элементов и индексов отличались от нормального, в связи с чем в работе преимущественно используются непараметрические описательные статистики (медиана, квартили) и методы визуализации (диаграммы «ящик с усами»), устойчивые к отклонениям от нормальности. Картографическое обеспечение исследований базировалось на материалах QGIS (Contour plugin) с последующей визуализацией в графическом редакторе Corel Draw.

## Результаты и обсуждение

Отбор проб в два сезона проведен для учета возможной временной динамики. Предварительный анализ данных U-критерием Манна–Уитни не выявил статистически значимых ( $p < 0.05$ ) различий между сезонными выборками для подавляющего большинства определяемых веществ, что позволило рассматривать данные как единую совокупность для интегральной оценки уровня загрязнения.

## Валовые содержания тяжелых металлов и нефтепродуктов в исследуемых почвах

Анализ данных, представленных в табл. 1, выявляет ключевые статистические закономерности в содержании загрязняющих веществ в почвах Калининграда. Сравнение средних арифметических концентраций с кларками демонстрирует их существенное превышение по свинцу и цинку, что служит статистическим индикатором антропогенного вклада. При этом оценка вариабельности данных, выраженная коэффициентом вариации, указывает на точечный характер загрязнения такими элементами, как Pb (95.3 %), As (51.1 %), Zn (79.0 %), Cu (68.2 %) и Co (85.9 %), для которых характерен высокий разброс концентраций. Данный вывод подтверждается анализом асимметрии распределения, выявившим выраженный правый «хвост» для этих металлов (значения асимметрии от 1.5 до 4.5), что статистически доказывает наличие проб с аномально высокими содержаниями.

Локальный геохимический фон установлен по результатам анализа 6 фоновых проб, отобранных в г. Светлогорск (~35 км от Калининграда). Данная территория выбрана в силу геологической и ландшафтной схожести с изучаемым регионом при минимальном влиянии крупных промышленных источников загрязнения, а также благодаря статусу лечебно-оздоровительной местности и курорта федерального значения. Пробы отбирались на ненарушенных участках вне селитебной зоны. Почвы фоновой территории дерново-подзолистые супесчаные, что сопоставимо с преобладающими типами почв в Калининграде.

Для расчета фоновых значений использована медиана полученных концентраций, как устойчивая к возможным случайным аномалиям мера. Эти значения применялись далее для расчета индексов загрязнения, что позволяет более объективно, по сравнению с глобальными кларками, выделить именно антропогенный вклад в накопление тяжелых металлов в почвах Калининграда.

Визуализация данных в виде диаграмм «ящик с усами» для преобладающих загрязнителей на рис. 1 наглядно дополняет статистический анализ. Компактный межквартильный

размах с наличием значительных выбросов иллюстрирует локальный и интенсивный характер загрязнения для свинца и мышьяка.

В случае цинка медиана располагается в повышенной области, а длинный верхний «ус» с выбросами свидетельствует о том, что его накопление имеет повышенный уровень для большинства проб. Диаграмма по не-

фтепродуктам, обладающая самым широким «ящиком», подтверждает высокий общий разброс данных при отсутствии резких выбросов, что согласуется с выводом о рассредоточенных источниках поступления, в частности от передвижных источников выбросов. Это позволяет охарактеризовать их уровень как «повышенно фоновый».

**Таблица 1.** Концентрации загрязняющих веществ в почвах Калининграда (мг/кг)

**Table 1.** Concentrations of pollutants in the soils of Kaliningrad (mg/kg)

Пункт мониторинга	Sr	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Co	Mn	Cr	V	pH <sub>сол</sub> (KCl)	Нефтепродукты (суммарно)
<i>Весна 2025</i>												
1	66	<b>10</b>	5	81	–	16	–	529	63	44	6.4	281.6
2	96	<b>22</b>	7	94	–	21	–	401	69	51	6.0	295.5
3	126	<b>12</b>	6	80	–	21	–	454	88	67	6.3	189.9
4	107	44	8	156	23	22	–	468	76	56	6.1	351.3
5	115	<b>12</b>	6	124	–	16	–	524	73	50	6.2	340.9
6	154	123	18	303	–	31	<b>6</b>	1429	78	54	6.7	39.6
7	128	58	11	378	–	23	–	469	69	39	6.8	47.2
8	105	<b>16</b>	–	52	–	11	–	298	54	35	6.5	195.6
9	130	<b>16</b>	5	76	–	14	–	371	63	47	6.7	98.2
10	79	<b>17</b>	–	35	–	8	–	199	59	20	5.9	73.5
<i>Осень 2025</i>												
1	115	118	–	96	–	14	<b>5</b>	649	63	40	6.8	397.5
2	133	<b>15</b>	6	86	–	13	–	539	63	27	6.8	335.1
3	80	<b>14</b>	5	76	–	17	–	788	74	57	7.1	135.1
4	145	70	10	222	–	19	<b>6</b>	512	87	57	7.2	141.4
5	79	47	10	234	–	26	–	411	72	57	6.7	335.3
6	89	–	5	96	–	14	–	999	58	<b>24</b>	7.5	361.8
7	151	34	7	474	–	23	–	454	72	41	6.9	276.7
8	96	34	8	228	–	20	–	1024	60	42	6.9	277.9
9	109	<b>15</b>	5	67	–	17	–	308	60	51	6.3	114.8
10	92	<b>23</b>	–	62	–	10	–	197	53	<b>19</b>	6.1	108.2
Кларк	359.2	45.6	10	115.8	30.1	28	14.4	715.2	55	78.9		
Локальный фон	92.0	10.5	5.0	58.0	5.0	10.5	1.0	578.0	59.0	30.0	6.5	127.8
Среднее арифметическое	109.8	35.4	6.8	151.0	5.9	17.8	2.1	551.2	67.7	43.9	6.6	219.9
Медиана	108.0	19.5	6.0	95.0	5.0	17.0	1.0	468.5	66.0	45.5	6.7	236.2
Стандартное отклонение	25.5	33.7	3.5	119.3	4.0	5.7	1.8	302.9	9.9	13.5	0.4	117.7
Коэффициент вариации, %	23.2	95.3	51.1	79.0	68.2	32.0	85.9	55.0	14.6	30.7	6.5	53.5
Минимум	66	8	3	35	5	8	1	197	53	19	5.9	39.6
Максимум	154	123	18	474	23	31	6	1429	88	67	7.5	397.5
Асимметрия	0.2	1.8	1.9	1.5	4.5	0.4	1.5	1.6	0.6	–0.5	0.2	–0.1

*Примечание.* Прочерк – ниже предела обнаружения; выделены значения менее нижнего предела количественного определения.

*Note.* Dash indicates values below the LOD; values less than the LLOQ are highlighted.

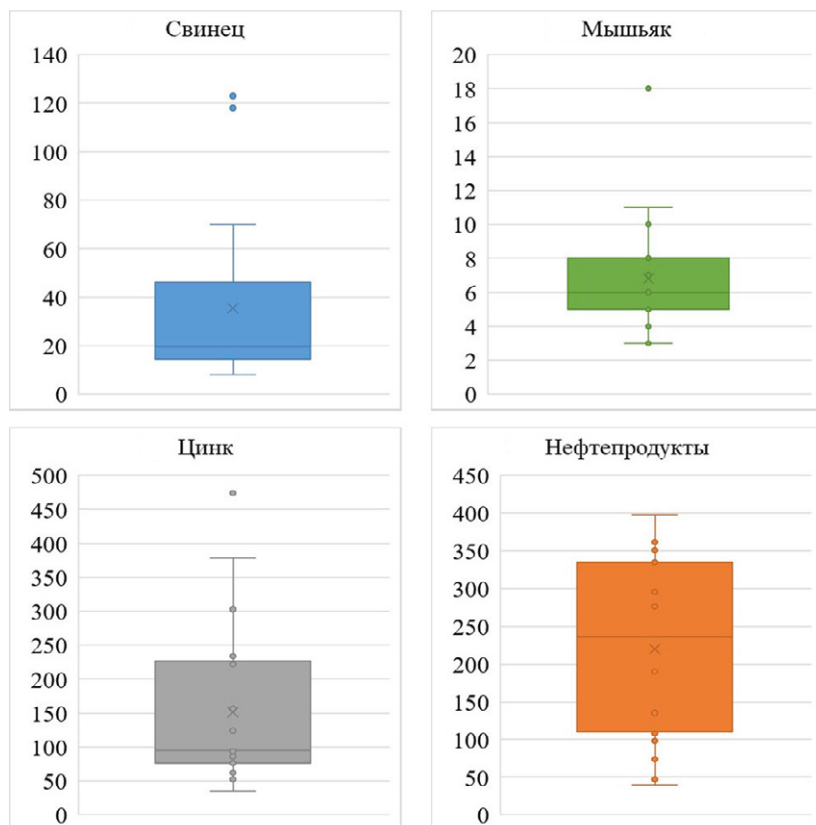


Рис. 1. Диаграммы размаха по наиболее преобладающим загрязнителям (мг/кг).

Fig. 1. Box plot for the most prevailing pollutants (mg/kg).

### Расчет и интерпретация геохимических индексов загрязнения почв

Отметим, что для дальнейших расчетов индексов принимали половину величины предела обнаружения в тех образцах, где содержание определяемого элемента находилось ниже ПО.

Анализ индекса геоаккумуляции (Igeo) и единичного индекса загрязнения (PI), представленных в табл. 2, подтверждает существен-

ную зависимость результатов оценки от выбора нормативной величины. При использовании глобальных кларков в качестве фона средние значения Igeo для всех элементов находятся ниже нуля, что формально соответствует категории незагрязненных почв. Значения PI, рассчитанные относительно кларков, в большинстве случаев также не превышают единицы.

Если заменить глобальные кларки локальными фоновыми показателями городских почв, выводы будут несколько иными. Средние значения Igeo приобретают положительные значения для свинца и цинка ( $0 < Igeo < 1$  – загрязнение от слабого до среднего), а для никеля и кобальта значения индекса пограничны между отсутствием загрязнения и слабым уровнем. Динамика индекса PI при использовании локального фона проявляется более четко: его средние значения для всех элементов, кроме марганца, превышают единицу, а для свинца (3.37) и цинка (2.60) достигают уровней, характеризующих значительное загрязнение.

Таким образом, применение глобальных кларков приводит к занижению оценки техногенной нагрузки. Использование же локального фона демонстрирует устойчивое загрязнение

Таблица 2. Значения Igeo и PI в почвах Калининграда по разным нормативам

Table 2. Igeo and PI values in the soils of Kaliningrad according to different standards

Sr	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Co	Mn	Cr	V
<i>Geoaccumulation Index (Igeo)</i>									
-0.70	-0.43	-0.39	-0.17	-0.92	-0.40	-1.14	-0.34	-0.09	-0.45
-0.11	0.21	-0.09	0.13	-0.14	0.03	0.02	-0.25	-0.12	-0.03
<i>Single Pollution Index (PI)</i>									
0.31	0.78	0.68	1.30	0.20	0.64	0.14	0.77	1.23	0.56
1.19	3.37	1.36	2.60	1.18	1.70	2.05	0.95	1.15	1.46

Примечание. Верхняя строка – среднее по кларкам, нижняя – среднее по фону.

Note. The top row is the average by clarkes, and the bottom row is the average by background.

почв города тяжелыми металлами и представляется методически более обоснованным для оценки антропогенного воздействия в городских геосистемах.

Расчет коэффициентов накопления (EF) (рис. 2) подтверждает преобладание антропогенных источников в накоплении тяжелых металлов в городских почвах. Аналогично Igeo, при использовании глобальных кларков в качестве фона все элементы демонстрируют минимальный уровень накопления ( $EF < 2$ ). Однако при сравнении с локальными фоновыми концентрациями средние значения EF повышаются, а для свинца (3.65) и цинка (3.25) достигают категории среднего уровня накопления ( $2 < EF < 5$ ). Существенное увеличение значений коэффициентов накопления относительно локального фона показывает, что концентрации свинца и цинка обусловлены техногенными поступлениями, а не естественными геохимическими условиями.

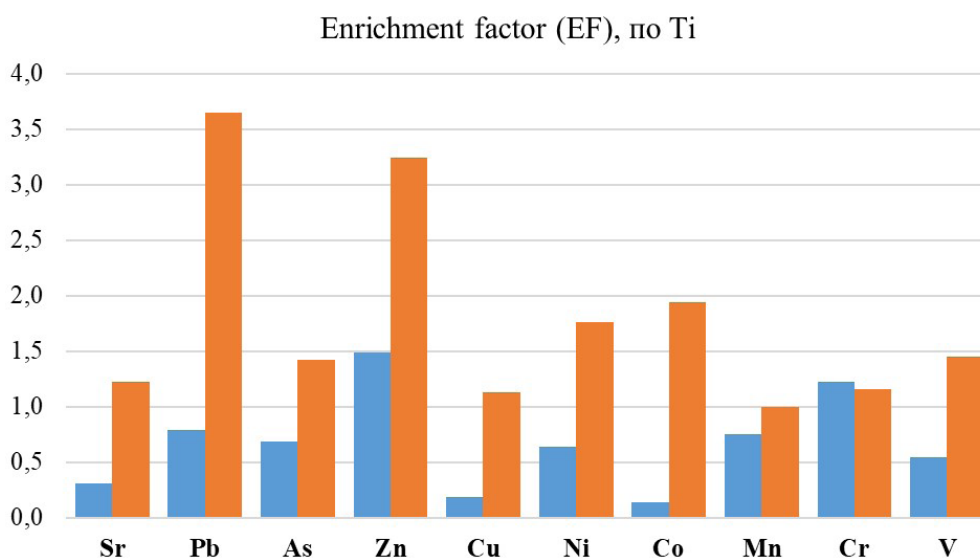
Результаты расчета комплексных индексов загрязнения (табл. 3) позволяют провести интегральную оценку загрязнения почв на различных участках. Анализ данных показывает пространственную неоднородность загрязнения городской территории. Индекс загрязнения NPI варьирует от «слабого» (1.50–1.73 на пунктах № 2, 3, 10) до «сильного» (4.37–5.45 на пунктах

№ 1, 4, 6, 7), что свидетельствует о значительной дифференциации антропогенной нагрузки.

Индекс PLI, отражающий совокупную аккумуляцию тяжелых металлов, превышает единицу на всех пунктах, кроме № 10, что указывает на практически повсеместную деградацию почв по этому показателю. При этом классификация по индексу Zc в большинстве случаев соответствует категории «допустимый» ( $Zc < 16$ ), за исключением участков № 4, 6 и 7, где состояние оценивается как «умеренно опасное» ( $16 < Zc < 32$ ).

Несмотря на различия в абсолютных значениях индексов, результаты свидетельствуют о наличии устойчивого многокомпонентного загрязнения почв на большей части исследованной территории.

Выявленный уровень загрязнения почв свинцом и цинком согласуется с ранее установленными для промышленных зон Калининграда превышениями ПДК [1, 3]. Однако, в отличие от работ, опирающихся на глобальные кларки или ПДК [2, 3, 4], применение показателей локального геохимического фона (г. Светлогорск) в качестве нормативных позволило нам избежать занижения оценки и доказать значительное техногенное накопление Pb и Zn ( $PI > 2.0$ ), которое при использовании кларков оставалось скрытым.



**Рис. 2.** Диаграмма сравнения средних значений EF по каждому элементу при расчете по кларкам (синие фигуры) и по фону (красные фигуры).

**Fig. 2.** Comparison chart of the average EF values for each element when calculated using clarkes (blue figures) and background (red figures).

**Таблица 3.** Значения комплексных индексов в почвах Калининграда**Table 3.** Values of complex indices in the soils of Kaliningrad

Пункт мониторинга	NPI		PLI		Zc	
	Значение	Категория загрязнения [8]	Значение	Категория загрязнения [6]	Значение	Уровень загрязнения
1	4.74	Сильное	1.36	Химическая деградация почв	13.39	Допустимый
2	1.55	Слабое	1.22	То же	7.41	«
3	1.73	«	1.26	«	7.07	«
4	4.37	Сильное	2.09	«	17.80	Умеренно опасный
5	2.61	Среднее	1.44	«	11.28	Допустимый
6	5.08	Сильное	1.98	«	18.65	Умеренно опасный
7	5.45	«	1.78	«	16.34	То же
8	2.18	Среднее	1.32	«	8.25	Допустимый
9	2.20	«	1.21	«	7.16	«
10	1.50	Слабое	0.85	Отсутствие деградации	4.94	«

Анализ индексов и статистических распределений позволил установить характер поступления поллютантов, подтвердив точечный, «аномальный» характер накопления Pb, Zn, As, Cu от локальных источников, что дополняет данные об антропогенной трансформации почв в рекреационных зонах [4].

### Пространственное распространение и зоны поликомпонентного загрязнения

Пространственное распределение комплексных индексов загрязнения NPI и Zc (рис. 3) демонстрирует четкую географическую приуроченность наиболее загрязненных территорий. Анализ картографических данных выявил формирование двух основных очагов загрязнения. Наиболее выраженный очаг с максимальными значениями обоих индексов сосредоточен в юго-западной части города, где расположены промышленная зона и портовая инфраструктура на р. Преголя. Второй очаг повышенного загрязнения фиксируется в северо-восточной части города, где расположен ряд автотранспортных предприятий и мусоросортировочная станция. Такая локализация

очагов загрязнения убедительно связывает уровень загрязнения почв с зонами интенсивной хозяйственной деятельности, подтверждая промышленное и транспортное происхождение основных загрязняющих веществ.

Анализ пространственного распределения преобладающих загрязнителей (рис. 4) позволил выделить зоны геохимических аномалий [13–16] – зоны поликомпонентного загрязнения почв. При построении изолиний для свинца и никеля использованы уровни 32 и 20 мг/кг соответственно, т.е. ОДК для супесчаных почв. Для мышьяка и цинка применены повышенные пороговые значения – 5 и 110 мг/кг. Данное методическое решение обусловлено повсеместным превышением установленных нормативов ОДК для супесчаных почв (2 мг/кг для мышьяка и 55 мг/кг для цинка). По результатам почвенной рекогносцировки и лабораторного контроля для всех отобранных образцов характерен супесчаный состав, что связано главным образом с интенсивным освоением городской территории и антропогенным нарушением почвенного покрова, в том числе строительномонтажными работами, прокладкой инженерных сетей и подсыпками грунта.

Выделенные зоны поликомпонентного загрязнения формируют две выраженные области аномалий на территории города. Первая расположена в районе пункта № 7, в юго-западной части вблизи портовой и промышленной инфраструктуры. Вторая аномалия выявлена в северо-восточной части города и включает пункты № 4 и 6. Совпадение пространственного положения этих аномалий с зонами повышенных значений комплексных индексов загрязнения (рис. 3) подтверждает достоверность выявленных закономерностей

и указывает на устойчивый характер техногенного воздействия в этих районах.

С помощью геоинформационного картографирования и комплексных индексов (NPI, Zc) впервые четко локализованы два основных очага загрязнения: юго-западный (портово-промышленный) и северо-восточный (связанный с автотранспортными предприятиями). Это уточняет и детализирует общие выводы о приуроченности загрязнения к зонам активной хозяйственной деятельности [2, 3].

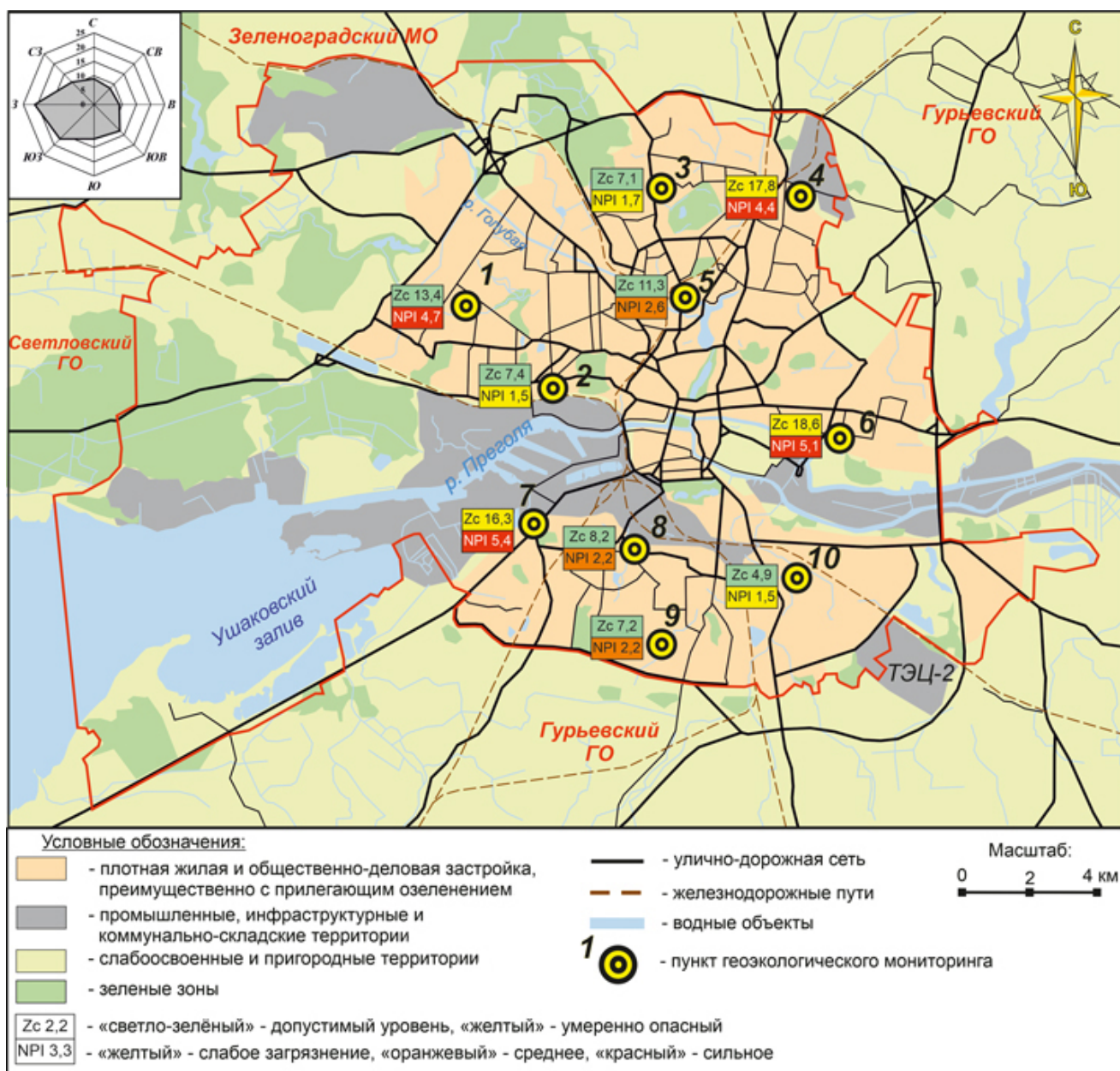


Рис. 3. Картограмма распределения индексов загрязнения почв в Калининграде.

Fig. 3. Distribution map of the soil pollution indices in Kaliningrad.

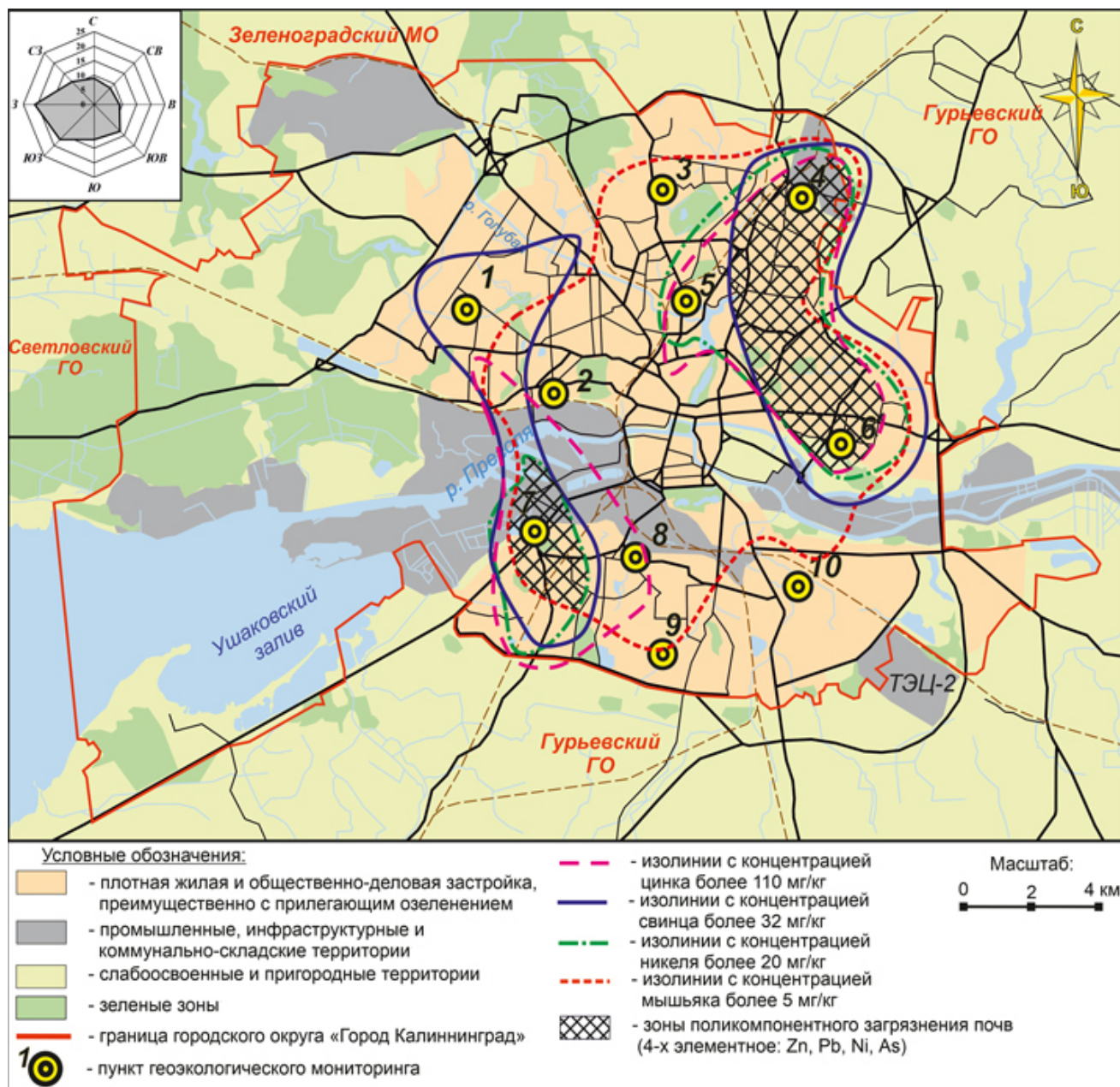


Рис. 4. Картограмма распространения поликомпонентного загрязнения почв в Калининграде.

Fig. 4. Spatial distribution map of the polycomponent soil pollution in Kaliningrad.

## Заключение

1. Комплексное применение статистических методов и системы индексов позволило дифференцировать характер загрязнения. Высокие коэффициенты вариации (>50 %) и положительная асимметрия распределения концентраций для Pb, As, Zn, Cu, Co статистически доказывают точечный характер загрязнения этими элементами, связанный с локальными источниками. В то же время для нефтепро-

дуктов установлен «повышенно-фоновый» уровень с высоким разбросом, но без резких выбросов, что указывает на рассредоточенные источники поступления.

2. Расчет индексов ( $I_{geo}$ ,  $PI$ ,  $EF$ ,  $Z_c$ ) относительно глобальных кларков приводит к занижению уровня загрязнения и некорректной классификации почв как «незагрязненных». Расчет индексов относительно локального фона, установленного для региона, выявил значительное загрязнение свинцом и цинком,

достигающее уровня «значительного» ( $PI > 2.0$ ) и «среднего» уровня накопления ( $EF = 2-5$ ). Установлено, что интегральная оценка загрязнения почв существенно варьирует в зависимости от применяемого комплексного индекса. Индекс  $PI$  свидетельствует о начавшейся химической деградации почв на 90 % исследованных площадок, тогда как индекс  $Zc$  в большинстве случаев характеризует состояние как «допустимое». Это подчеркивает важность комплексного подхода с использованием нескольких взаимодополняющих индексов для адекватной диагностики и ранжирования территории по уровню экологической опасности.

3. Выявлены и пространственно локализованы зоны поликомпонентного загрязнения почв. Установлено, что наиболее высокие уровни загрязнения формируют два выраженных очага, приуроченных к зонам интенсивной хозяйственной деятельности: юго-западный (в районе портовой и промышленной инфраструктуры) и северо-восточный. Совпадение аномалий по отдельным элементам ( $Pb$ ,  $Zn$ ,  $As$ ,  $Ni$ ) с зонами высоких значений комплексных индексов ( $NPI$ ,  $Zc$ ) подтверждает устойчивый характер техногенного воздействия в этих районах.

### Список литературы

1. Станченко Л.Ю. Распределение тяжелых металлов в почвах и растительности городских экосистем Калининградской области. *Вестник Российского государственного университета им. И. Канта*. 2009,1:81–86. EDN JXVHZL
2. Станченко Л.Ю. Эколого-геохимическая оценка и типизация урбоэкосистем Калининграда и Светлогорска. *Естественные и технические науки*. 2008, 6(38):221–224. EDN JXQQNH
3. Мосина Л.В., Чупахина Г.Н., Скрыпник Л.Н., Масленников П.И. Содержание тяжелых металлов в почвах ландшафтов различного функционального назначения г. Калининграда. *Известия ТСХА*. 2017,5:5–16.
4. Анциферова О.А., Мурачева Л.С. К характеристике почв городских парков Калининграда. *Вестник Российского государственного университета им. И. Канта*. 2009,7:83–90.
5. Müller G. Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River. *GeoJournal*. 1969,2:108–118.
6. Forstner U., Ahlf W., Calmano W., Kersten M., Schorer J. Assessment of metal mobility in sludges and sol-

id wastes. In: *Metal Speciation in the Environment*. Springer, 1990, p. 1–41. (ASIG; 23).

7. Жарикова Е.А. Тяжелые металлы в городских почвах: оценка содержания и экологического риска. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021,332(1):164–173. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/3009>
8. Tomlinson D.C., Wilson J.G., Harris C.R., Jeffrey D.W. Problems in the assessment of heavy metals in estuaries and the formation pollution index. *Helgoland Marine Research*. 1980,33:566–575.
9. Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination: A review. *Environmental Geochemistry and Health*. 2018,40:2395–2420.
10. Tong S., Li H., Wang L., Tudi M., Yang L. Concentration, spatial distribution, contamination degree and human health risk assessment of heavy metals in urban soils across China between 2003 and 2019 – A systematic review. *International Journal Environmental Research and Public Health*. 2020,17:3099. <https://doi.org/10.3390/ijerph17093099>
11. Алексеенко В.А., Алексеенко А.В. *Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв сельтебных ландшафтов*. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2013, 380 с.
12. Пиковский Ю.И. *Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде*. М.: Изд-во МГУ, 1993, 206 с.
13. Перельман А.И., Касимов Н.С. *Геохимия ландшафта*. М.: Астрель-2000, 1999, 768 с.
14. Янин Е.П. Химический состав и эколого-геохимические особенности городских почв: Аналитический обзор. *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов*. 2020,2:40–73. <https://doi.org/10.36535/0235-5019-2020-02-3>
15. Майорова Л.П., Кошельков А.М. Оценка загрязнения тяжелыми металлами и мышьяком почв урбанизированных территорий (на примере г. Хабаровска). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. 2025,70(2):216–240. doi:10.21638/spbu07.2025.201
16. Корляков И.Д., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е. Тяжелые металлы и металлоиды в почвенном покрове города Улан-Удэ. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2019,3(35):120–137. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=pinqdc>

### References

1. Stanchenko L.Yu. [Distribution of heavy metals in soils and vegetation of urban ecosystems in the Kaliningrad region]. *Vestnik Rossiiskogo gosudarstvennogo universiteta im. I. Kanta*. 2009,1:81–86. (In Russ.).

2. Stanchenko L.Yu. [Ecological and geochemical assessment and typification of urban ecosystems in Kaliningrad and Svetlogorsk]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natural and Technical Sciences*. 2008,6(38):221–224. (In Russ.).
3. Mosina L.V., Chupakhina G.N., Skrypnik L.N., Maslennikov P.I. [Heavy metal content in soils of landscapes with different functional purposes in Kaliningrad]. *Izvestiya Timiryazevskoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2017,5:5–16. (In Russ.).
4. Antsiferova O.A., Muracheva L.S. [On the characteristics of urban park soils in Kaliningrad]. *Vestnik Rossiiskogo gosudarstvennogo universiteta im. I. Kanta*, 2009,7:83–90. (In Russ.).
5. Müller G. Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River. *GeoJournal*. 1969,2:108–118.
6. Forstner U., Ahlf W., Calmano W., Kersten M., Schöner J. Assessment of metal mobility in sludges and solid wastes. In: *Metal Speciation in the Environment*. Springer, 1990, p. 1–41. (ASIG; 23). doi:10.1007/978-3-642-74206-4\_1
7. Zharikova E.A. Assessment of heavy metals content and environmental risk in urban soils. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021,332(1):164–173. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/3009>
8. Tomlinson D.C., Wilson J.G., Harris C.R., Jeffrey D.W. Problems in the assessment of heavy metals in estuaries and the formation pollution index. *Helgoland Marine Research*. 1980,33:566–575.
9. Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination: A review. *Environmental Geochemistry and Health*. 2018,40:2395–2420.
10. Tong S., Li H., Wang L., Tudi M., Yang L. Concentration, spatial distribution, contamination degree and human health risk assessment of heavy metals in urban soils across China between 2003 and 2019. A systematic review. *International Journal Environmental Research and Public Health*. 2020,17:3099. <https://doi.org/10.3390/ijerph17093099>
11. Alekseenko V.A., Alekseenko A.V. [Chemical elements in geochemical systems. Clarkes of soils in residential landscapes]. Rostov-on-Don: Publ. YuFU, 2013, 380 p. (In Russ.).
12. Pikovskii Yu.I. [Natural and technogenic hydrocarbon flows in the environment]. Moscow: Publ. MSU, 1993, 206 p. (In Russ.).
13. Perel'man A.I., Kasimov N.S. [Landscape geochemistry]. Moscow: Astreya-2000, 1999, 768 p. (In Russ.).
14. Yanin E.P. [Chemical composition and ecological-geochemical features of urban soils. An analytical review]. *Problemy okruzhayushchei sredy i prirodnikh resursov = Environmental and Natural Resource Problems*. 2020,2:40–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.36535/0235-5019-2020-02-3>
15. Mayorova L.P., Koshel'kov A.M. [Assessment of contamination by heavy metals and arsenic in soils of urbanized areas (case study of Khabarovsk)]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle = Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2025,70(2):216–240. (In Russ.). doi:10.21638/spbu07.2025.201
16. Korlyakov I.D., Kasimov N.S., Kosheleva N.E. [Heavy metals and metalloids in the soil cover of Ulan-Ude]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika = PNRPU Bulletin. Applied Ecology. Urban Development*. 2019,3(35):120–137. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=pinqdc>

## Об авторах

✉ Архипов Егор Александрович, аспирант Высшей школы живых систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия, egor.arhipov2000@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0007-8946-2648>

Зотов Сергей Игоревич, доктор географических наук, профессор Высшей школы живых систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия, zotov.prof@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-6509-7398>

Королева Юлия Владимировна, кандидат географических наук, доцент Высшей школы живых систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия, yu.koroleff@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7612-4454>

Колягина Мария Игоревна, студент Высшей школы живых систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия, mikoljagina@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0001-2922-4433>

## About the Authors

✉ Arkhipov, Egor A., Postgraduate Student of the Higher School of Living Systems, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, egor.arhipov2000@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0007-8946-2648>

Zotov, Sergey I., Doctor of Geography, Professor at the Higher School of Living Systems, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, zotov.prof@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-6509-7398>

Koroleva, Yulia V., Cand. Sci. (Geography), Associate Professor at the Higher School of Living Systems, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, yu.koroleff@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7612-4454>

Kolyagina, Maria I., Student of the Higher School of Living Systems, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, mikoljagina@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0001-2922-4433>

Поступила 20.01.2026

Принята к публикации 11.02.2026

Received 20 January 2026

Accepted 11 February 2026



## Биоклиматическое моделирование и вероятность распространения некоторых видов заразиховых (Orobanchaceae Vent.) в Саратовской области

И. В. Сергеева, Н. А. Петрова, Е. Н. Шевченко, Е. В. Гулина, А. Л. Пономарева

Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии  
им. Н.И. Вавилова, Саратов, Россия

**Резюме.** В последние годы в ряде регионов Российской Федерации увеличивается частота встречаемости и расселения в новые местообитания представителей семейства заразиховых (Orobanchaceae Vent.). В Саратовской области известно девять видов заразиховых, в том числе заразиха подсолнечниковая (*O. cumana*), вредящая посевам подсолнечника. Присутствие в области заразихи ветвистой (*O. ramosa*) и бледноцветковой (*O. reticulata* subsp. *pallidiflora*) требует подтверждения. В работе представлены результаты моделирования потенциальных биоклиматических ареалов с использованием алгоритма MaxEnt для четырех видов заразиховых (*Orobanche cumana* Wallr., *O. reticulata* subsp. *pallidiflora* (Wimm. & Grab.) Hayek., *O. ramosa* L., *O. caesia* Rchb.). Установлен диапазон некоторых климатических переменных в точках регистрации рассматриваемых видов в пределах распространения в Европе и Центральной Азии и их эколого-климатический оптимум, проведено сравнение их с климатическими параметрами Саратовской области. Биоклиматическое моделирование показало отсутствие в Саратовской области территорий, пригодных по климатическим параметрам для произрастания заразихи бледноцветковой и заразихи ветвистой. Однако описаны единичные случаи заноса этих видов в агроценозы. Выявлена высокая биоклиматическая пригодность территорий и, следовательно, вероятность дальнейшего расселения заразихи подсолнечниковой как в Саратовской области, так и в некоторых соседних регионах (Оренбургская область, Республика Башкортостан). Заразиха шерстистая (*O. caesia*) на территории Саратовской области также находится в зоне эколого-климатического оптимума.

**Ключевые слова:** климатические факторы, моделирование, распространение, потенциальный ареал, *Orobanche cumana* Wallr., *Orobanche reticulata* subsp. *pallidiflora* (Wimm. & Grab.) Hayek., *Orobanche ramosa* L., *Orobanche caesia* Rchb.

## Bioclimatic modeling and the probability of spread of some species of Orobanchaceae Vent. in the Saratov Region

Irina V. Sergeeva, Nadezhda A. Petrova, Ekaterina N. Shevchenko,

Ekaterina V. Gulina, Albina L. Ponomareva

Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after  
N.I. Vavilov, Saratov, Russia

**Abstract.** An increase in the occurrence and dispersal of broomrape species (Orobanchaceae Vent.) into new habitats has been observed in a number of regions of the Russian Federation in recent years. Nine broomrape species are known in the Saratov Region, including the sunflower broomrape (*O. cumana*), which damages sunflower crops. However, the presence of the branched broomrape (*O. ramosa*) and the pale-flowered broomrape (*O. reticulata* subsp. *pallidiflora*) in the region requires confirmation. This paper presents the results of modeling potential bioclimatic ranges using the MaxEnt algorithm for four broomrape species (*Orobanche cumana* Wallr., *O. reticulata* subsp. *pallidiflora*

(Wimm. & Grab.) Hayek., *O. ramosa* L., and *O. caesia* Rchb.). The range of some climatic variables at the registration points of the species under consideration within the distribution range in Europe and Central Asia and their ecological-climatic optimum were determined and compared with the climatic parameters of the Saratov Region. Bioclimatic modeling revealed the absence of areas in the Saratov Region with suitable climatic parameters for the growth of *O. reticulata* subsp. *pallidiflora* and *O. ramosa*. However, single cases of these species in agrocenoses have been previously described. High bioclimatic suitability of the areas was identified, and, consequently, the likelihood of further dispersal of *O. cumana* both in the Saratov Region and in some neighboring regions (Orenburg Region, Republic of Bashkortostan). *Orobanchae caesia* is also located in the ecological-climatic optimum zone in the Saratov Region.

**Keywords:** climatic factors, modeling, distribution, potential range, *Orobanchae cumana* Wallr., *Orobanchae reticulata* subsp. *pallidiflora* (Wimm. & Grab.) Hayek., *Orobanchae ramosa* L., *Orobanchae caesia* Rchb.

### Финансирование и благодарности

Работа выполнена по теме научного направления кафедры «Ботаника и экология» Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии им. Н.И. Вавилова «Растительность залежных земель Саратовской области: фиторазнообразие и закономерности восстановления».

Авторы выражают благодарность за сотрудничество куратору гербария SARAT, доценту кафедры ботаники и экологии СГУ им. Н.Г. Чернышевского к.б.н. Екатерине Александровне Нющенко.

### Funding and Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the scientific direction of the Department of Botany and Ecology at the Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov.

The authors would like to thank Ekaterina A. Nushchenko, the Curator of the SARAT Herbarium and Associate Professor at the Department of Botany and Ecology of the N.G. Chernyshevsky Saratov State University, for her cooperation.

**Для цитирования:** Сергеева И.В., Петрова Н.А., Шевченко Е.Н., Гулина Е.В., Пономарева А.Л. Биоклиматическое моделирование и вероятность распространения некоторых видов паразитических (Orobanchaceae Vent.) в Саратовской области. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 1, с. 101–116. <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.1.101-116>; <https://www.elibrary.ru/yvvdglv>

**For citation:** Sergeeva I.V., Petrova N.A., Shevchenko E.N., Gulina E.V., Ponomareva A.L. Bioclimatic modeling and the probability of spread of some species of Orobanchaceae Vent. in the Saratov Region. *Geosistemy peregodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 1, p. 101–116. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.1.101-116>; <https://www.elibrary.ru/yvvdglv>

## Введение

Представители семейства Orobanchaceae Vent. принадлежат к числу облигатных корневых паразитов и полностью лишены хлорофилла [1]. Некоторые из них наносят значительный экономический ущерб сельскому хозяйству, поражая важные культурные растения. Так, к числу злостных сорняков, значительно снижающих урожай в европейской части России, относятся паразитирующие: на подсолнечнике, полынях и других сложноцветных *Orobanchae cumana* Wallr.\* (включая разновидность *O. cumana* var. *helianthi* Tzvelev); на многих дикорастущих и культивируемых травянистых растениях (в т.ч. томатах

и подсолнечнике) *O. ramosa* L. (*Phelipanche ramosa* (L.) Pomel); на капусте, реже на горчице и рапсе *O. aegyptiaca* Pers. (*P. aegyptiaca* (Pers.) Pomel), *O. mutelii* F. Schultz (*P. mutelii* (F. Schultz) Pomel) и *O. brassicae* (Novopokr.) Novopokr. (*P. brassicae* (Novopokr.) Soják) [1]. Известны и попытки интродукции некоторых охраняемых и декоративных представителей семейства вместе с растением хозяином [1–3].

В последние годы Саратовская область является лидером по площади посевов подсолнечника\*\* и находится в пределах нативного ареала *O. cumana*. При этом в настоящее время *O. cumana* и *O. caesia* Rchb. (*P. lanuginosa* (C.A. Mey.) Holub) все чаще отмечаются нами на залежах, техногенных территориях, а также

\* Названия приведены по *Plants of the World Online. Royal Botanic Gardens, Kew*. <http://powo.science.kew.org/> [дата обращения: 24.01.2022], в случае расхождения в скобках даны названия по Н.Н. Цвелёву, 2015 [1].

\*\* *Посевная площадь подсолнечника в Саратовской области*. URL: [https://64.rosstat.gov.ru/info\\_graf/document/214379](https://64.rosstat.gov.ru/info_graf/document/214379) (дата обращения 18.11.2025).

в городской черте и естественных степных сообществах Саратовской области.

Последнее подробное исследование распространения паразитов в Саратовской области (в посевах подсолнечника и среди сорняков) было проведено сотрудниками НИИ сельского хозяйства Юго-Востока (ныне ФАНЦ Юго-Востока) в период 2006–2012 гг. [4]. Авторы отмечали увеличение доли пораженных паразитом площадей с 2008 по 2012 г., причем рост наблюдался даже при пятилетней ротации подсолнечника. По их мнению, в последующие годы следовало ожидать усиления распространения паразита и расширения ее расового состава в регионе. Основываясь на морфологических исследованиях материала, авторы данного исследования предполагают, что в Саратовской области на посевах подсолнечника распространена не только паразит подсолнечниковая (*O. cumana*), но и паразит бледноцветковая (*O. reticulata* subsp. *pallidiflora* (Wimm. & Grab.) Hayek, синоним *Orobancha pallidiflora* Wimm. et Grab.), которая ранее в Саратовской области не отмечалась. Присутствие паразита бледноцветковой в Саратовской области вызывает сомнение, так как данный вид предпочитает более влажные места обитания, известен севернее [5]. Гербарные образцы этого вида с территории Саратовской области неизвестны. Гербарный материал авторов [4] не представлен, присутствует только фото (не разборчивое).

В последних флористических сводках для Саратовской области указаны девять видов семейства паразитических [3, 6, 7]:

*O. alba* Steph. ex Willd. и *O. coerulescens* Steph. – внесены в Красную книгу Саратовской области [3, 6, 7];

*O. buekii* A. Dietr. (*O. alsatica* Kirschl.) – встречается изредка в Правобережье [6];

*O. bartlingii* Griseb. – вероятно, физиологическая раса предыдущего вида [1, 7];

*O. cumana* Wallar. (включая *O. cumana* var. *helianthi* Tzvelev) – паразит на полях [6, 7];

*O. elatior* Sutt. – изредка в Правобережье [15, 16];

*O. caesia* Rchb. (*P. lanuginosa* (C.A. Mey.) Holub) – обыкновенно, по всей области [6, 7];

*O. arenaria* Borkh. (*P. laevis* (L.) Holub.) – не редко, на сложноцветных [6, 7];

*O. purpurea* Jacq. (*P. purpurea* (Jacq.) Soják.) – в Саратовской области сходна с предыдущим видом [6, 7].

*O. ramosa* указана как, вероятно, исчезнувший вид, последние сборы которого были сделаны ранее 1920 г. [6]. Однако в гербарии SARAT имеются два сбора этого вида более позднего времени: 1) 19.08.2004. Саратовская область, Краснокутский район 15 км севернее с. Дьяковка, на плантации бахчевых культур. Паразитирует на корнях тыквы. Leg., det. Е.А. Киреев, sic. Е.А. Архипова, sic. М.А. Ткаченко; 2) 10.09.2008. г. Саратов. Огород. Найдена на одном огороде, где несколько лет подряд выращивали томаты. Паразитирует на *Solanum lycopersicum* L. Leg. – не указано, det. – Е.А. Архипова, sic. М.А. Ткаченко.

Имеются также данные об увеличении встречаемости паразитов и в других регионах. Так, в соседней Оренбургской области описана новая ассоциация сеgetальной растительности: *Amarantho blitoides* – *Lactucetum tataricae* Khasanova et. al. 2019 с участием *O. cumana* [8]. Отмечено, что паразит встречается в сообществах с высоким постоянством, но низким обилием (до 1 %), что нехарактерно для других ассоциаций. *O. cumana* отмечается также в Республике Башкортостан, где ранее в составе сеgetальной растительности этот вид не фиксировался [8, 9]. Вредящая посевам *O. ramosa* отмечается в Крыму [10, 11], в Предкавказье [12], Ростовской области [13], на территории Донецкого ботанического сада [14] и в Казахстане [15].

Несмотря на длительную историю изучения флоры европейской части России и Саратовской области в частности, детальные сведения по распространению и экологии отдельных экономически важных групп растений требуют постоянного обновления. Актуальность таких работ обусловлена внедрением новых гибридов подсолнечника и совершенствованием агротехники, а также изменениями климата, влияющими на распространение видов.

Известно, что каждый вид адаптирован к определенному диапазону климатических

условий. Понимание ареала как географической проекции экологической ниши или функции, зависимой от факторов среды, определило направление развития экологического моделирования ареалов [16]. При этом моделирование на основе анализа пространственного распределения абиотических факторов среды позволяет построить модель, которая соответствует только потенциальному ареалу, поэтому результирующие значения нельзя трактовать как вероятность присутствия, а только как *пригодность местообитаний*. И чем более полно будут учтены факторы, реально влияющие на распространение вида, тем точнее будет предсказана пригодность местообитаний [17]. Моделирование на основе биоклиматических показателей в настоящее время все чаще используется как для редких, так и для инвазивных видов растений [18, 19], в том числе для прогнозирования трансформации экологической ниши при различных сценариях изменения климата. Это направление позволяет определить экологические оптимумы и расширить представления о биологии и экологии растений.

Цель работы – на основе биоклиматического моделирования определить климатическую пригодность территорий Саратовской области для произрастания четырех потенциально опасных видов заразных (*O. cumana*, *O. reticulata* subsp. *pallidiflora*, *O. ramosa*, *O. caesia*), паразитирующих на сложноцветных; установить эколого-климатические оптимумы существования данных видов; выявить климатические факторы, ограничивающие их дальнейшее расселение. Для оценки пригодности местообитаний Саратовской области к произрастанию этих видов был использован метод моделирования современного потенциального климатического ареала на основе алгоритма «максимальной энтропии», реализованный в пакете MaxEnt [20, 21]. MaxEnt – это алгоритм машинного обучения, который предсказывает присутствие вида в географическом пространстве, основываясь только на точках регистрации видов, без учета мест документированного отсутствия.

## Материалы и методы

Описание принципов работы MaxEnt приведено в ряде работ авторов алгоритма [20, 21]. Сведения о точках регистрации видов в пределах ареала заразных (в Европе и Центральной Азии) получены нами из открытых баз данных ([5]; GBIF\*; литературных источников [8–12]; региональных гербариев (SARBG, SARAT, гербария кафедры «Ботаника и экология») и собственных наших данных, содержащих координаты находок. В полученных данных не учитывались точки регистрации без подтверждения (фото или гербарным листом), а также точки, попадающие в одну и ту же ячейку растрового набора данных.

Применение метода максимальной энтропии требует соблюдения ряда принципов [16, 17]. Так, проблема пространственной неравномерности точек регистрации была решена удалением одинаковых координат после округления их до сотых долей градуса (в таблице Excel), что позволило уменьшить скопление данных по европейской части ареала. В итоге для *O. cumana* использовано 272 точки регистрации, для *O. reticulata* subsp. *pallidiflora* – 101, *O. ramosa* – 442, *O. caesia* – 397. Согласно методике, 25 % записей служили в качестве тестовой выборки для проверки адекватности модели, 10 % приняты за нетипичные, т.е. зарегистрированные в малоприспособных биотопах [20, 21].

В качестве предикторов использовали широко применяемые биоклиматические переменные, усредненные за 1981–2010 гг., полученные в виде растровых наборов данных из открытой базы WorldClim 2 [22]. С помощью модулей «Exrtactor» и «Зональная статистика» QGIS для точек регистрации видов и для территории Саратовской области отдельно из растровых данных извлечены значения всех биоклиматических переменных. Для полученных данных вычислены значения сводной статистики (среднее, диапазон, верхний и нижний квартили) и проведена оценка взаимной корреляции климатических переменных.

\* Global biodiversity Information Facility; <https://www.gbif.org/>

На подготовительном этапе построены разные варианты моделей, проведена оценка вклада и взаимосвязи переменных и точности моделей. С учетом взаимного влияния переменных и биологических особенностей видов [17], в итоговую модель вошли 12 из 19 имеющихся биоклиматических параметров: среднегодовая температура (bio 1), максимальная температура наиболее теплого месяца (bio 5), минимальная температура наиболее холодного месяца (bio 6), средняя температура наиболее влажного квартала (bio 8), средняя температура наиболее сухого квартала (bio 9), средняя температура наиболее теплого квартала (bio 10), средняя температура наиболее холодного квартала (bio 11), годовые осадки (bio 12), количество осадков в наиболее влажный месяц (bio 13), количество осадков в наиболее сухой месяц (bio 14), количество осадков в наиболее теплый квартал (bio 18), количество осадков в наиболее холодный квартал (bio 19). В дальнейший анализ не включены расчетные и повторяющиеся параметры (bio 2, bio 3, bio 4, bio 7, bio 15, bio 16, bio 17). Для получения модели использовали логистический формат, расчет проводили при 1000 итераций по каждой ячейке анализируемой области. Точность полученной модели подтверждается с помощью показателя AUC (Area Under the Curve, площадь под ROC-кривой) – предсказательной способности модели в каждой точке раstra [20, 21].

## Результаты и обсуждение

Анализ гербарных сборов представителей семейства заразных выявил, что данные об их распространении на территории Саратовской области фрагментарны. Несмотря на то что некоторые из них обычны по всему региону, сборы не отражают современного распространения и не всегда имеют точные координаты. Наши данные последних лет дополняют сведения о встречаемости заразных в Саратовской области:

*O. cumana* – Саратовская область, Федоровский район, залежь (2024 г. – на многолет-

них залежах единично, 2025 – после распашки залежи массово); Саратовская область, Энгельсский район, УНПО «Поволжье», в посевах пшеницы, на латуке (2021 г., единично);

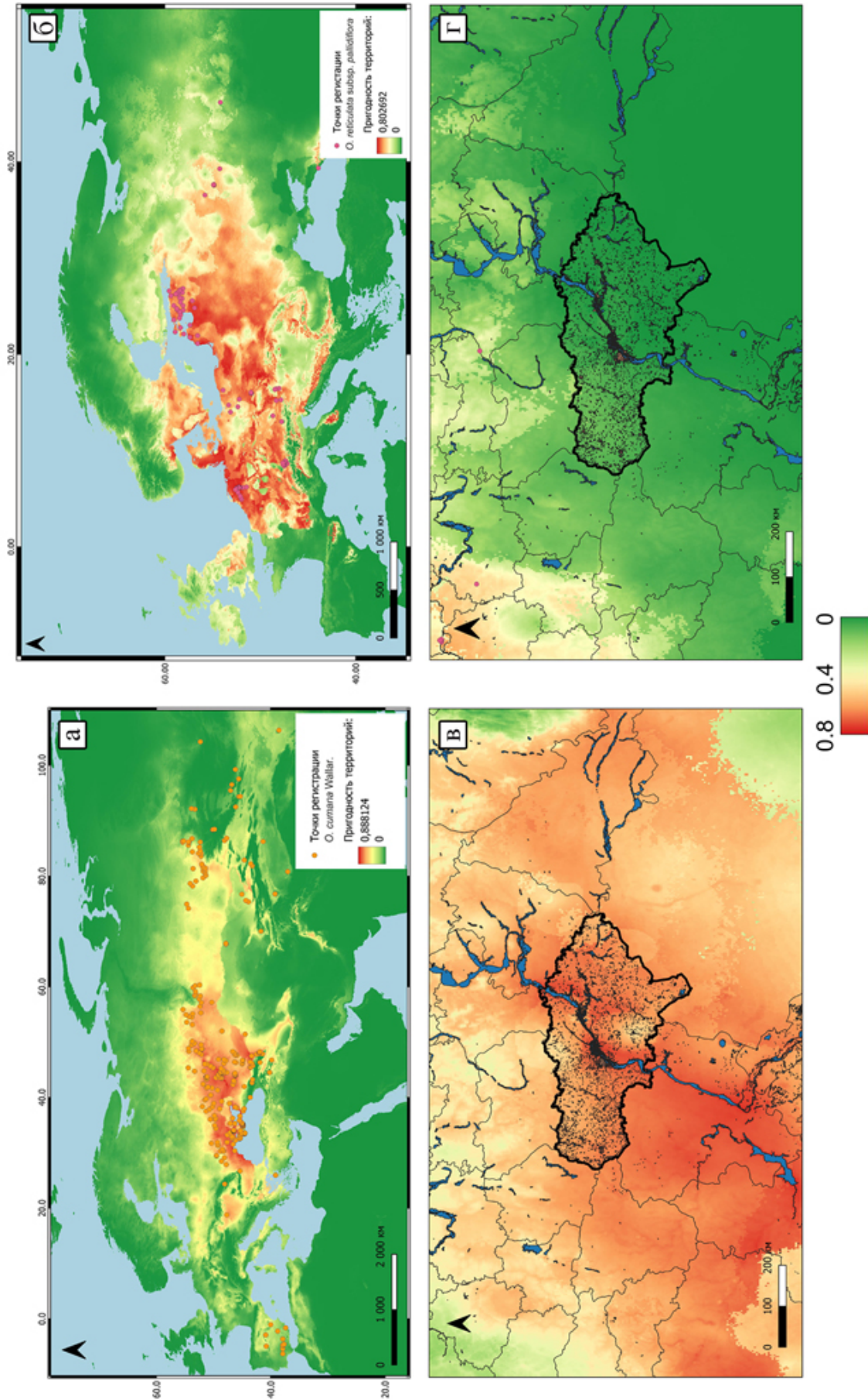
*O. cumana* var. *helianthi* – г. Саратов; Саратовская область, Ртищевский район, на латуке (2023 г., массово);

*O. coerulescens* Steph. – 12.07.2016 г., г. Саратов, Заводской район, УНПК «Агроцентр» ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ, плодовый сад. Паразитирует на представителях семейства Asteraceae (гербарий SARAT, leg. Е.В. Гулина, det. Е.А. Архипова, sic. М.А. Ткаченко).

*O. caesia* – г. Саратов, Заводской район, Пролетарский поселок, окрестности УНПК «Агроцентр», на степном склоне, среди сложноцветных (2016 г., единично); южная окраина г. Саратов, территория НПЗ (2024 г., единично).

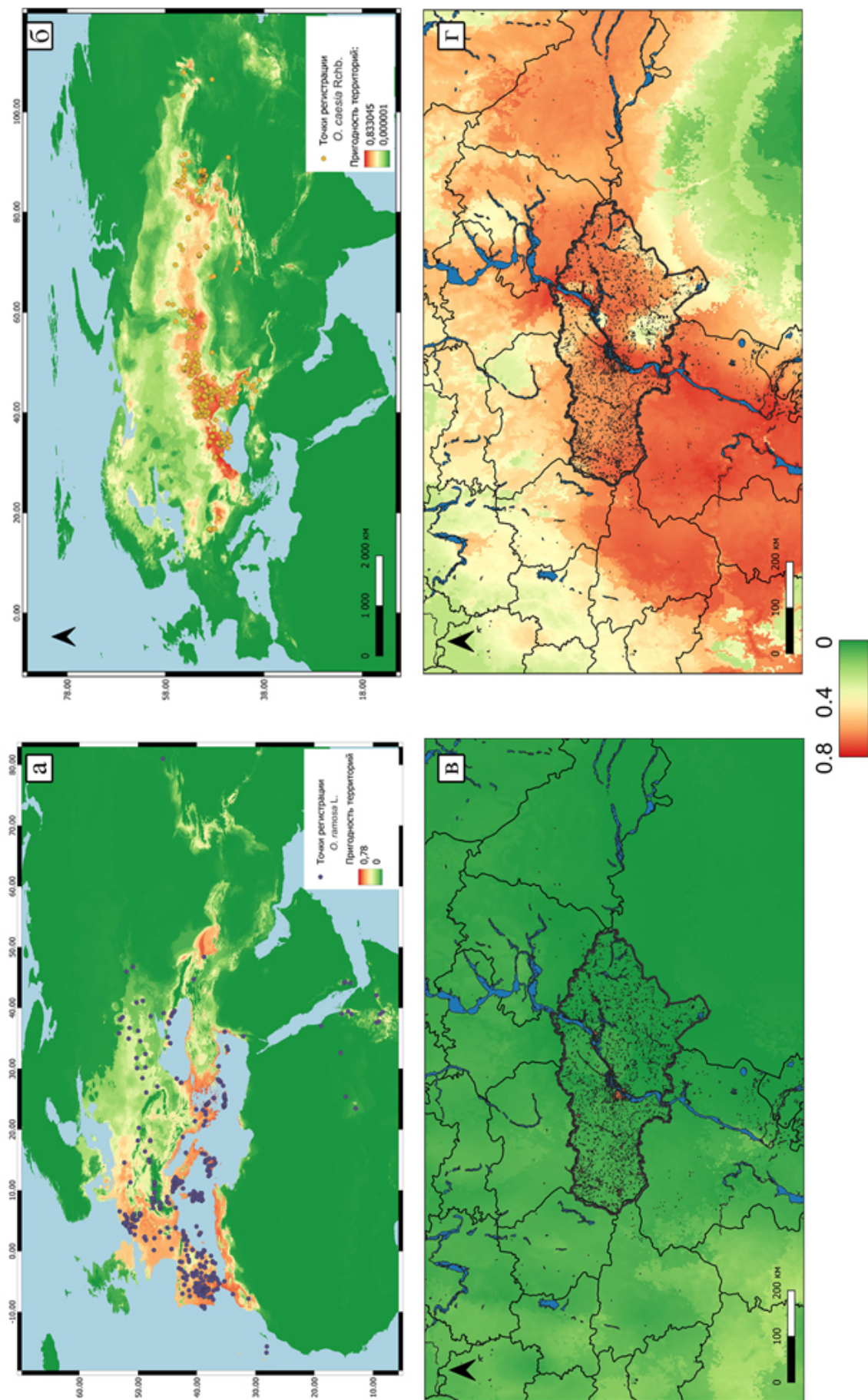
По результатам моделирования на основе климатических переменных получены прогнозные карты распространения исследуемых видов в Европе и Центральной Азии, т.е. в пределах всего ареала (ареал *O. ramosa* включает и часть Африканского континента). Затем территория Саратовской области была увеличена и рассмотрена подробнее. На картах с помощью градаций цвета обозначена климатическая пригодность территорий для произрастания видов (в диапазоне от «0 – не пригодны» до «1 – полностью пригодны») (рисунки 1, 2). При построении карт были получены следующие показатели точности моделей AUC: *O. cumana* – 0.979 для тренировочных и 0.977 для тестовых данных; *O. reticulata* subsp. *pallidiflora* – 0.990 и 0.987; *O. ramosa* – 0.977 и 0.975; *O. caesia* – 0.973 и 0.967 соответственно, что указывает на удовлетворительную предсказательную способность полученных моделей.

Результирующая модель визуализирует поле, описывающее пространственное распределение пригодности местообитаний изучаемых видов. Для *O. cumana* потенциально пригодные территории охватывают Средиземноморье, юго-восточную Европу, Кавказ, в меньшей степени юг Сибири (рис. 1 а). Саратовская область полностью входит в зону климатического оптимума данного вида (рис. 1 в).



**Рис. 1.** Точки регистрации и потенциальный биоклиматический ареал *O. sitana* (а) и *O. reticulata* subsp. *pallidiflora* (б); климатическая пригодность территорий Саратовской области для *O. sitana* (в) и *O. reticulata* subsp. *pallidiflora* (г). С помощью градации цвета обозначена климатическая пригодность территорий для видов: зеленый – территории не пригодны (вероятность 0), желтый, оранжевый – пригодны (вероятность  $\geq 0.4$ ) красный – территории полностью пригодны (вероятность  $\geq 0.8$ ).

**Fig. 1.** Registration points and potential bioclimatic range of *O. sitana* (a) and *O. reticulata* subsp. *pallidiflora* (б); climatic suitability of the territories of the Saratov Region for *O. sitana* (в) and *O. reticulata* subsp. *pallidiflora* (г). The climatic suitability of territories for species is indicated by color gradients: green marks unsuitable territories (probability 0); yellow and orange mark suitable territories (probability  $\geq 0.4$ ); red marks fully suitable territories (probability  $\geq 0.8$ ).



**Рис. 2.** Точки регистрации и потенциальный биоклиматический ареал *O. ramosa* (а) и *O. caesia* (б); климатическая пригодность территорий Саратовской области для *O. ramosa* (в) и *O. caesia* (г). С помощью градации цвета обозначена климатическая пригодность территорий для видов: зеленый – территории не пригодны (вероятность 0), желтый, оранжевый – пригодны (вероятность  $\geq 0.4$ ), красный – территории полностью пригодны (вероятность  $\geq 0.8$ ).

**Fig. 2.** Registration points and potential bioclimatic range of *O. ramosa* (a) and *O. caesia* (б); climatic suitability of the territories of the Saratov Region for *O. ramosa* (в) and *O. caesia* (г). The climatic suitability of territories for species is indicated by color gradients: green marks unsuitable territories (probability 0); yellow and orange mark suitable territories (probability  $\geq 0.4$ ); red marks fully suitable territories (probability  $\geq 0.8$ ).

Существование популяций в зоне экологического оптимума вида будет наиболее стабильным, а их продуктивность высокой (красные и оранжевые оттенки на карте); в пессимальных зонах динамика будет выражена сильнее, популяции менее устойчивы (пригодность территорий < 0.40, желтый цвет на карте).

Полученная карта современного потенциального ареала (рис. 1 а) коррелирует с известными зонами вредоносности *O. cuman* [23]: степные районы Украины, Крым, Краснодарский и Ставропольский края, Ростовская область, Нижнее Поволжье, а также юг Западной Сибири (Алтайский край). Модель также предсказывает вероятность натурализации вида в Воронежской, Пензенской, Липецкой, Тамбовской областях. Выявлена высокая биоклиматическая пригодность территорий в Оренбургской области и Республике Башкортостан.

Потенциальный биоклиматический ареал *O. reticulata* subsp. *pallidiflora* находится в центральной и северо-западной Европе, существенно западнее и севернее границ Саратовской области (рис. 1 б, г). Восточная граница потенциального ареала данного вида проходит по Рязанской, Липецкой, Курской, Белгородской областям, южная – на уровне Республики Мордовия. Таким образом, потенциально пригодных территорий для распространения *O. reticulata* subsp. *pallidiflora* в нашем регионе не выявлено. Вероятно, Е.Ю. Сибикеева с соавт. [4] имели дело с одной из экологических форм *O. cuman*, проявляющих высокую морфологическую изменчивость [24]. Не исключаем и единичные случаи заноса этого вида в агроценозы, которые, однако, не приводят к его дальнейшему расселению.

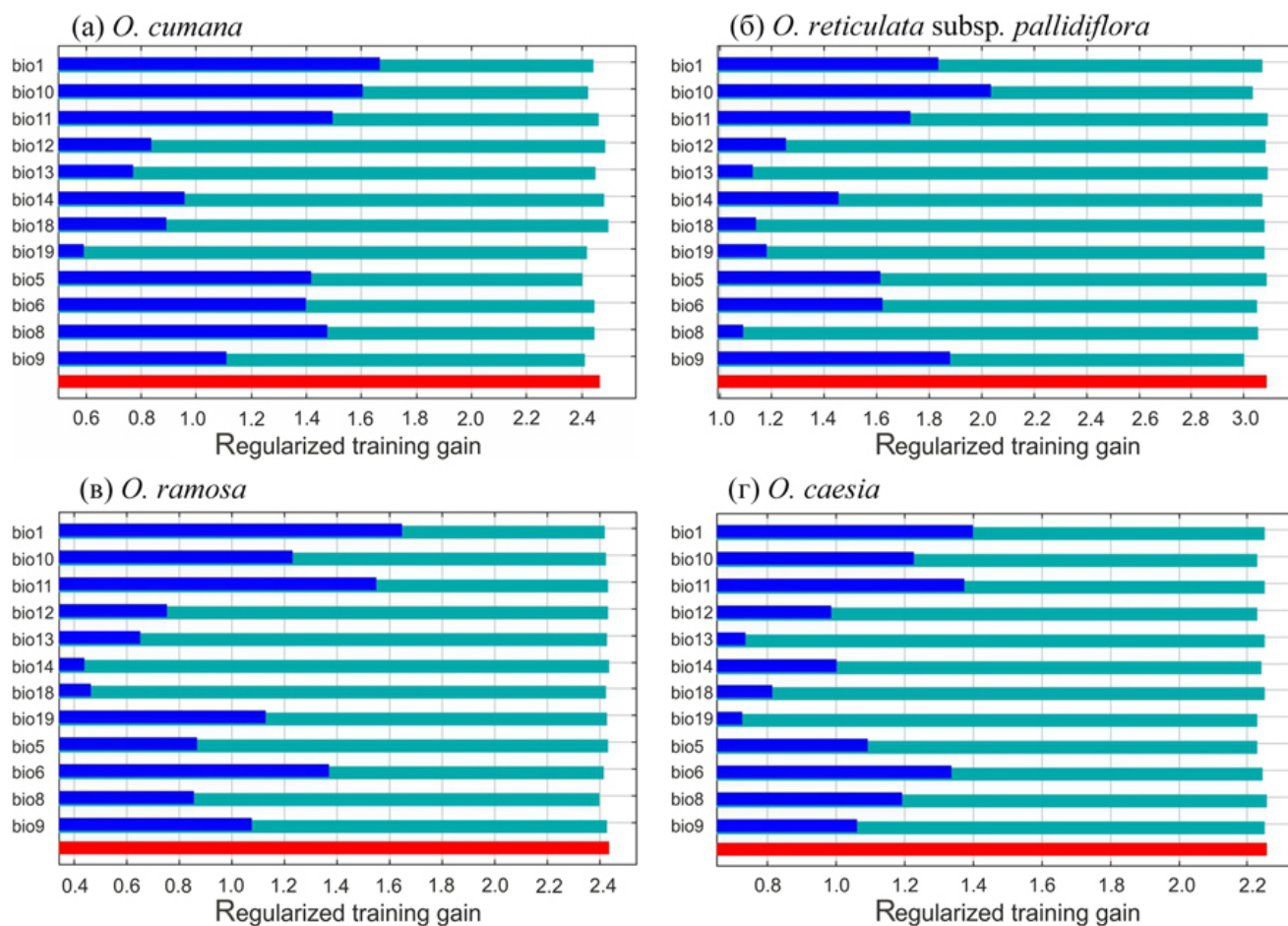
Современный ареал *O. ramosa* в настоящее время тоже, скорее всего, находится существенно западнее Саратовской области (рис. 2 а, в). Однако заметно, что 10 % точек регистрации, принятых за находки в нетипичных местах обитания при построении модели, находятся на значительном удалении от климатического оптимума (от оранжевой и красной зон на карте), в отличие от трех других рассматриваемых видов. Это может говорить о широкой экологической амплитуде и экологической пластичности вида. *O. ramosa* – это активно рассе-

ляющийся инвазивный и высоко контагиозный вредящий посевам вид. Вероятно, в настоящее время происходит его расселение и адаптация к новым местам обитания.

Потенциальный биоклиматический ареал *O. caesia* большей частью совпадает со степным поясом Евразии. Саратовская область также полностью находится в зоне климатического оптимума для *O. caesia* (рис. 2 б, г). В регионе вид встречается в городской черте и на техногенных нарушенных территориях, в основном на полях. Сведений о распространении в агроценозах нет.

Алгоритм MaxEnt позволяет проанализировать относительный вклад переменных окружающей среды в построение итоговой модели [20, 21] с использованием jackknife-теста (метод «складного ножа»). На рис. 3 показаны результаты оценки важности переменных этим методом на тренировочных данных.

Для *O. cuman* климатическая переменная, которая при использовании изолированно от других переменных дает наибольший прирост, – bio 1 (рис. 3 а, синий цвет). Другими словами, она сама по себе содержит наиболее полезную информацию для модели. Переменная среды, которая в наибольшей степени уменьшает прирост при ее опущении, – bio 5 (рис. 3 а, голубой цвет). По-видимому, она содержит больше всего уникальной информации. Для *O. reticulata* subsp. *pallidiflora* наиболее ценную информацию несет переменная среды с максимальным эффектом при изолированном использовании – bio 10 (рис. 3 б). Переменная bio 9, напротив, сильнее прочих снижает прирост при исключении – значит, содержит уникальные данные, отсутствующие в других переменных. Для *O. ramosa* наибольшим эффектом при отдельном использовании обладает переменная bio 1 (рис. 3 в), что указывает на ее самостоятельную информативность. Исключение переменной bio 8 приводит к наибольшему падению прироста; следовательно, она содержит наиболее уникальную информацию. Для *O. caesia* переменная bio 1 (рис. 3 г) дает максимальный прирост при изолированном применении, а переменная bio 5 – наибольшие потери при исключении.



**Рис. 3.** Результаты теста jackknife, показывающие важность переменных. По горизонтальной оси – регуляризованный прирост (по тренировочным данным), по вертикальной оси – биоклиматические переменные. Голубой цвет – модель без переменной, синий – модель с единственной переменной, красный – модель со всеми переменными.

**Fig. 3.** The results of the jackknife test of variable importance. The horizontal axis shows regularized growth (based on training data), and the vertical axis shows bioclimatic variables. Light blue marks a model without a variable, dark blue marks a model with a single variable, and red marks a model with all variables.

Исходя из этого можно предположить, что на распространение *O. cumana* существенно влияют среднегодовая температура (bio 1) и температура наиболее теплого квартала (bio 5). Для *O. reticulata* subsp. *pallidiflora* это средняя температура наиболее теплого квартала (bio 10) и средняя температура наиболее сухого квартала (bio 9) (в резко континентальном климате они не совпадают). Для *O. ramosa* – среднегодовая температура (bio 1) и средняя температура наиболее влажного квартала (bio 8). Для *O. caesia* – среднегодовая температура (bio 1) и максимальная температура самого теплого месяца (bio 5).

Таким образом, для данных видов показатели температуры более значимы, чем количество осадков, что согласуется с мнением

других авторов [23]: критерием правильности определения основных лимитирующих факторов служит соответствие границы ареала изолиниям лимитирующего фактора. Чаще всего таким фактором являются температуры. При этом распространение сходных жизненных форм растений в пределах одного региона определяется чаще всего одинаковым набором факторов. Однако виды отличаются экологическими амплитудами в пределах одного и того же набора лимитирующих факторов, что и приводит к различиям в конфигурации их ареалов. Диапазон и оптимальные значения переменных окружающей среды для 4 видов семейства заразных наглядно представлены на графике (рис. 4). В нашем случае наибольший размах экологической амплитуды по

некоторым климатическим факторам имеет *O. ramosa* (рис. 4, фиолетовый цвет). *O. cumana* и *O. ramosa* отмечены на территориях с нулевым количеством осадков в наиболее сухой месяц (bio 14), т.е. переносят засуху. В целом, *O. ramosa* обитает в более широком диапазоне по значениям количества осадков, чем другие виды, имеет по сравнению с ними более широкую экологическую амплитуду. Температурный оптимум данного вида по сравнению с другими несколько выше. *O. reticulata* subsp. *pallidiflora* отличается узкой экологической амплитудой и существует в более холодном климате, чем три другие вида.

При сопоставлении данных о распространении видов заразики выявлено, что средняя температура наиболее теплого квартала (bio 10) в точках регистрации *O. reticulata* subsp. *pallidiflora* существенно ниже таковой в пределах Саратовской области (см. таблицу). Среднегодовая температура (bio 1) в точках регистрации *O. ramosa* выше таковой в Саратовской области, хотя диапазоны частично перекрываются. Значения климатических переменных для *O. cumana* и *O. caesia* сопоставимы с данными по Саратовской области. Таким образом, зафиксированные в таблице данные показывают, по каким именно переменным территория региона не соответствует климатической нише вида в настоящее время, и могут служить отправной точкой для дальнейших наблюдений.

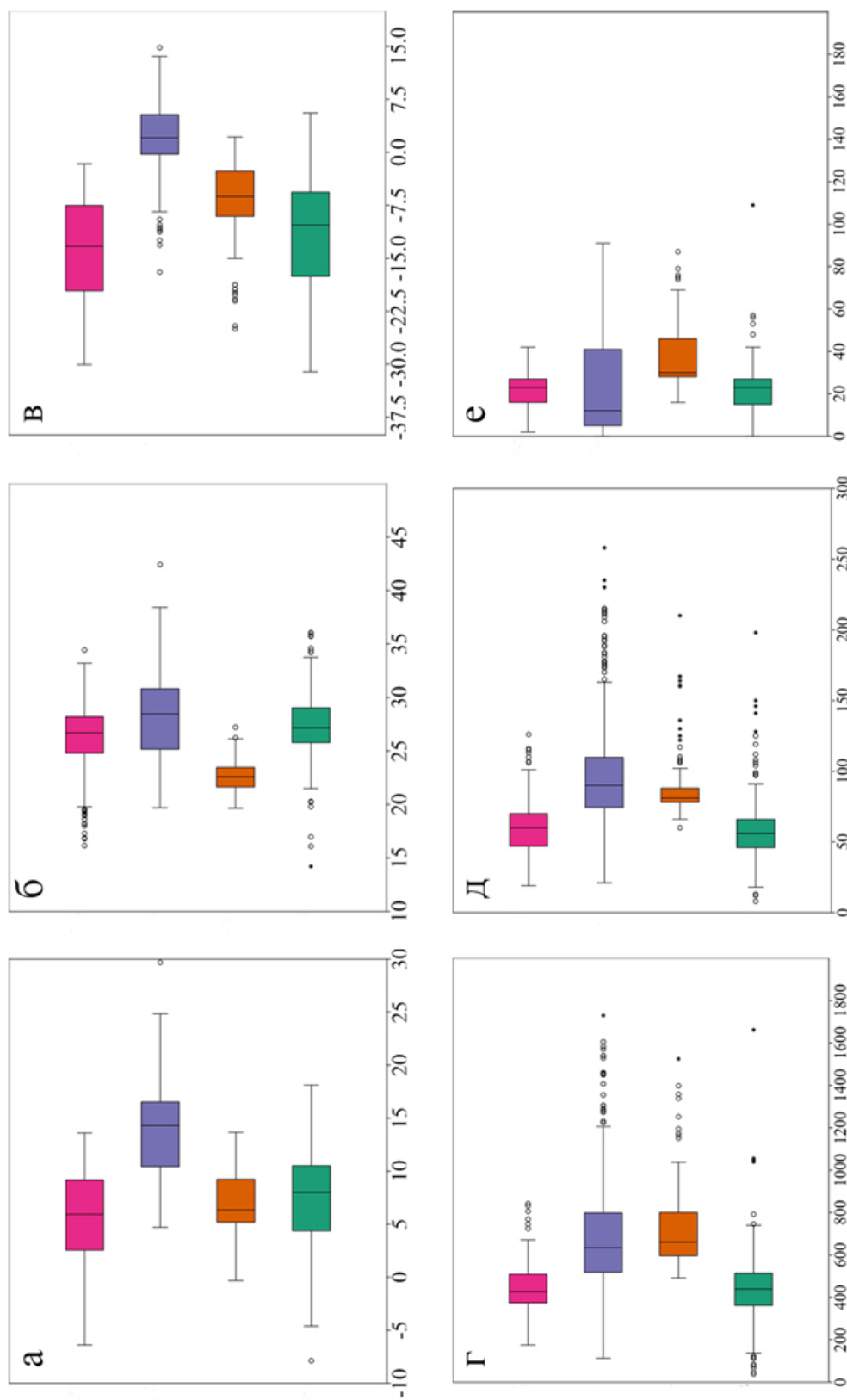
В современных экологических концепциях подчеркивается необходимость комплексного анализа совокупности факторов – видовых особенностей, параметров окружающей среды и социально-экономических условий – для объяснения процессов натурализации растений и формирования инвазионных очагов [25]. Динамика инвазионного процесса предполагает последовательное прохождение видами ряда стадий.

В контексте рассматриваемого вопроса можно предположить, что *O. ramosa* в настоящее время находится на стадии климатической предварительной адаптации. Периодические случаи заноса данного вида создают предпосылки для потенциального закрепления, однако пока не приводят к формированию

устойчивых популяций в Саратовской области. Отчасти это происходит из-за малой частоты и масштабов повторных заносов (низкого пропагульного давления). Проросшие из занесенных семян растения вегетируют в течение одного-двух сезонов, после чего выпадают, вероятно, из-за воздействия низких температур. Со временем возможно формирование более устойчивых экотипов в результате адаптационных процессов и увеличения частоты повторных заносов. Однако последние исследования указывают на то, что инвазивные растения, как правило, предпочитают климатические условия, близкие к тем, с которыми они сталкиваются в их родной среде, а климатическое расширение экологической ниши не столь значительно [25]. Но, учитывая, что диапазоны большинства климатических переменных для *O. ramosa* перекрывают таковые для территории Саратовской области (таблица), это может создать предпосылки для перехода вида на следующую стадию инвазионного процесса – устойчивое закрепление в новых местообитаниях.

Аборигенный для Саратовской области вид *O. cumana* имеет многие признаки, характерные для успешных инвазивных растений: наличие экологических рас, высокая семенная продуктивность, вспышки численности на нарушенных территориях, быстрая адаптивная реакция на изменения среды [24]. Перечисленные особенности обуславливают потенциал к активному расселению вида.

Кроме факторов окружающей среды, росту численности и расширению ареала *O. cumana* способствует активная распашка залежных земель, наблюдаемая в последнее время. Залежи, находящиеся в постагрогенной сукцессии в течение 5–15 лет, играют неоднозначную роль в динамике популяций растения паразита. С одной стороны, они служат резерватом для сохранения и накопления его семян в почве. С другой – на залежах формируются устойчивые фитоценозы с доминированием злаков, которые являются неблагоприятными или нейтральными хозяевами для *O. cumana*, что приводит к постепенной естественной деградации банка семян паразита.



**Рис. 4.** Диаграмма размаха климатических переменных для 4 видов заразных.

Верхняя панель. По горизонтальной оси – температура, °С: (а) максимальная температура самого теплого месяца (bio 1), (б) средняя годовая (bio 5), (в) минимальная температура самого холодного месяца (bio 6). Нижняя панель. По горизонтальной оси – сумма осадков, мм: (г) годовая сумма осадков (bio 12), (д) количество осадков в наиболее влажный месяц (bio 13), (е) количество осадков в наиболее сухой месяц (bio 14).

Цветом обозначены виды: розовый – *O. caesia*, фиолетовый – *O. ramosa*, оранжевый – *O. reticulata* subsp. *pallidiflora*, зеленый – *O. sitana*. В пределах цветного прямоугольника находится 50 % значений (межквартильный размах); вертикальной чертой в прямоугольнике показана медиана, горизонтальной линией – 95 % значений, точками обозначены существенно отклоняющиеся от основной выборки значения – выбросы.

**Fig. 4.** Boxplot of climate variables for four broomrape species.

Top panel. Horizontal axis denotes temperature, °C: (a) maximum temperature of the warmest month (bio 1), (б) mean annual temperature of the coldest month (bio 5), (в) minimum temperature of the coldest month (bio 6). Bottom panel. Horizontal axis denotes precipitation in mm: (г) annual precipitation (bio 12), (д) precipitation in the wettest month (bio 13), (е) precipitation in the driest month (bio 14).

Species are colored: pink, *O. caesia*; purple, *O. ramosa*; orange, *O. reticulata* subsp. *pallidiflora*; green, *O. sitana*. 50 % of the values (interquartile range) are within the colored rectangle; the vertical line in the rectangle shows the median, the horizontal line shows 95 % of the values, and the dots indicate values that deviate significantly from the main sample, outliers.

**Таблица.** Значения климатических переменных в местах точек регистрации четырех видов заразных по всему ареалу и на территории Саратовской области  
**Table.** Climate variable values at recording sites for four broomrape species throughout the range and the territory of the Saratov Region

Показатель	<i>O. cymata</i> (272 т.р.)	<i>O. reticulata</i> subsp. <i>pallidiflora</i> (101 т.р.)	<i>O. ramosa</i> (442 т.р.)	<i>O. caesia</i> (397 т.р.)	Территория Саратовской области
Среднегодовая температура, °С (bio 1)	$\frac{-7.9}{4.4} - \frac{7.5}{10.5} - \frac{18.1}{18.1}$	$\frac{-0.3}{5.2} - \frac{6.6}{9.2} - \frac{13.7}{13.7}$	$\frac{4.7}{10.4} - \frac{13.7}{16.5} - \frac{29.7}{29.7}$	$\frac{-6.4}{2.5} - \frac{5.3}{9.2} - \frac{13.6}{13.6}$	$\frac{4.7}{5.3} - \frac{5.8}{6.5} - \frac{7.1}{7.1}$
Максимальная температура самого теплого месяца, °С (bio 5)	$\frac{14.2}{25.8} - \frac{27.5}{29.0} - \frac{36.0}{36.0}$	$\frac{19.7}{21.6} - \frac{22.7}{23.5} - \frac{27.2}{27.2}$	$\frac{19.7}{25.2} - \frac{28.2}{30.8} - \frac{42.4}{42.4}$	$\frac{16.2}{24.8} - \frac{26.2}{28.2} - \frac{34.4}{34.4}$	$\frac{25.2}{26.4} - \frac{28.1}{30.6} - \frac{32.5}{32.5}$
Минимальная температура самого холодного месяца, °С (bio 6)	$\frac{-31.1}{-17.5} - \frac{-10.8}{-5.6} - \frac{5.6}{5.6}$	$\frac{-25.0}{-9.0} - \frac{-7.1}{-2.7} - \frac{2.2}{2.2}$	$\frac{-17.0}{-0.3} - \frac{2.2}{5.3} - \frac{14.8}{14.8}$	$\frac{-30.1}{-19.6} - \frac{-13.8}{-7.5} - \frac{-1.6}{-1.6}$	$\frac{-18.1}{-17.3} - \frac{-15.1}{-14.1} - \frac{-12.2}{-12.2}$
Средняя температура наиболее влажного квартала, °С (bio 8)	$\frac{-9.7}{16.3} - \frac{16.5}{20.0} - \frac{25.1}{25.1}$	$\frac{4.0}{11.2} - \frac{13.5}{16.9} - \frac{18.2}{18.2}$	$\frac{-0.9}{8.9} - \frac{11.8}{15.2} - \frac{31.8}{31.8}$	$\frac{-10.0}{16.45} - \frac{17.3}{19.64} - \frac{22.5}{22.5}$	$\frac{-6.4}{0.6} - \frac{17.2}{15.8} - \frac{22.8}{22.8}$
Средняя температура наиболее сухого квартала, °С (bio 9)	$\frac{-20.8}{-6.0} - \frac{-0.5}{2.2} - \frac{26.2}{26.2}$	$\frac{-14.2}{-1.3} - \frac{-0.4}{2.3} - \frac{16.7}{16.7}$	$\frac{-9.2}{6.6} - \frac{17.0}{23.8} - \frac{27.1}{27.1}$	$\frac{-21.2}{-11.8} - \frac{-4.6}{0.3} - \frac{23.9}{23.9}$	$\frac{-8.3}{-1.3} - \frac{-2.7}{2.1} - \frac{5.9}{5.9}$
Средняя температура наиболее теплого квартала, °С (bio 10)	$\frac{6.7}{18.6} - \frac{20.4}{22.1} - \frac{26.2}{26.2}$	$\frac{13.5}{15.7} - \frac{16.5}{17.1} - \frac{22.0}{22.0}$	$\frac{13.8}{18.4} - \frac{21.4}{24.0} - \frac{33.6}{33.6}$	$\frac{8.9}{17.4} - \frac{18.9}{21.0} - \frac{25.7}{25.7}$	$\frac{18.4}{19.7} - \frac{20.7}{20.9} - \frac{22.9}{22.9}$
Средняя температура наиболее холодного квартала, °С (bio 11)	$\frac{-23.4}{-11.7} - \frac{-5.7}{-1.2} - \frac{11.8}{11.8}$	$\frac{-17.5}{-5.1} - \frac{-3.2}{0.1} - \frac{5.9}{5.9}$	$\frac{-10.9}{3.5} - \frac{6.6}{9.7} - \frac{23.9}{23.9}$	$\frac{-22.7}{-14.0} - \frac{-8.7}{-2.8} - \frac{2.4}{2.4}$	$\frac{-12.0}{-11.0} - \frac{-9.7}{-8.8} - \frac{7.7}{7.7}$
Годовые осадки, мм (bio 12)	$\frac{38}{332} - \frac{436}{514} - \frac{1662}{1662}$	$\frac{492}{597} - \frac{739}{801} - \frac{1525}{1525}$	$\frac{113}{518} - \frac{690}{799} - \frac{1730}{1730}$	$\frac{175}{374} - \frac{442}{509} - \frac{842}{842}$	$\frac{300}{370} - \frac{440}{490} - \frac{580}{580}$
Количество осадков в наиболее влажный месяц, мм (bio 13)	$\frac{8}{46} - \frac{58}{66} - \frac{198}{198}$	$\frac{60}{78} - \frac{89}{88} - \frac{210}{210}$	$\frac{21}{74} - \frac{98}{109} - \frac{258}{258}$	$\frac{19}{47} - \frac{60}{70} - \frac{126}{126}$	$\frac{33}{41} - \frac{50}{58} - \frac{66}{66}$
Количество осадков в наиболее сухой месяц, мм (bio 14)	$\frac{0}{15} - \frac{22}{27} - \frac{109}{109}$	$\frac{16}{28} - \frac{37}{46} - \frac{87}{87}$	$\frac{0}{5} - \frac{23}{41} - \frac{91}{91}$	$\frac{2}{16} - \frac{21}{27} - \frac{42}{42}$	$\frac{17}{22} - \frac{24}{31} - \frac{35}{35}$
Количество осадков в наиболее теплый квартал, мм (bio 18)	$\frac{19}{107} - \frac{138}{170} - \frac{382}{382}$	$\frac{165}{206} - \frac{241}{243} - \frac{486}{486}$	$\frac{0}{40} - \frac{116}{194} - \frac{436}{436}$	$\frac{21}{122} - \frac{157}{190} - \frac{318}{318}$	$\frac{85}{106} - \frac{136}{128} - \frac{171}{171}$
Количество осадков в наиболее холодный квартал, мм (bio 19)	$\frac{2}{69} - \frac{95}{117} - \frac{477}{477}$	$\frac{79}{103} - \frac{149}{196} - \frac{504}{504}$	$\frac{0}{147} - \frac{212}{253} - \frac{628}{628}$	$\frac{7}{60} - \frac{82}{106} - \frac{182}{182}$	$\frac{66}{86} - \frac{97}{124} - \frac{144}{144}$

*Примечание.* Над чертой: минимальное – среднее – максимальное значение; под чертой: нижний – верхний квартили; т.р. – точка регистрации вида.  
*Note.* Above the line is the minimum – average – maximum value; below the line are lower – upper quartiles; т.р. – species registration point.

При распашке залежных земель под очередной цикл сельскохозяйственного использования происходит резкая активизация сохранившегося в состоянии покоя банка семян. Наши наблюдения показывают, что на вновь распаханых залежах, особенно в Левобережье, отмечаются мощные вспышки численности *O. cuman* вместе с другими сорными растениями из сложноцветных. Таким образом, распашка прерывает естественный процесс очищения почвы от семян заразики, который происходил в отсутствие восприимчивого хозяина. Кроме того, механическая обработка почвы приводит к перемещению семян паразита из нижних горизонтов в поверхностные, где создаются оптимальные условия для их прорастания и инфицирования корней растения хозяина. Если не происходит дальней-

шая обработка почвы, резко увеличивается и обновляется банк семян, что в зоне эколого-климатического оптимума весьма опасно. Получение семян, которые сохраняются в почве в течение нескольких сезонов, значительно увеличивает вероятность натурализации и ее географические масштабы, особенно для однолетников [25].

## Заключение

Проведенное биоклиматическое моделирование подтвердило отсутствие в Саратовской области территорий, потенциально пригодных по климатическим параметрам для *O. reticulata* subsp. *pallidiflora* и *O. ramosa*. Вид *O. cuman* находится в зоне эколого-климатического оптимума в пределах нативного ареала, поэтому весьма вероятно дальнейшее расселение его на новые местообитания в регионе. Оптимальные для *O. cuman* территории имеются и в соседних с Саратовской областью регионах.

В реальности ареал растений паразитов динамичен, так как плотность и численность их популяций колеблется в зависимости от наличия подходящих растений хозяев. Представляется интересным сопоставить в дальнейшем эколого-климатические оптимумы растения паразита и хозяина.

Активное вовлечение залежных земель в сельскохозяйственный оборот без учета фитосанитарного состояния почвы является мощным фактором, влияющим на увеличение численности *O. cuman*. Данный процесс приводит к быстрому формированию новых очагов заражения и способствует поддержанию высокого инфекционного фона на обширных территориях.

Модель пригодности местообитания, разработанная для различных видов заразиховых на территории Саратовской области, показывает необходимость продолжения мониторинговой работы по обнаружению экземпляров заразики подсолнечниковой (*O. cuman*) и заразики шерстистой (*O. caesia*) в районах массового возделывания подсолнечника, где сохраняются или вводятся в эксплуатацию залежные земли в пределах нативных ареалов данных видов. Учитывая возможность дальнейшего расселения



Рис. 5. *O. cuman* на латуке после дискования многолетней залежи. 8 июля 2025 г. Федоровский район, Саратовская область.

Fig. 5. *O. cuman* on lettuce after plowing a perennial fallow land. July 8, 2025. Fyodorovsky District, Saratov Region.

*O. ramosa*, факты заноса этого вида требуют безусловного внимания во всех регионах Нижнего Поволжья и юга России.

В заключение можно добавить, что паразитические формы взаимоотношений являются эффективными способами энергетического и информационного обмена между их компонентами и в конечном итоге ведут к уравниванию системы. Однако интенсивное сельское хозяйство без рационального и научного подхода способствует всплескам численности сорных видов и смещению равновесия в системе «паразит–хозяин», тогда как естественные сукцессионные процессы ведут к уменьшению численности паразитических растений и восстановлению экосистемного баланса.

### Список литературы

1. Цвелев Н.Н. О роде заразиха (*Orobanchae L. sensu lato*, Orobanchaceae) в России. *Новости систематики высших растений*. 2015,46:189–215.
2. Архипова Е.А., Болдырев В.А., Козырева Е.А., Степанов М.В. Новые материалы по некоторым охраняемым видам бесхлорофилльных покрытосеменных растений в Саратовской области (на основании фондов гербария СГУ (SARAT)). В кн.: *Вавиловские чтения – 2017: сборник статей междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 130-й годовщине со дня рождения академика Н.И. Вавилова*. Саратов: Саратовский ГАУ, 2017, с. 181–183.
3. *Красная книга Саратовской области: Грибы. Лишайники. Растения. Животные* (под ред. Г.В. Шляхтина). Саратов: Папирус, 2021, 469 с.
4. Сибикеева Е.Ю., Борисов С.Ю., Михайлов М.А. Распространение заразихи кумской и заразихи бледноцветковой в посевах подсолнечника и среди сопутствующих сорняков в Саратовской области. *Бюллетень Ботанического сада Саратовского государственного университета*. 2014,12:48–57.
5. Серегин А.П. (ред.) *Цифровой гербарий МГУ*. Москва, 2025. URL: <https://plant.depo.msu.ru/> (дата обращения 18.11.2025).
6. Еленевский А.Г., Буланный Ю.И., Радыгина В.И. *Конспект флоры Саратовской области*. Саратов: Изд. центр «Наука», 2008, 232 с.
7. Маевский П.Ф. *Флора средней полосы европейской части России*. 11-е изд. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2014, 635 с.
8. Ямалов С.М., Хасанова Г.Р., Лебедева М.В., Корчев В.В. О новых сеgetальных сообществах посевов подсолнечника в Оренбургской области. *Самарский научный вестник*. 2021,10(2):124–130. doi:10.17816/snv2021102119
9. Хасанова Г.Р., Ямалов С.М., Камалетдинова А.А. Инвазионные виды сеgetальных сообществ Южного и среднего Урала. *Российский журнал биологических инвазий*. 2024,17(1):133–145. doi:10.35885/1996-1499-17-1-133-145
10. Корженевский В.В., Рыфф Л.Э., Литвинюк Н.А. Анализ флоры высших сосудистых растений Казантского природного заповедника. *Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада*. 2006,126:165–189.
11. Багрикова Н.А. Изучение синантропной растительности Крымского полуострова с позиций эколого-флористического подхода: состояние вопроса, классификация сообществ и перспективы исследований. *Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада*. 2016,143:25–58.
12. Траутвайн С.А. Эколого-географический анализ и территориальное распространение растений-паразитов в Предкавказье. *Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки*. 2024,18(1):111–116. doi:10.31161/1995-0675-2024-18-1-111-116
13. Шмаряева А.Н., Кузьменко И.П., Шишлова Ж.Н., Федяева В.В., Дзигунова Ю.В. Алофитная фракция синантропной флоры Ботанического сада Южного федерального университета. *Живые и биокосные системы*. 2019,30:3.
14. Блакберн А.А., Остапко В.М. Сравнительный анализ отдельных показателей фитоценозов природных степных участков и экспериментального участка Донецкого ботанического сада «искусственные степи». *Промышленная ботаника*. 2024,24(4):23–35. doi:10.5281/zenodo.14638249
15. Симанчук Е.А., Куприянов А.Н., Султангазина Г.Ж. Конспект флоры отвалов Соколовского, Сарбайского и Качарского железорудных месторождений (Казахстан). *Ботанические исследования Сибири и Казахстана*. 2024,30:3–24.
16. Лисовский А.А., Дудов С.В., Оболенская Е.В. Преимущества и ограничения методов экологического моделирования ареалов. 1. Общие подходы. *Журнал общей биологии*. 2020,81(2):123–134.
17. Лисовский А.А., Дудов С.В. Преимущества и ограничения методов экологического моделирования ареалов. 2. MaxEnt. *Журнал общей биологии*. 2020,81(2):135–146.
18. Кулисева Ю.И., Кондратьева А.О., Шилова И.В., Кашин А.С. Потенциальный ареал *Calophaca wolgarica* L. и прогностическая оценка его трансформации в связи с глобальными изменениями климата. В кн.: *Ботанические сады как центры сохранения биоразнообразия и рационального использования растительных ресурсов: сборник статей Всерос. науч. конф. с междунар. участием*. М.: Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, 2025, с. 105–109.

19. Пшегусов Р.Х., Чадаева В.А. Комплексный подход учета экологических факторов в моделях современного распространения и климатогенной динамики *Ambrosia artemisiifolia* L. на Кавказе. *Российский журнал биологических инвазий*. 2023,16(3):149–167. doi:10.35885/1996-1499-16-3-149-167; EDN: АВQTYH
20. Phillips S.J., Anderson R.P., Schapire R.E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*. 2006,190(3–4):231–259.
21. Phillips S.J. A brief tutorial on Maxent. *Lessons in Conservation*. 2010,3:108–135. <https://doi.org/10.5531/cbc.linc.3.1.6>
22. Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 2017,37:4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
23. Афонин А.Н., Грин С.Л., Дзюбенко Н.И., Фролов А.Н. *Аэроэкологический атлас России и сопредельных стран: экономически значимые растения, их вредители, болезни и сорные растения*. 2008. URL: <https://agroatlas.ru> (дата обращения 13.11.2025).
24. Антонова Т.С., Стрельников Е.А., Гучетль С.З., Челюстникова Т.А. Разнообразие форм заразики на подсолнечнике на юге России. *Защита и карантин растений*. 2014,11:45–48.
25. Gioria M., Hulme P.E., Richardson D.M., Pyšek P. Why are invasive plants successful? *Annual Review of Plant Biology*. 2023,74:635–670. doi:10.1146/annurev-arplant-070522-071021
- broomrape in sunflower crops and related weeds in the Saratov Region]. *Byulleten' Botanicheskogo sada Saratovskogo gosuniversiteta = Bulletin of the Botanical Garden of Saratov State University*. 2014,12:48–57. (In Russ).
5. Seregin A.P. (ed.) *Digital Herbarium of Moscow State University*: [Electronic resource]. Moscow: Moscow State University, 2025. URL: <https://plant.depo.msu.ru/> (accessed 18.11.2025).
6. Elenevsky A.G., Bulany Yu.I., Radygina V.I. *Konspekt flory Saratovskoj oblasti = Abstract of the flora of the Saratov Region*. Saratov: Publ. Center "Nauka", 2008, 232 p. (In Russ).
7. Mayevsky P.F. *Flora of the central part of European Russia*. Moscow: KMK Scientific Press Ltd., 2014, 635 p. (In Russ.).
8. Yamalov S.M., Khasanova G.R., Lebedeva M.V., Korchev V.V. New segetal communities of sunflower crops in the Orenburg Region. *Samara Journal of Science*. 2021,10(2):124–130. (In Russ). doi:10.17816/snv2021102119
9. Khasanova G.R., Yamalov S.M., Kamaletdinova A.A. Invasive species of segetal communities of the Southern and Middle Urals. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2024,17(1):133–145. (In Russ). doi:10.35885/1996-1499-17-1-133-145
10. Korzhenevsky V.V., Ryff L.E., Litvinyuk N.A. [Analysis of flora of higher vascular Plants of the Kazantip Nature Reserve]. *Sbornik nauchnykh trudov Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada*. 2006,126:165–189. (In Russ).
11. Bagrikova N.A. [Study of synanthropic vegetation of the Crimean Peninsula according to the ecological-floristic approach: state of matter, communities' classification and perspective of the research]. *Sbornik nauchnykh trudov Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada*. 2016,143:25–58. (In Russ).
12. Trautwein SA. Ecological and geographical analysis and territorial distribution of parasitic plants in the Caucasus. *Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences*. 2024,18(1):111–116. (In Russ). doi:10.31161/1995-0675-2024-18-1-111-116
13. Shmaraeva A.N., Kuz'menko I.P., Shishlova Z.N., Fedyeva V.V., Dzigunova Yu.V. [The apophytic fraction of the synanthropic flora of the Botanical Garden of the Southern Federal University]. *Zhivye i biokosnyye sistemy = Living and biokos systems*. 2019,30:3. (In Russ).
14. Blackburn A.A., Ostapko V.M. Comparative analysis of some parameters of phytocenoses of natural steppe areas and the «Artificial Steppe» experimental area of the Donetsk Botanical Garden. *Industrial Botany*. 2024,24(4):23–35. (In Russ). doi:10.5281/zenodo.14638249

## References

1. Tzvelev N.N. On the genus *Orobancha* L. sensu lato (*Orobanchaceae*) in Russia. *Novosti sistematiki vysshnykh rasteniy = Higher Plant Taxonomy News*. 2015,46:189–215. (In Russ).
2. Arkhipova E.A., Boldyrev V.A., Kozyreva E.A., Stepanov M.V. New materials for some protected species of chlorophyll-free angiosperms plants in Saratov Region (on the basis of Herbarium SSU Funds (SARAT)). In: *Vavilovskie chteniya – 2017: Sbornik statej mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyash. 130-y godovshchine so dnya rozhdeniya akademika N.I. Vavilova = Vavilov Readings – 2017: collection of articles of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 130th anniversary of the birth of Academician N.I. Vavilov*. Saratov: Saratov State Agrarian University, 2017, p. 181–183. (In Russ).
3. Shlyakhtin G.V. (ed.) *Red Book of the Saratov Region: Mushrooms. Lichens. Plants. Animals*. Saratov: Papyrus, 2021, 469 p. (In Russ).
4. Sibikeeva Yu.E., Borisov S.Yu., Michailov M.A. [Distribution of sunflower broomrape and pale-flowered

15. Simanchuk E.A., Kupriyanov A.N., Sultangazina G.J. Overview of the flora of the dumps of Sokolovsky, Sarbaysky and Kacharsky iron ore Deposits (Kazakhstan). *Botanicheskie issledovaniya Sibiri i Kazakhstana = Botanical Research in Siberia and Kazakhstan*. 2024,30:3–24. (In Russ).
16. Lisovsky A.A., Dudov S.V., Obolenskaya E.V. Advantages and limitations of application of the species distribution modeling methods. 1. A general approach. *Zhurnal obshchej biologii = Journal of General Biology*. 2020,81(2):123–134. (In Russ.).
17. Lisovsky A.A., Dudov S.V. Advantages and limitations of application of the species distribution modeling methods. 2. MaxEnt. *Zhurnal obshchej biologii = Journal of General Biology*. 2020,81(2):135–146. (In Russ.).
18. Kuliseva Yu.I., Kondratieva A.O., Shilova I.V., Kashin A.S. *Calophaca wolgarica* L. potential area and the prognostic evaluation of its transformation due to the global climate changes. In: *Botanical gardens as centers of biodiversity conservation and rational use of plant resources: Collection of articles from the All-Russian Scientific Conference with international participation*. Moscow: Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, 2025, p. 105–109. (In Russ.).
19. Pshegusov R.H., Chadaeva V.A. Integrated approach to accounting environmental factors in models of the current distribution and climatic dynamics of *Ambrosia artemisiifolia* L. in the Caucasus. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2023,16(3):149–167. (In Russ.). doi:10.35885/1996-1499-16-3-149-167
20. Phillips S.J., Anderson R.P., Schapire R.E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*. 2006,190(3–4):231–259.
21. Phillips S.J. A brief tutorial on Maxent. *Lessons in Conservation*. 2010,3:108–135. <https://doi.org/10.5531/cbc.linc.3.1.6>
22. Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 2017,37:4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
23. Afonin A.N., Green S.P., Dzyubenko N.I., Frolov A.N. *Agricultural and ecological atlas of Russia and neighboring states: agricultural plants, their pests, diseases and weeds*. 2008. URL: <http://www.agroatlas.ru> (accessed 13.11.2025).
24. Antonova T.S., Strel'nikov E.A., Guchetl' S.Z., Chelustnikova T.A. A variety of sunflower broomrape forms on sunflower in the South of Russia. *Zashhita i karantin rastenij = Plant Protection and Quarantine*. 2014,11:45–48. (In Russ.).
25. Gioria M., Hulme P.E., Richardson D.M., Pyšek P. Why are invasive plants successful? *Annual Review of Plant Biology*. 2023,74:635–670. doi:10.1146/annurev-arplant-070522-071021

## Об авторах

Сотрудники кафедры «Ботаника и экология» Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, Саратов, Россия:

✉ **Сергеева Ирина Вячеславовна**, доктор биологических наук, заведующая кафедрой «Ботаника и экология», [ivsergeeva@mail.ru](mailto:ivsergeeva@mail.ru). <https://orcid.org/0000-0001-6824-1597>

✉ **Петрова Надежда Андреевна**, кандидат биологических наук, доцент кафедры «Ботаника и экология», [nasch-1@yandex.ru](mailto:nasch-1@yandex.ru). <https://orcid.org/0000-0003-1969-2783>

**Шевченко Екатерина Николаевна**, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент. <https://orcid.org/0000-0002-6474-5242>

**Гулина Екатерина Вячеславовна**, старший преподаватель. <https://orcid.org/0000-0002-2986-713X>

**Пономарева Альбина Леонидовна**, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент. <https://orcid.org/0000-0001-7423-7084>

## About the Authors

Employees at the Department of Botany and Ecology of the Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia:

✉ **Sergeeva, Irina V.**, Doctor of Biology, Head of the Department, [ivsergeeva@mail.ru](mailto:ivsergeeva@mail.ru). <https://orcid.org/0000-0001-6824-1597>

✉ **Petrova, Nadezhda A.**, Cand. of Sci. in Biology, Associate Professor, [nasch-1@yandex.ru](mailto:nasch-1@yandex.ru). <https://orcid.org/0000-0003-1969-2783>

**Shevchenko, Ekaterina N.**, Cand. of Agricultural Sciences, Associate Professor. <https://orcid.org/0000-0002-6474-5242>

**Gulina, Ekaterina V.**, Senior Lecturer. <https://orcid.org/0000-0002-2986-713X>

**Ponomareva, Albina L.**, Cand. of Agricultural Sciences, Associate Professor. <https://orcid.org/0000-0001-7423-7084>

Поступила 07.12.2025

Принята к публикации 10.02.2026

Received 7 December 2025

Accepted 10 February 2026

## Правила оформления и публикации рукописей в журнале «Геосистемы переходных зон»

E-mail: [gtrz-journal@mail.ru](mailto:gtrz-journal@mail.ru)

### Список научных специальностей

и соответствующих им отраслей науки, по которым журнал «Геосистемы переходных зон»  
включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть  
опубликованы основные результаты диссертаций на соискание  
ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук

Шифр	Наименование группы научных специальностей, наименование научной специальности	Наименование отраслей науки, по которым присуждается ученая степень
<b>1.6</b>	<b>Науки о Земле</b>	
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
<b>1.1</b>	<b>Механика</b>	
1.1.8	Механика деформируемого твердого тела	Технические Физико-математические
<b>1.5</b>	<b>Биология</b>	
1.5.15	Экология	Биологические

**График выхода в свет журнала:** № 1 – март; № 2 – июнь; № 3 – сентябрь; № 4 – декабрь.

### ОСНОВНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ПОДАЧИ РУКОПИСИ

Политика и регламенты журнала	
<b>Общие принципы</b>	<p>Политика Редакционной коллегии журнала «Геосистемы переходных зон» основывается на современных юридических требованиях в отношении авторского права, традиционных этических принципах российской и международной научной периодики, сформулированных Комитетом по этике научных публикаций (COPE).</p> <p>Рукопись должна быть законченной, ясной, краткой и точной (в соответствии с рекомендациями Европейской ассоциации научных редакторов (<a href="#">The EASE Guidelines for Authors and Translators of Scientific Articles</a>) и методическими материалами Академии АНРИ (Ассоциации научных редакторов и издателей).</p> <p>Редакция журнала «Геосистемы переходных зон» принимает необходимые меры для защиты персональных данных авторов статей, рецензентов журнала и членов редакционной коллегии в соответствии с Федеральным законом от 27.07.2006 №152-ФЗ (см. файл на сайте журнала <a href="#">Декларация о приватности</a>).</p> <p>Редакционная политика и требования к рукописям, предъявляемые нашим журналом, излагаются ниже. Подробнее см. файлы на сайте журнала <a href="#">Редакционная политика и издательская этика журнала</a>, <a href="#">Порядок рецензирования и публикации рукописей</a>, <a href="#">Правила оформления и публикации рукописей</a></p>

<b>Модель опубликования</b>	<b>Открытый доступ.</b> Лицензия CC BY 4.0. Позволяет распространять и копировать статью, перерабатывать в иные варианты, производить анализ текста или данных статьи, адаптировать или делать производные работы (например, перевод) и т.п. <i>при условии указания авторства и полного сохранения всех авторских прав на эту статью.</i> <b>Публикация бесплатна для авторов.</b>
<b>Идентификаторы статей</b>	ID CrossRef – DOI ( <i>Digital Object Identification</i> ). DOI журнала: <a href="https://doi.org/10.30730/gtrz">https://doi.org/10.30730/gtrz</a> EDN ( <i>eLIBRARY Document Number</i> ) – уникальный идентификатор, присваиваемый всем публикациям, размещенным на платформе <a href="http://elibrary.ru">elibrary.ru</a>
<b>Политика в отношении препринтов и постпринтов</b>	Допускается предпубликация на любом из специализированных серверов, в частности arXiv.org (физика, математика, информатика, биология); <a href="https://preprints.ru/">https://preprints.ru/</a> и др. Опубликованную статью авторы имеют право размещать в сети Интернет, в депозитории учреждения, а также на открытых научно-информационных платформах.
<b>Online first</b>	Возможно размещение на сайте журнала финальной электронной версии статьи (прошедшей редподготовку) до того, как работа над выпуском будет завершена. Статья online first имеет собственный DOI и иные необходимые для библиографической ссылки реквизиты. После того как номер журнала будет окончательно сформирован и выйдет в свет, метаданные и уникальные ID статьи online first останутся неизменными.
<b>Типы публикаций</b> <b>Рецензируются</b>	Оригинальные статьи, в том числе дискуссионные, обзоры, краткие сообщения, каталоги, базы данных – под тематическими рубриками.
<b>Не рецензируются</b>	Письма в редакцию; информации о полевых и экспериментальных исследованиях, экспедициях, конференциях; очерки об ученых; рецензии на научные издания.
<b>Прием рукописей</b>	Рукописи на русском и/или английском языке, соответствующие тематике журнала «Геосистемы переходных зон» (см. <a href="#">Список научных специальностей</a> ), по которым журнал включен в Перечень ВАК), принимаются в течение года в электронной форме: e-mail: <a href="mailto:gtrz-journal@mail.ru">gtrz-journal@mail.ru</a>
<b>Не принимаются</b>	Научно-популярные материалы; материалы авторов, из которых ни один не имеет аффилиации с научной или научно-производственной организацией, проведшей экспертизу.
<b>Первичный скрининг</b>	Рукопись возвращается автору на основании редакционного заключения, если статья не отвечает тематике журнала, не содержит предмета научного исследования, не соответствует этическим требованиям, дублирует опубликованные материалы, логически не выстроена, изложена неудобоваримым языком и т.п.
<b>Рецензирование</b>	Срок до первого решения о направлении на рецензирование около 10 дней. Внешнее двойное слепое рецензирование с привлечением 2-3 рецензентов в срок около 8 недель. Решение о публикации принимает редакция в течение 2–3 месяцев со дня получения материалов на основании минимум 2 рецензий. Получив рецензию, автор обязан в рабочем файле со статьей и/или в файле с рецензией ответить на каждый комментарий рецензента; указать конкретно, какие именно изменения внесены в статью; написать убедительное, вежливое возражение, если, по мнению автора, рецензент неправ.

	Наличие положительной рецензии не является достаточным основанием для публикации рукописи, так же как отрицательная рецензия не означает отказ в публикации. Окончательное решение остается за главным редактором (зам. главного редактора).
<b>Ретракция</b>	Опубликованная статья изымается (ретрагируется), если в процессе ее публикации были нарушены чьи-либо права или общепринятые нормы научной этики. К недобросовестному и неэтичному поведению участников издательского процесса относят: фальсификацию данных; плагиат данных, идей или фрагментов статей; намеренное сокрытие деталей методики; ложное представление результатов других исследований; недопустимый самоплагиат или дублирование публикаций и т.п.
<b>Информация на титульных страницах (на русском и английском языках)</b>	
<b>Тематическая рубрика</b>	Из приведенного выше списка специальностей.
<b>Индекс УДК</b>	По таблицам Универсальной десятичной классификации, имеющимся в библиотеках, или с помощью интернет-ресурса <a href="http://teacode.com/online/udc/">http://teacode.com/online/udc/</a>
<b>Заглавие</b>	10–12 слов. Короткое, емкое. По возможности без общих слов, научных жаргонизмов и аббревиатур. В идеале все слова могут служить ключевыми при научном поиске. Указать тип исследования, если необходимо (например: обзор, рецензия).
<b>Инициалы и фамилии авторов</b>	Д. П. Николаев <sup>1,3</sup> Dmitry P. Nikolaev <sup>1,3</sup> Цифровые индексы при фамилии и при учреждении указывают на аффилиацию авторов.
<b>Наименование учреждения и место его нахождения</b>	В той же форме, как в Уставе. Учреждение (отмечается верхним индексом 1, 2 и т.д., каждое на новой строчке), город, страна.
<b>Аннотация (резюме, abstract)</b>	Объем 200–300 слов. Текст должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и незначащих формулировок. Задача: назвать исследуемый аспект проблемы, описать основные цели работы; объяснить, как было проведено исследование, без методологических деталей; суммировать наиболее важные результаты и их значимость. Не содержит ссылок на литературу и аббревиатур (если возможно).
<b>Ключевые слова / Keywords</b>	До 10 терминов (допустимы словосочетания), размещенных в порядке значимости при поиске публикации в базе данных. В идеале не повторяют слова из заглавия. В форме единственного числа; разделены запятой; пишутся со строчной буквы (за исключением имен собственных); использование аббревиатур нежелательно.
<b>Финансирование / Funding</b>	Сведения о финансовой поддержке работы (с номерами грантов или тем госзаданий в скобках).
<b>Благодарности / Acknowledgements</b>	При необходимости.
<b>Вариант английского языка для метаданных и текстов статей</b>	Американский либо британский при условии соблюдения единообразия.
<b>Схему оформления статьи</b> и рекомендуемый перевод званий и должностей на английский язык см. на сайте журнала в файле <a href="#">Образец оформления статьи</a> .	

<b>Структура основного текста</b>	
<b>Принятые / обязательные разделы</b>	Оригинальные исследования должны иметь четкую структуру: <b>Введение</b> (предпосылки и цели, постановка задач с упором на новизну), <b>Материалы и методы</b> (на уже опубликованные методики приводятся ссылки), <b>Результаты, Обсуждение, Заключение / Выводы</b> (выводы должны четко коррелировать с формулировкой цели и задач работы, с результатами). Такая структура необязательна для других типов статей и кратких сообщений.
<b>Подзаголовки</b>	Возможны тематические подзаголовки двух-трех уровней.
<b>Библиографический аппарат</b>	
<b>Список цитируемых источников</b>	Количество позиций не ограничено. Обязательно, при наличии, указываются DOI и другие идентификаторы, в том числе унифицированный идентификатор ресурса URI (URL). Список составляется в порядке упоминания источников в тексте и нумеруется. Обязательны работы последних 5–10 лет. Минимизировать ссылки на монографии и подобные издания. Обеспечить полное и точное цитирование источников и их проверяемость средствами поисковых систем (Google, Yandex и др.). В тексте должны быть ссылки на все приведенные в списке источники.
<b>Самоцитирование</b>	Не более 15 %.
<b>Какие источники не включаются в список литературы</b>	Документы (приказы, ГОСТы, СанПиНы, нормативы, методические указания, постановления и т.п.); тезисы и материалы заочных конференций; электронные газетные и любые новостные ресурсы, сайты учреждений и организаций; архивы; словари, энциклопедии, другие справочники; неперсонализированные базы данных; статьи из ненаучных журналов. Ссылки на указанные документы следует помещать в подстрочные сноски.
<b>References</b>	<b>Переводы заглавий публикаций</b> необходимо брать из оригинальных источников (из английских версий или метаданных на английском языке, которые помещают практически все журналы). Авторский же или с помощью переводчика перевод на английский язык заглавий источников обязательно заключается в квадратные скобки. <b>Название журнала:</b> если журнал на своем сайте не использует англоязычный вариант, то название в списке транслитерируют или дают через знак = с англоязычным ( <i>Perspektivnyye issledovaniya = Prospective Research</i> ). После выходных данных указать в скобках язык публикации (In Russ.), (In Chin.), (In Japan) и т.д.
<b>Оформление библиографических ссылок</b>	Ссылки на литературу в тексте даются в квадратных скобках с указанием порядкового номера источника в списке: [2, 4–6]. Правила библиографического описания одинаковы для русскоязычных и англоязычных источников. Принят стиль, близкий к стилю Ванкувер (Vancouver style) (более подробную информацию и примеры оформления ссылок см. на сайте журнала: <a href="#">Правила оформления и публикации рукописей</a> ).
<b>Форматирование</b>	
<b>Формат листа</b>	A4
<b>Поля</b>	1.5 см с каждой стороны
<b>Шрифты</b>	Times New Roman – для текста, Symbol – для греческих букв

<b>Размер шрифта</b>	12–13
<b>Десятичный символ</b>	Точка, а не запятая
<b>Межстрочный интервал</b>	1,15
<b>Выравнивание текста</b>	По левому краю
<b>Автоматическая расстановка переносов</b>	Нет
<b>Нумерация страниц</b>	Внизу страницы, посередине
<b>Прописные / строчные буквы</b>	Все текстовые элементы (в том числе в библиографических списках), включая названия публикаций, заголовки и подзаголовки, кроме случаев, подчиняющихся общепринятым орфографическим правилам, набираются <b>строчными</b> (не заглавными!) буквами.
<b>Неразрывными пробелами отделяются:</b>	Инициалы от фамилии (А.А. Иванов); размерность от цифры: 100 кПа, 77 К, 50 %, 10 ‰, кроме градусов: 90° (но 20 °С); порядковые номера от любого обозначения: рис. 1, fig. 1, табл. 2; знак широты и долготы в географических координатах: 56.5° N; 85.0° E и т.п.
<b>Математические формулы</b>	<p>Формулы с нестандартными символами набираются полностью в специализированном редакторе типа MathType или встроенном редакторе уравнений Microsoft Word (Microsoft Equation).</p> <p>Небольшие формулы и символы, не требующие использования специального редактора, располагающиеся по тексту, набирают латиницей и/или через опцию <i>Вставка – Символ</i>.</p> <p>Все правки в формулы в процессе редактирования статьи вносят в рабочий файл сами авторы.</p>
<b>Таблицы</b>	<p>Создаются в Word (<i>Вставка – Таблица – Добавить таблицу</i>). Таблицы должны быть озаглавлены, в них не должно быть пустых ячеек. Проверка обязательно поясняется в примечании.</p> <p>Заглавия таблиц и примечания к ним даются на русском и английском языках.</p>
<b>Иллюстрации</b> размещаются в теле рукописи и отдельно в файлах	<p>При подаче рукописи иллюстрации размещаются по тексту статьи (через опцию <i>Вставка – Рисунок – Обтекание – В тексте</i>).</p> <p>В случае принятия публикации предоставляются отдельными файлами. Если рисунок состоит из самостоятельных частей, желательно прислать каждую часть отдельным файлом. Объем каждого графического файла – не более 10 Мб.</p>
<b>Иллюстративные материалы</b>	<p>Изображения в формате jpg/tiff/cdr(CorelDraw), с высоким разрешением. Ширина рисунка после его уменьшения в книжной ориентации страницы – не более 170 мм, в альбомной – не более 230 мм.</p> <p>Графика представляется в форматах tiff, cdr версий 12.0(2004) или X4(2008), с возможностью редактирования. При экспорте из других программ использовать формат PostScript (.eps) с разрешением не менее 300 dpi.</p> <p>Карты и схемы для публикации в электронном виде, не укладываемые в стандартный лист формата А4, прилагаются в виде дополнительных файлов.</p>
<b>Язык надписей на рисунках</b>	<p>Надписи (и легенды) на рисунках в русскоязычных статьях желательно давать на английском языке при условии, что для русского читателя это не будет препятствием к восприятию информации. Недопустимо часть рисунков представлять с надписями на английском, а часть – на русском; исключение могут составить географические карты.</p>

<p><b>Подписуемые подписи</b></p>	<p>Надписи на осях начинаются с прописной буквы: Depth, m. В десятичных дробях на рисунках (как и в тексте) ставьте точки, а не запятые.</p> <p>Делаются на русском и английском языках. Литеры для обозначения частей ставят в скобках: (а), (б), (в) и т.д. Если надписи на рисунках на русском, то и литеры на частях рисунков в русской и английской подписях выполняются кириллицей; если на английском, то и литеры в обеих подписях – латиницей.</p> <p>Детальность подписи должна быть достаточна для восприятия наглядной информации вне текста.</p>
<p><b>Дополнительные данные</b> (отдельными файлами)</p>	<p>Информация, которая, во избежание перегрузки основного текста, может быть размещена в виде приложения к статье в электронной версии: большие таблицы, иллюстрации, базы данных, каталоги и т.п.</p>
<p><b>Сопроводительные материалы при подаче рукописи</b></p>	
<p><b>Сведения об авторах</b> – на русском и английском языках</p> <p><b>Автор для контактов</b></p>	<p><b>Приводятся в конце статьи.</b> Последовательность: Фамилия, имя, отчество, ученая степень, должность, лаборатория (кафедра), учреждение (как записано в Уставе), город, страна, e-mail. Постоянные идентификаторы автора: ORCID в форме <a href="https://orcid.org/">https://orcid.org/...</a> ; Spin-код.</p> <p>Отметить значком «конверт».</p>
<p><b>Сопроводительное письмо</b> – требуется ли?</p>	<p><b>Не требуется.</b></p>
<p><b>Авторское соглашение,</b> подписанное всеми авторами</p>	<p>Форму скачать на сайте журнала.</p>
<p><b>Экспертное заключение</b> (скан-копия) о возможности опубликования в открытой печати</p>	<p>По форме, принятой в организации автора.</p>
<p><b>Разрешение на публикацию</b> отдельных материалов</p>	<p>В случае необходимости (см. файл на сайте журнала <a href="#">О разрешениях на использование материалов третьих лиц</a>).</p>
<p><b>Кандидатуры рецензентов</b> – по желанию?</p>	<p><b>По желанию:</b> назвать нежелательные (ФИО) / предложить 2-4 желательные кандидатуры (ФИО, E-mail, организация).</p>
<p><b>Контрольные вопросы</b></p>	<p>Отправляя материал в редакцию, убедитесь в наличии обязательной информации в статье, обязательных файлов и обязательных документов (см. файл на сайте <a href="#">Контрольные вопросы</a>).</p>