

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

# ГЕОСИСТЕМЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН

**GEOSYSTEMS**  
of Transition Zones

**2023** **Том 7** **№ 1**

## Уважаемые авторы, рецензенты и все друзья нашего журнала!

Редколлегия и редакция журнала «Геосистемы переходных зон» благодарят всех, кто содействует журналу в выполнении его миссии – предоставление российским и зарубежным исследователям в области геологии, вулканологии, геофизики, сейсмологии, океанологии, географии, геомеханики, геоэкологии и др. возможности публиковать свои результаты изучения процессов и закономерностей переходных зон Земли.

При вашем заинтересованном участии журнал за шесть лет существования добился заметных успехов. Наблюдаются явные тренды роста основных параметров, по которым обычно оцениваются журналы. Например, повышение импакт-фактора РИНЦ как с учетом цитирования из всех источников, так и по цитированию в журналах ядра РИНЦ; рост числа ссылок в списках литературы в статьях; увеличение цитирования журналов и зарубежных источников и т.д. Это может способствовать повышению привлекательности и авторитета журнала.

Среди наших авторов ученые из Москвы, Петербурга, Екатеринбурга, Иркутска, Новосибирска, Владивостока, Хабаровска, Петропавловска-Камчатского, Южно-Сахалинска и других городов России.

В настоящее время журнал включен в Перечень ВАК по 9 специальностям в соответствии с новой Номенклатурой специальностей.

В конце 2022 г., как известно, ВАК провел оценку по качественным и количественным критериям журналов, входящих в Перечень. Все журналы распределены по коэффициенту научной значимости по категориям К1, К2, К3. Журналы, входящие в базы WoS, Scopus или RSCI, по умолчанию отнесены к К1. Наш журнал вошел во второй квартиль (К2).

Редколлегией принят тип рецензирования двойной слепой – наиболее оптимальный и рекомендуемый для журналов, нацеленных на вхождение в международные научные базы данных. Рецензии у нас в подавляющем большинстве высококвалифицированные. Мы благодарны нашим рецензентам и внутренним, и независимым, за доброжелательную и конструктивную критику, искреннюю заинтересованность в улучшении качества статей.

Журнал придерживается политики открытого доступа. С 2021 г. журнал включен в международную базу научных журналов Directory of Open Access Journals (DOAJ). PDF-файлы с полнотекстовыми версиями материалов, опубликованных в журнале, находятся в открытом доступе на сайте журнала и на сайте eLibrary, с 2022 г. сведения о статьях и ссылки на них размещаются на портале Российских научных журналов. Метаданные научных статей передаются в международные базы DOAJ и CrossRef.

Оформление журнала и сайт соответствуют всем формальным критериям отбора журналов в международные базы данных.

Стратегия развития журнала, по замыслу редколлегии, предполагала его вхождение в МНБД Scopus и/или Web of Sciences. Но известные реалии жизни сделали такое продвижение проблематичным. Как и другие журналы, мы столкнулись с немалыми трудностями. Основная из них состоит в сокращении притока статей и сужении географии авторов.

Редакция надеется, что журналу удастся сохранить контингент надежных авторов, которые привлекут к сотрудничеству коллег и аспирантов и помогут журналу преодолеть препятствия на пути продвижения его в Russian Science Citation Index (RSCI) (составную часть ядра РИНЦ).

Редакция журнала «Геосистемы переходных зон»

**Научный журнал**

*Учредитель и издатель:*

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики  
Дальневосточного отделения  
Российской академии наук

Издаётся с января 2017 г.

**Периодичность издания 4 раза в год**

**Scientific journal**

*Founder and Publisher:*

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

Published since January 2017

**Periodicity: Quarterly**

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

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

Журнал:

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

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

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

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

1.6.14. Геоморфология и палеогеография (*географические*)

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

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

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

1.5.15. Экология (*биологические*)

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

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

The Journal is:

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

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

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

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

1.6.14. Geomorphology and Paleogeography (*Geography*)

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

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

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

1.5.15. Ecology (*Biology*)

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

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

*Адрес учредителя и издателя*

ИМГиГ ДВО РАН  
ул. Науки, 16, Южно-Сахалинск, 693022  
Тел./факс: (4242) 791517  
E-mail: [gtrz-journal@mail.ru](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, 2023

**Редакционная коллегия***Главный редактор*

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

*Заместитель главного редактора*

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

*Ответственный секретарь*

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

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

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

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

*Deputy Editor-in-Chief*

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

*Executive Secretary*

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

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

*Редакционная коллегия*

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

*Editorial Board*

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

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

*Переводчик Качесова Галина Сергеевна*

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

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

Формат 60 × 84 /8. Усл. печ. л. 12,8.  
 Тираж 150 экз. Заказ 8014. Свободная цена.  
 Дата выхода в свет 30.03.2023.

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

*Translator Galina S. Kachesova*

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

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

Sheet size 60 × 84 /8. Conv. print. sheets 12,8.  
 Number of copies 150. Order no. 8014. Free price.  
 Date of publishing 30.03.2023.

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

**СОДЕРЖАНИЕ**

**CONTENT**

**Геофизика**

*Г.В. Устюгов, В.В. Еришов.* Влияние космических факторов на грязевулканическую деятельность Земли ..... 5

**Geophysics**

*G.V. Ustyugov, V.V. Ershov.* Influence of cosmic factors on mud volcanic activity of the Earth ..... 5

**Геофизика. Сейсмология**

**Geophysics. Seismology**

*Л.М. Богомолов, В.Н. Сычев, Н.А. Сычева.* О сброшенных напряжениях в очагах умеренных и слабых землетрясений: особенности распределения во времени ..... 25

*L.M. Bogomolov, V.N. Sychev, N.A. Sycheva.* On stress drops in the sources of moderate and weak earthquakes: features of distribution in time ..... 37

**МОНИТОРИНГ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ**

**MONITORING OF GEOLOGICAL HAZARDS**

*А.С. Закупин, Н.В. Костылева, Д.В. Костылев.* От ретроспективы к системе реального времени – прогноз землетрясений методом LURR на Сахалине (2019–2022 гг.) ..... 54

*A.S. Zakupin, N.V. Kostyleva, D.V. Kostylev.* From retrospective to real-time system – LURR earthquake prediction on Sakhalin (2019–2022) ..... 64

**Геоинформатика. Геофизика**

**Geoinformatics. Geophysics**

*Т.А. Мингалева, С.В. Шакуро, Н.П. Сенчина, А.С. Егоров.* Применение RGB-синтеза для комплексной интерпретации данных геофизических методов при изучении территорий, загрязненных нефтепродуктами ..... 75

*T.A. Mingaleva, S.V. Shakuro, N.P. Senchina, A.S. Egorov.* Application of RGB-synthesis for complex interpretation of geophysical data in the study of areas contaminated by oil products ..... 75

**НАУЧНАЯ СМЕНА**

**NEW SCIENTIFIC GENERATION**

**КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ**

**SHORT REPORT**

*В.В. Русинович, Л.Э. Русинович.* Автоматизация трассировки поверхностей разломов с помощью алгоритмов компьютерного зрения ..... 86

*V.V. Rusinovich, L.E. Rusinovich.* Fault surface tracing automation using computer vision algorithms ..... 86

**Экология**

**Ecology**

**КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ**

**SHORT REPORT**

*Ю.Н. Полтев, Т.Г. Коренева, В.Е. Марыжихин, И.В. Сырбу.* Содержание микроэлементов в мышечной ткани некоторых видов гидробионтов из охотоморских вод северо-восточного Сахалина ..... 95

*Y.N. Poltev, T.G. Koreneva, V.E. Maryzhikhin, I.V. Syrbu.* The content of trace elements in the muscle tissue of some species of aquatic organisms from the Sea of Okhotsk waters of Northeastern Sakhalin ..... 95

**От редакции**

**From the Editorial Board**

Правила оформления и публикации рукописей в журнале «Геосистемы переходных зон» ..... 103

Manuscript formatting and publication guidelines of the “Geosystems of Transition Zones” Journal ..... 103

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



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

УДК 551.21+550.3+523

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.1.005-024>  
<https://www.elibrary.ru/zgance>

## Влияние космических факторов на грязевулканическую деятельность Земли

Г. В. Устюгов\*, В. В. Ершов

\*E-mail: [gen.ustyugov@mail.ru](mailto:gen.ustyugov@mail.ru)

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

**Резюме.** В работе впервые проанализировано влияние разных космических факторов (гравитационное воздействие Луны и Солнца, солнечная активность, вращение Земли) на грязевулканическую активность. Анализ выполнен, главным образом, на примере грязевых вулканов Азербайджана, для которых существует наиболее полный каталог извержений (431 событие за почти 210 лет). Установлено, что активность грязевых вулканов может повышаться после сизигийных приливов, когда Земля располагается на одной прямой с Луной и Солнцем (их приливные силы в этом случае суммируются). Отклик грязевых вулканов на приливное воздействие Луны запаздывает на 5–10 сут. Установлено также, что число грязевулканических извержений распределено неравномерно в течение года с максимумами в марте–июне и сентябре–октябре. Наличие этих максимумов может быть обусловлено изменением расстояния между Солнцем и Землей и вариациями солнечных приливных сил в периоды перигелия и афелия. При этом отклик грязевых вулканов на приливное воздействие Солнца запаздывает на несколько месяцев и достаточно сильно растянут во времени. Существуют колебания грязевулканической активности с периодом 14–20 лет, которые не совпадают с циклами солнечной активности (с периодами 11 и 22 года), хотя некоторые исследователи говорят о связи между солнечной и грязевулканической активностями. Возможно, указанные колебания грязевулканической активности связаны с главной гармоникой нутации Земли (18.6 года). Показано, что максимальное количество грязевых вулканов на Земле приходится на широтные пояса 30–45° и 10–15° с.ш. (около 22 и 46 % от общего числа вулканов соответственно). В Южном полушарии наибольшее количество вулканов (около 3 % от общего числа) находится в границах 5–10° ю.ш.

**Ключевые слова:** грязевые вулканы, геодинамические процессы, космические факторы, Солнце, Луна, приливные силы, солнечная активность

## Influence of cosmic factors on mud volcanic activity of the Earth

Gennady V. Ustyugov\*, Valery V. Ershov

\*E-mail: [gen.ustyugov@mail.ru](mailto:gen.ustyugov@mail.ru)

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

**Abstract.** In this work, the influence of various cosmic factors (gravitational influence of the Moon and the Sun, solar activity, the Earth's rotation) on mud volcanic activity was analyzed for the first time. The analysis was carried out mainly on the example of mud volcanoes in Azerbaijan, for which there is the largest and most complete catalog of eruptions (431 events over almost 210 years). It has been found that the activity of mud volcanoes can increase after syzygial tides, when the Earth is in line with the Moon and the Sun (their tidal forces are summed up in this case). The response of mud volcanoes to the tidal influence of the Moon is delayed by 5–10 days. It is also found that the number of mud volcanic eruptions is distributed unevenly throughout the year with maximums in March–June and September–October. The presence of these maximums may be due to a change in the distance between the Sun and the Earth and variations in solar tidal forces during the periods of perihelion and aphelion. At the same time, the response of mud volcanoes to the tidal influence of the Sun is delayed by several months and is quite strongly extended in time. It was revealed that there are fluctuations in mud volcanic activity with a period of 14–20 years, which do not coincide with the cycles of solar activity (with periods of 11 and 22 years), although some researchers talk about a connection between solar and mud volcanic activity. It is possible that the indicated fluctuations in mud volcanic activity are related to the main harmonic of the Earth's

nutation (18.6 years). It is shown that the maximum number of mud volcanoes on the Earth falls on the latitudinal belts of 30–45° N and 10–15° N (about 22 and 46 % of the total number of volcanoes, respectively). In the southern hemisphere, the largest number of volcanoes (about 3 % of their total number) is located within the boundaries of 5–10° S.

**Keywords:** mud volcanoes, geodynamic processes, cosmic factors, Sun, Moon, tidal forces, solar activity

*Для цитирования:* Устюгов Г.В., Ершов В.В. Влияние космических факторов на грязевулканическую деятельность Земли. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 1, с. 5–24. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.1.005-024>; <https://www.elibrary.ru/zgance>

*For citation:* Ustyugov G.V., Ershov V.V. Influence of cosmic factors on mud volcanic activity of the Earth. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 1, pp. 5–24. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.1.005-024>; <https://www.elibrary.ru/zgance>

## Введение

Проблемы влияния внешних (космических) факторов на геодинамические процессы Земли – поиск статистических связей, анализ механизмов такого влияния, прогноз изменения активности разных природных явлений из-за космического воздействия – достаточно давно и широко обсуждаются в научном сообществе. Наибольшее возмущающее влияние на Землю и ее внутренние (эндогенные) процессы оказывают Солнце и Луна – единственный спутник нашей планеты. В роли факторов, влияющих на процессы в литосфере, могут выступать приливные силы Луны и Солнца [1–3], изменения солнечной активности и ускорение солнечного ветра [4–6], вариации скорости вращения Земли вокруг своей оси [7–9]. Воздействие космических факторов может проявляться, например, в изменениях сейсмической и вулканической активностей [10–15], интенсивности радоновых эманаций [16], уровня подземных вод; смещениях грунта [1, 17]; аномалиях спектра сейсмического шума над нефтегазовыми залежами [3].

Из анализа литературных данных по обсуждаемой проблематике можно сделать вывод, что природные флюидодинамические системы, обладающие возможностью достаточно быстрого переноса из глубин Земли на ее поверхность относительно маловязкого вещества, весьма чувствительны к космическим воздействиям. Одной из таких флюидных систем является грязевой вулкан, в процессе деятельности которого накопившееся в очаге вулкана вещество (газ, вода, осадочные породы) регулярно выбрасывается из земных недр на поверхность. Грязевой вулканизм относится к опасным геологическим явлениям, представляющим серьезную угрозу для инженерной инфраструктуры и природных экосистем, приводящим к негативным социально-экономическим и экологическим последствиям [18].

Можно предположить, что активность грязевых вулканов обусловлена влиянием космических факторов в той же степени, как это установлено к настоящему времени для землетрясений, магматических вулканов и прочих природных явлений. Вполне вероятно, что и механизмы таких космических воздействий могут быть схожими. В настоящее время до сих пор крайне мало работ, исследующих связь космических факторов с деятельностью грязевых вулканов [13, 19]. Мы надеемся, что наше исследование в определенной степени восполнит этот пробел.

Цель данной работы – выявление закономерностей в пространственно-временном распределении грязевулканической деятельности Земли и поиск возможных объяснений этих закономерностей с точки зрения влияния космических факторов.

## Материал (объект) и методы исследования

Для анализа закономерностей широтного распределения грязевых вулканов на Земле использовался атлас грязевых вулканов мира, который содержит данные о расположении 2508 грязевых вулканов и грязевулканических проявлений на нашей планете [20]. Указанный атлас включает в себя также достаточно подробный каталог извержений грязевых вулканов Азербайджана с 1810 по 2014 г., который в процессе работы был дополнен по 2018 г. данными из работ других исследователей [21–22]. Дополненный каталог использовался для поиска возможных воздействий космических тел – Луны и Солнца – на активность грязевых вулканов. Азербайджан не имеет себе равных в мире по количеству наземных и морских грязевых вулканов – свыше 350 объектов. В каталоге собраны сведения о 431 извержении, которые за почти 210 лет произошли на 93 грязевых вулканах Азербайджана. На сегодня

нышний день это наиболее объемный каталог извержений; для других грязевулканических провинций подобные сведения гораздо более скудные. Из всех зафиксированных событий только для 239 случаев кроме года указан еще и месяц извержения. Полные даты, включающие не только месяц, но и день события, известны для 183 извержений. Это имеет значение в нашем исследовании, так как для одних статистических расчетов достаточно месяца события, а для других требуются полные даты извержений. Ниже это разъяснено более подробно.

Возраст Луны (время в днях, отсчитываемое с момента фазы новолуния) определяли с помощью онлайн-калькулятора, в котором применяется алгоритм Стефана Шмитта [23]. Расчетное положение Луны основано на числе юлианских дней, которое соответствует интересующей календарной дате. Для каждой даты расчеты онлайн-калькулятора приводятся на 00:00 ч по гринвичскому времени.

При анализе возможного влияния солнечной активности на деятельность грязевых вулканов Азербайджана не учитывались 14 случаев, когда один и тот же грязевой вулкан извергался два раза в течение одного года. Статистика интервалов времени между двумя последовательными извержениями показала, что подавляющее большинство грязевых вулканов извергается не чаще одного раза в несколько лет [24]. Сложно представить, что вулкан за несколько месяцев смог бы накопить большой объем вещества и энергии, необходимый для очередного извержения. Поэтому мы полагаем, что каждый такой случай правильнее считать длительным двухактным извержением, а не двумя отдельными извержениями. Таким образом каталог, используемый для расчета ежегодного числа грязевулканических извержений, содержал 417 событий. Данные о солнечной активности за период с 1946 по 2018 г. взяты из онлайн-каталога всемирного центра данных SILSO (Королевская обсерватория Бельгии) [25].

### **Гравитационное воздействие Луны на активность грязевых вулканов**

Единственным естественным спутником Земли и ближайшим к ней небесным телом является Луна, которая выступает для Зем-

ли наиболее сильным источником приливных возмущений в широком спектре частот [26–29]. Расположение Луны относительно Земли и Солнца определяет лунные фазы (новолуние, полнолуние, квадратуры/четверти) – периодическое изменение вида освещенной части поверхности Луны на земном небе. Промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми фазами Луны называется синодическим месяцем, продолжительность которого непостоянна и составляет в среднем примерно 29.5 сут.

Приливные силы воздействуют на Землю, растягивая нашу планету вдоль линии, совпадающей с направлением на возмущающее тело (в данном случае на Луну). В направлении, перпендикулярном указанной линии, происходит сжатие земного шара. Таким образом, возмущенное тело (Земля) и его оболочки (если они поддаются деформации) под действием приливных сил могут принимать форму, близкую к вытянутому эллипсоиду, т.е. образуются так называемые приливные выступы (горбы). Вращение Земли относительно Луны происходит с периодом около 24 ч 50 мин. За это время по земной поверхности проходят два приливных горба, т.е. интервал между ними составляет около 12 ч 25 мин (так называемая приливая волна  $M_2$ ). Все наблюдаемые приливные явления можно разделить на три группы: полусуточные, суточные и долгопериодические [27, 29]. На Земле наблюдаются различные приливные явления: морские приливы/отливы, деформации земной коры, колебания уровня подземных вод, изменения угловой скорости вращения Земли, вариации силы тяжести, газовых эманаций, микросейсмичности и др. Рассмотрим подробнее некоторые из этих приливных явлений. Предпочтение отдадим тем явлениям, в которых, по нашему мнению, могут действовать механизмы, схожие с влиянием лунных приливов на грязевой вулканизм.

Деформации земной коры, вызванные приливными силами Луны, приводят к изменениям напряженного состояния и объемным расширениям–сжатиям Земли [16, 30]. Наиболее заметно это проявляется в зонах ослабления прочности среды – разломах и крупных трещинах. Во время лунных приливов происходит расширение объема земной коры, во время отливов наблюдается обратный

эффект – сжатие. При расширении объема увеличиваются пористость и проницаемость земной среды, и, наоборот, при сжатии они уменьшаются. Регулярная смена приливных деформаций (расширения и сжатия) в земной коре может приводить к вариациям уровня подземных вод. При сжатии (во время отливов) уровень повышается под действием избыточного давления, а при расширении (во время приливов) снижается, т.е. уровень подземных вод изменяется в противофазе с приливными силами [30].

Максимумы интенсивности спектра вариаций уровня подземных вод (единицы и десятки миллиметров) приходится на периоды около 12 и 24 ч, а также примерно 12–15 сут, что хорошо совпадает с периодами соответствующих лунных приливных волн [1, 16, 17, 31]. При этом уровни подземных вод в областях Земли, оказавшихся в зоне приливного влияния, не всегда изменяются синхронно. Например, на двух исследовательских полигонах при воздействии одних и тех же приливных волн изменения уровня воды происходили с запаздыванием либо опережением (от нескольких дней до месяца) относительно друг друга в зависимости от периодов приливных волн [1]. Амплитуды колебаний уровней на этих полигонах также различаются для разных приливных гармоник. Эти расхождения предположительно связывают с разными фильтрационными параметрами и строением водонасыщенных коллекторов.

Максимальные вариации в смещении грунта (десятки и сотни миллиметров) приходится на полусуточные и суточные приливы [1, 17]. Как и в случае с изменениями уровня подземных вод, смещение грунта в ответ на приливные силы не происходит одновременно на тех участках Земли, которые попали в зону приливного выступа [1]. Смещение грунта на таких участках может различаться во времени относительно друг друга (на 1–2 сут для двух разных полигонов). Могут также различаться между собой и амплитуды смещения на разных участках (примерно в полтора раза для рассматриваемого частного случая) [1].

Также известно, что приливные силы могут оказывать влияние на объем нефти, поступающей из недр во время нефтедобычи [32, 33, 34]. С помощью системы автоматической регистрации (дискретность из-

мерений – 1 ч), развернутой в скважинах Ромашкинского месторождения (Татарстан), установлено, что ежесуточные вариации добычи нефти составляют около 25 % от среднего уровня. При этом на полученных временных рядах прослеживаются два максимума и два минимума добычи в течение суток с периодичностью 12 и 24 ч.

Проанализирована связь объема добываемой нефти с основными фазами Луны (новолуние, полнолуние, первая и четвертая четверти). Для этих фаз были рассчитаны коэффициенты корреляции между средним суточным ходом объемной приливной деформации и средним суточным ходом добываемого флюида. Наибольшие коэффициенты корреляции (от 0.30 до 0.82) наблюдаются для фаз новолуния и полнолуния, т.е. для интервалов времени, когда амплитуда лунных приливов максимальна. Предполагается, что под воздействием приливных волн трещины земной коры периодически расширяются и сжимаются, выступая тем самым в роли огромного «гравитационного насоса». При раскрытии трещин (во время приливов) давление в них снижается и создается относительный вакуум, который вытягивает нефть из пор и микротрещин пласта в более крупные трещины. Благодаря этому происходит отток части жидкости из скважины в пласт, и, как следствие, уровень жидкости в скважине падает. При сжатии трещин (во время отливов) давление в них повышается, и потоки флюида вместе с извлеченной из пор и микротрещин нефтью устремляются по относительно крупным трещинам в сторону понижения давления (к добывающим скважинам). На основе изложенной концепции был предложен способ увеличения добычи нефти, в основе которого лежат регулируемая по объемам циклическая закачка воды в нагнетательные скважины и вибровоздействия на нефтяной пласт, согласованные по времени с земными приливами.

Изменения трещиноватости в литосфере Земли, вызванные лунными гравитационными силами, могут способствовать изменениям интенсивности радоновых эманацій [16]. Вариации объемной активности подпочвенного радона наблюдаются с периодичностью примерно 12 и 24 ч, а также 14 сут. Указанные периодичности в интенсивности радоновых

эманаций наблюдаются повсеместно, причем наиболее ярко – в зонах влияния крупных тектонических структур. Максимумы коэффициента корреляции между вариациями объемной активности подпочвенного радона и приливных сил достигаются при запаздывании реакции эманационного поля радона относительно приливных деформаций примерно на 3–4 ч для разных участков земной коры.

Чередующиеся фазы растяжения–сжатия пород, обусловленные приливными силами, влияют на процессы релаксации (сброса) механических напряжений, накопленных в недрах Земли. В частности, разуплотнение среды облегчает движение ранее сжатых блоков земной коры, и это способствует сбросам накопленных напряжений, что сопровождается микросейсмическими импульсами. Таким образом, лунные приливы способны вызывать изменения фоновой микросейсмичности [16]. В различных частотных диапазонах сейсмических колебаний наблюдаются разные периодичности – от нескольких часов до нескольких дней и месяцев (около 12 и 24 ч, около 14 и 28 сут и др.). Повсеместной зависимости между амплитудой микросейсмического фона и величиной приливных сил не прослеживается. Исключения составляют отдельные частотные интервалы микросейсм, которые различны на разных участках земной коры. Отмечается также, что разломные зоны отличаются более высокой реакцией микросейсмического фона на приливные деформации по сравнению с срединными участками структурных блоков. Это объясняется пониженной жесткостью горных пород в разломных зонах.

Заметим, что некоторые исследователи основное влияние на земную кору приписывают именно резонансам различных гравитирующих факторов: расстояние Земля–Луна, фазы Луны, колебания барицентра системы Земля–Луна [3]. Считается, что такие резонансы приливных факторов разного типа существенно усиливают влияние на различные геодинамические процессы, создавая аномальные напряжения в земной коре. Они могут выступать триггером для сильных землетрясений ( $M > 5.0$ ), усиливать эманацию радона, обуславливать изменения структуры естественно импульсного электромагнитного поля Земли, нарушать работу технических сооружений

(например, плотин ГЭС, нефтегазовых трубопроводов и др.). Резонансы полумесячных (14–15 дней) приливов в зонах скопления нефти и газа способствуют возникновению стоячих волн с частотами от долей до нескольких герц в зависимости от геометрии и флюидонасыщенности залежи. Регистрируя на поверхности такие низкочастотные колебания, можно определить расположение залежи. На этом принципе была разработана флюидная резонансная сейсморазведка – технология поиска в геологической среде нефтегазовых залежей на основе регистрации низкочастотными сейсмоприемниками вынужденных колебаний флюидных систем под влиянием энергии резонансов гравитационных приливов [3].

Как известно, приливные явления на Земле вызваны не только Луной, но и Солнцем. Конечно, наибольшую роль в генерации земных приливов играет Луна, чье приливное влияние примерно в 2.17 раза превышает солнечное [29]. Тем не менее Солнце тоже вносит свой значительный вклад, который не всегда можно игнорировать. Высокочастотные гармоники, обусловленные приливными силами Солнца, имеют периоды, близкие к периодам лунных приливных гармоник. Соответственно, такие лунные и солнечные приливные волны практически неразличимы на практике и фиксируются в природных процессах обобщенно – как полусуточная и суточная гармоники. Однако необходимо учитывать случаи, когда лунные и солнечные приливы усиливают или ослабляют друг друга в зависимости от положения возмущающих тел в космическом пространстве [26]. Сильнейшие приливы – сизигийные – происходят в новолуние и полнолуние, когда Земля располагается на одной прямой с Луной и Солнцем, т.е. их приливные силы объединяются. Во время первой и последней лунных четвертей направления с Земли на Луну и Солнце составляют угол, равный  $90^\circ$ , т.е. приливообразующие силы Луны и Солнца действуют под прямым углом друг к другу, взаимно ослабляя друг друга. Такие приливы называются квадратурными.

Из описанного выше следует, в частности, что флюидодинамические системы демонстрируют хороший отклик в виде различных вариаций их деятельности на воздействие гравитационных сил Луны. Тогда вполне ожидаемо,

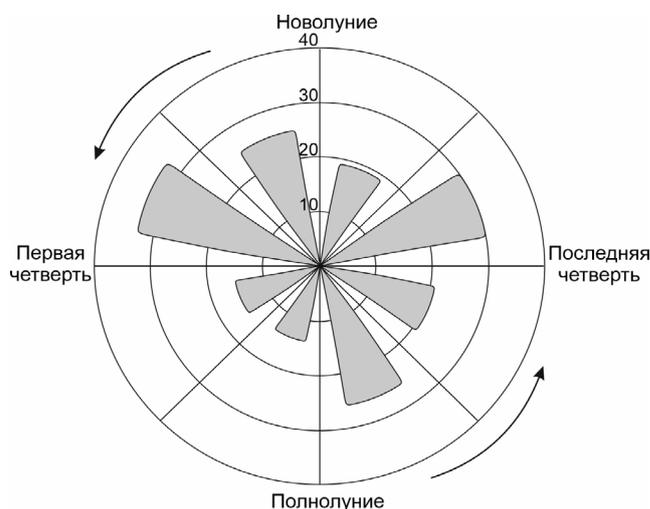
что лунные приливы могут также влиять на изменения активности грязевых вулканов Земли, которые являются одной из разновидностей флюидодинамических систем.

В данном исследовании мы не могли осуществить анализ влияния приливных эффектов полусуточной и суточной гармоник на деятельность грязевых вулканов Азербайджана. Во-первых, в каталоге извержений грязевых вулканов Азербайджана с 1810 по 2018 г. мало данных, указывающих не только год, месяц и день извержения, но и конкретное время события до часов и минут. Во-вторых, длительность грязевулканического извержения зачастую составляет несколько часов, т.е. вполне сопоставима с периодом рассматриваемых гармоник. В некоторых же случаях продолжительность извержений составляла несколько суток. Например, извержение грязевого вулкана Бахар, начавшееся 4 июня 1885 г., продолжалось 3 сут; вулкана Шихзарли, начавшееся 13 февраля 1902 г., – 2 сут; извержение Гарасу, начавшееся 28 марта 1977 г., длилось почти неделю [20]. Поэтому для имеющегося каталога извержений грязевых вулканов Азербайджана мы можем анализировать приливные воздействия с периодичностью порядка недель и месяцев.

Анализ данных показывает, что активность грязевых вулканов Азербайджана распределена неравномерно в течение лунного месяца (рис. 1). Количество извержений увеличивается в период от фазы новолуния до первой четверти, после чего наблюдается отчетливое уменьшение их до фазы полнолуния. Далее в период от полнолуния до последней четверти вновь происходит усиление активности грязевых вулканов. А после этого идет очередное снижение количества извержений перед предстоящим новолунием. Наблюдается некоторая закономерность, когда активность грязевых вулканов усиливается после сильных сизигийных приливов в фазах новолуния и полнолуния. После слабых квадратурных приливов до очередных сизигийных приливов отмечается спад грязевулканической активности. Установлено, что в период от новолуния до первой четверти (примерно 7.4 сут) происходит 58 извержений (31.7 % от общего числа событий). После первой четверти до полнолуния (также около 7.4 сут) количество извержений существенно меньше – 29 случаев (15.8 %).

От полнолуния и почти до новолуния (около 11 сут) имеет место период повышенной грязевулканической активности – 77 извержений (42.1 %). И непосредственно перед очередным новолунием (в течение примерно 3.7 сут) грязевулканическая активность снижена – 19 извержений (10.4 %).

Для проверки достоверности выявленной неравномерности в распределении извержений грязевых вулканов по разным фазам Луны было проведено статистическое моделирование. С помощью генератора случайных чисел для равномерно распределенной случайной величины на отрезке от 1 до 8 (по числу фаз Луны) мы получали целочисленный массив, состоящий из 183 элементов (по числу извержений с полными датами). Для 2000 реализаций этого эксперимента вероятность того, что на какую-либо одну фазу Луны приходится меньше 15 извержений, составила около 18 %, вероятность того, что на какую-либо одну фазу Луны приходится больше 32 извержений, – около 14 %, а вероятность того, что в каких-либо разных фазах Луны одновременно будет меньше 15 и больше 32 извержений, – всего около 4 %. Таким образом, наблюдаемый нами в природе случай, когда перед первой четвертью зафиксировано 33 из-



**Рис. 1.** Активность грязевых вулканов Азербайджана в течение лунного (синодического) месяца за период 1827–2014 гг. Вертикальная ось с нумерацией и серые лепестки показывают количество извержений в разных фазах Луны. Стрелки указывают направление движения Луны вокруг Земли.

**Fig. 1.** Petal diagram of the activity of mud volcanoes in Azerbaijan during the lunar (synodic) month for the period of 1827–2014. The vertical axis with numbering and gray petals show the number of eruptions in different phases of the Moon. The arrows indicate the direction of the Moon's motion around the Earth.

вержения, а перед полнолунием – 14, с большой вероятностью можно считать не соответствующим равномерному распределению. Другими словами, существует статистически значимая неравномерность в распределении извержений грязевых вулканов по разным фазам Луны.

Можно предположить следующий механизм, объясняющий влияние лунно-солнечных приливов на вариации грязевулканической активности. Во время новолуния и полнолуния Земля подвергается воздействию сизигийных приливов, благодаря которым в приливных горбах планеты происходят наиболее сильные деформации земной коры. Это, в том числе, может приводить к изменению проницаемости земной коры и пластового давления, способствуя более интенсивному подъему грязевулканического вещества из недр на поверхность. Если основной причиной неравномерности грязевулканической активности являются сизигийные приливы, то можно говорить о том, что отклик грязевых вулканов на приливное воздействие Луны запаздывает на 5–10 сут. Другими словами, непосредственно до самого момента извержения должно пройти некоторое время, которое займут процессы подготовки этого извержения. В частности, необходимо время для подъема к поверхности грязевулканического вещества из очагов, глубина залегания которых составляет несколько километров [35]. Похожие примеры, связанные с запаздыванием отклика на приливы в изменениях уровня подземных вод, эманациях радона и смещениях грунта, были описаны нами выше. Скорее всего, время запаздывания индивидуально для каждого грязевого вулкана в зависимости от его строения, состава флюидов, проницаемости флюидоподводящих каналов и др.

### **Гравитационное воздействие Солнца на активность грязевых вулканов**

У некоторых природных явлений Земли (например, землетрясений или извержений магматических вулканов) прослеживаются закономерности в росте либо спаде их активности в течение календарного года. Так, в работе [7] отмечается внутригодовая периодичность возникновения землетрясений. Наибольшая сейсмическая активность в Тихоокеанском регионе наблюдается в декабре. Второй – более

слабый пик – приходится на май, а абсолютный минимум отмечается в апреле. Эту закономерность связывают с периодическими изменениями расстояния между Землей и Солнцем [7]. Наиболее близко к Солнцу наша планета находится в перигелии, который приходится на 2–5 января [28]. Афелий, когда Земля и Солнце находятся на максимальном расстоянии друг от друга, приходится на 1–5 июля. Расстояние между Землей и Солнцем в перигелии изменяется примерно на 3 % по сравнению с афелием, а приливная сила увеличивается на 6.4 % [7]. Изменения скорости движения Земли по эклиптике сопровождаются также изменениями скорости вращения Земли вокруг своей оси. Увеличение приливных сил Солнца приводит к росту напряжений и деформаций в земной коре. Механическая энергия накапливается в готовящихся очагах землетрясений и периодически высвобождается в виде сейсмической активности. В работе [7] также отмечается, что неглубокие сейсмические события (<80 км) имеют статистически значимые вариации распределения максимумов землетрясений в течение года, тогда как глубокие землетрясения (>80 км) распределены по месяцам в течение года равномерно. Предполагается, что внешние (космические) факторы являются триггером только для неглубоких землетрясений, т.е. глубокие очаги не реагируют на эти факторы.

Изменения расстояния между Солнцем и Землей и вариации солнечных приливных сил в периоды перигелия и афелия могут также влиять на активность магматических вулканов [12]. Количество вулканических извержений в перигелии и афелии в несколько раз превышает среднегодовые показатели. Предполагается, что эти два периода времени характеризуются максимальными напряжениями в земной коре.

Анализ геодинамической нестабильности Земли в работе [2] показывает, что в период с августа по март наблюдается повышенное количество техногенных катастроф и крупных аварий. Отмечается, что к этому же периоду времени приурочены и крупные природные катастрофы. В перигелии Земля движется по эклиптике быстрее, чем в афелии. Повышение скорости движения планеты по орбите компенсируется уменьшением угловой скорости ее вращения. Это влечет за собой увеличение

длительности суток в период с августа по март, что оказывает существенное влияние на геодинамический режим Земли. Сделан вывод о том, что с августа одного года по март следующего происходит увеличение (расширение) Земли, которое сопровождается раскрытием крупных и мелких трещин в земной коре, ростом количества и масштабов землетрясений, повышением вулканической активности. В период с марта по август происходит обратный процесс: трещины закрываются, снижается тектоническая активность, уменьшаются число и сила землетрясений и вулканических извержений [2].

Согласно имеющимся данным об извержениях грязевых вулканов Азербайджана, на каждый месяц года в среднем должно было бы приходиться около 20 событий. Проведенный нами анализ показал, что извержения распределены неравномерно и в течение года имеются всплески грязевулканической активности (рис. 2). В отличие от описанных выше случаев с землетрясениями и магматическими вулканами, привязка к перигелию и афелию здесь не столь четкая. Установленную нами неравномерность распределения грязевулканических извержений по месяцам можно попытаться объяснить следующим образом. С некоторой долей условности можно выделить два периода повышенной грязевулканической активности: март–июнь и сентябрь–октябрь.

Наличие первого из этих периодов может быть обусловлено реакцией грязевых вулканов на прохождение Земли перигелия. Этот отклик характеризуется определенным запаздыванием и довольно сильно растянут во времени. Мы уже говорили выше, что для подготовки грязевулканического извержения необходимо некоторое время. Относительно высокое количество извержений приходится на март – 26 событий (10.9 % от общего числа). Абсолютный максимум приходится на июнь – 33 события (13.8 %). Исходя из этого можно говорить о том, что время задержки отклика грязевых вулканов на максимальное воздействие гравитационных сил Солнца, которое наблюдается в перигелии, составляет несколько месяцев. Второй период активности может быть обусловлен реакцией грязевых вулканов на прохождение Земли афелия. Эта реакция менее выражена: на сентябрь приходится

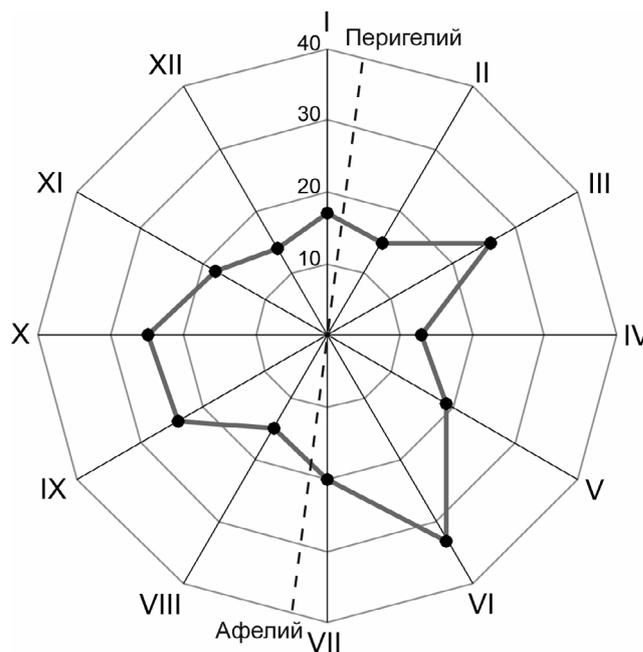


Рис. 2. Активность грязевых вулканов Азербайджана в течение года за период 1827–2014 гг. Вертикальная ось с нумерацией и черные точки, соединенные сплошной линией, показывают количество извержений в каждом месяце.

Fig. 2. Activity of mud volcanoes in Azerbaijan during the year for the period of 1827–2014. The vertical axis with numbering and black dots connected by a solid line show the number of eruptions in each month.

24 события (10 %), на октябрь – 25 (10.5 %). В афелии приливная сила Солнца минимальна. В то же время при переходе через афелий у нашей планеты изменяется состояние механического движения – орбитальная скорость начинает увеличиваться, а угловая скорость уменьшаться. Поэтому грязевулканическая активность усиливается, но относительно слабо. После этого в течение нескольких месяцев извержения грязевых вулканов относительно редки. В частности, на декабрь приходится всего лишь 14 событий (5.9 %).

Для проверки достоверности выявленной неравномерности в распределении извержений грязевых вулканов по месяцам года проведено статистическое моделирование. С помощью генератора случайных чисел для равномерно распределенной случайной величины на отрезке от 1 до 12 (по количеству месяцев в году) мы получали целочисленный массив, состоящий из 239 элементов (по числу извержений с датами, содержащими год и месяц). Для 2000 реализаций этого эксперимента вероятность того, что на какой-либо один месяц в году приходилось меньше 14 извержений, составила

около 56 %, вероятность того, что на какой-либо один месяц приходилось больше 32 извержений, – примерно 4 %, а вероятность того, что в какие-либо месяцы одновременно будет меньше 14 и больше 32 извержений, – всего около 3 %. Таким образом, с большой вероятностью можно говорить о том, что наблюдаемый нами в природе случай, когда в июне зафиксировано 32 извержения, а в декабре – 14, не соответствует равномерному распределению. Следовательно, обнаруженную нами неравномерность в распределении извержений грязевых вулканов по месяцам года можно считать статистически значимой.

### **Влияние солнечной активности на грязевулканическую деятельность**

Солнце активно воздействует на нашу планету, являясь источником электромагнитного излучения, плазмы, солнечных космических лучей, быстрых электронов и т.д. [27]. Число солнечных пятен на поверхности Солнца (числа Вольфа) характеризует состояние солнечной активности – комплекса явлений и процессов, связанных с образованием и распадом в солнечной атмосфере сильных магнитных полей. В начале солнечного цикла пятна возникают на средних широтах солнечного шара ( $\pm 30\text{--}40^\circ$ ), далее они смещаются к экватору с севера и юга. Солнечные пятна достигают максимального числа на широтах около  $\pm 10\text{--}20^\circ$ , потом их число снижается. Продвижение солнечных пятен к экватору занимает примерно 11 лет (цикл Швабе). По окончании каждого такого 11-летнего цикла магнитное поле у полюсов Солнца изменяет свою полярность. Следовательно, магнитный цикл Солнца составляет около 22 лет (цикл Хейла).

Возможность влияния солнечной активности на геодинамические процессы Земли обсуждается многими исследователями. При этом такая возможность обосновывается по большей части не физическими принципами, а результатами статистического анализа. Физические механизмы обсуждаемой связи привлекаются исследователями позже – в попытках объяснения обнаруженной статистической закономерности. В работе [4] говорится, что в течение последних нескольких столетий прослеживаются два стабильных цикла в эруптивной деятельности магмати-

ческих вулканов – с периодичностью около 22 лет и 44–51 год, что кратно периодичности солнечных циклов. О цикличности извержений магматических вулканов Камчатки и Курильских островов говорится и в работе [36], где выделено несколько разных циклов – в том числе с периодами, примерно равными 11 (10–13 лет) и 22 (22–25 лет) годам. Наличие таких периодичностей позволило предположить связь вулканической и солнечной активности. В работе [13] также отмечают периодичности извержений магматических вулканов 10–12 лет и 22 года, которые хорошо сходятся с 11- и 22-летними циклами солнечной активности. Указано, что магматические вулканы необходимо разделять по геодинамическому типу на вулканы зон сжатия (субдукции) и зон расширения (спрединга, рифта). Деятельность субдукционных вулканов усиливается во время повышенной солнечной активности, тогда как деятельность рифтовых вулканов в это время, наоборот, ослабевает, возрастая во время пониженной солнечной активности.

В работе [13] предложен следующий механизм связи вулканической и солнечной активности. Повышение солнечной активности порождает ряд процессов, которые приводят к нагреву и тепловому расширению мантии в астеносфере, увеличению ее пластичности и ускорению конвективных потоков. Это приводит к усилению процесса спрединга и расширения литосферы Земли. При снижении солнечной активности происходит обратное – остывание мантии и сжатие Земли, которое сопровождается усилением процесса субдукции. Циклы сжатия земной литосферы (субдукции) сменяются циклами расширения (спрединга). От повышения солнечной активности до усиления спрединга проходит не менее 5–7 лет из-за времени протекания некоторых процессов (нагрев мантии и т.д.). Это приводит к запаздыванию отклика геодинамических процессов Земли на половину периода относительно 11-летнего цикла активности Солнца. Поэтому получается так, что процесс спрединга усиливается при снижении солнечной активности, а процесс субдукции – при ее росте. Соответственно, активность магматических вулканов усиливается либо ослабевает совместно с процессами в зонах субдукции или спрединга, к которым они приурочены.

Многие исследователи говорят также о влиянии солнечной активности на сейсмичность (и микросейсмический фон) Земли [5, 6, 10, 11, 13, 15, 37]. В частности, в работе [13] выделяют гармоники с периодами 10–11 лет и 18–22 года для сильных землетрясений  $M \geq 7$ , а также 9–12 лет и 19–27 лет для землетрясений  $M < 7$ . Данные периоды довольно хорошо согласуются с 11-летними и 22-летними циклами солнечной активности. В работе [5] также сообщается о зависимости сейсмичности Земли от фаз 11-летнего цикла солнечной активности. Максимумы сильных землетрясений  $M \geq 7$  совпадают с максимумами солнечной активности, а также с фазами ее спада – примерно на третий год после максимального количества солнечных пятен. После минимальной солнечной активности прослеживается этап относительного сейсмического затишья.

Один из механизмов отклика сейсмичности на солнечную активность связывают с общепланетарными атмосферными процессами [13]. Рост солнечной активности возмущает квазистационарное состояние атмосферы Земли. Из-за этого атмосферные массы перераспределяются по поверхности планеты, перемещая центр тяжести Земля–атмосфера, что приводит к нарушению фигуры Земли и, в конечном итоге, к разрядке напряжений в земных недрах.

Другой механизм предлагается в работе [15], где также отмечается значительное увеличение числа землетрясений после максимума солнечной активности (при этом эффект зависит еще и от местоположения конкретной тектонической плиты). Солнечный ветер (непрерывный поток плазмы солнечного происхождения), скорость которого увеличивается с ростом пятен на Солнце, оказывает давление на магнитосферу Земли, деформируя и сжимая ее (иногда на четыре радиуса Земли). Это сжатие вызывает землетрясения в районах определенных тектонических плит. В периоды минимумов солнечной активности давление солнечного ветра уменьшается, магнитосфера Земли расширяется, и теперь землетрясения будут чаще в районах других тектонических плит. В работе [5] также говорится о прямой связи усиления сейсмической активности с ростом скорости солнечного ветра, вызывающего возмущения в геомагнитной среде и атмосферной циркуляции Земли.

В качестве возможных механизмов влияния солнечной активности (обуславливающей возмущение магнитосферы Земли) на деформационные поля в земной коре предлагаются следующие: изменение величины и конфигурации теллурических токов; магнитострикционный эффект; обратный пьезоэлектрический эффект; действие пондеромоторных сил [6, 10, 11].

В работе [6] обсуждается механизм преобразования электромагнитной энергии в колебательную в трещиновато-пористой среде в присутствии электропроводящих флюидов. При расширении и сжатии трещин происходит резкое изменение электрического сопротивления жидкости в токовом канале. В диэлектрической среде вокруг токового канала будет наводиться противоЭДС с высокой напряженностью электромагнитного поля. Наведенное поле возбуждает механические колебания стенок трещины, которые стимулируют рост трещин во вмещающей среде. Одним из следствий этих динамических эффектов является более интенсивное поступление воды к вершинам трещин, что оказывает существенное влияние на их дальнейший рост.

В работах [10, 11] при объяснении результатов натурального эксперимента предполагается, что наиболее вероятным механизмом преобразования энергии между геомагнитными импульсами и сейсмическими фоновыми колебаниями являются наведенные электрические токи, которые концентрируются в обводненных (т.е. хорошо проводящих) зонах. При этом максимум наведенных в среде электрических токов определяется количеством проводящего флюида и его конкретными электрохимическими свойствами. Отметим здесь, что проводимость (минерализация) грязевулканических вод в разных вулканах может различаться на два порядка [38].

Исследований, в которых рассматривается корреляция между активностью Солнца и деятельностью грязевых вулканов Земли, мало. В работе [19] на основе данных ежедневных замеров дебита грязи из грифонов грязевого вулкана Ахтала (г. Гурджаани, Грузия) за 1951–1977 гг. выявлены годовая, 4- и 11-летняя периодичности изменений активности вулкана. Сообщается, что в целом повышенная активность грязевого вулкана Ахтала при-

урочена к периодам минимальной солнечной активности. Отмечается, что всплески грязевулканической активности, наблюдаемые в 1954 и начале 1955 г., в конце 1961 и 1962 гг., а также в конце 1974 и 1975 гг., произошли перед или после точки перехода солнечной активности от максимума к минимуму (или наоборот). В работе [13] говорится о единых циклах грязевулканических извержений и солнечной активности с периодами 5–6 лет, 8–9, 10–12, 14–15 лет и 22 года. При этом в числах Вольфа наиболее ярко выделяются 11-летние циклы, а в активизации грязевых вулканов – 9- и 22-летние циклы. Отмечается также, что грязевые вулканы расположены в зонах Заварицкого–Беньюфа и, следовательно, отражают деятельность процессов субдукции. Поэтому активизация грязевых вулканов синхронна с активизацией субдукционных магматических вулканов.

В работе [36] в эруптивной деятельности грязевых вулканов юго-восточного Кавказа и прилегающих районов Каспийского моря выделено несколько разных циклов: годовые (1–2), реже 3 года), 11-летние (10–13 лет), 22-летние (22–25 лет), полувековые (47–53 года), 60-летние (59–66 лет) и 80-летние (80–86 лет). Отмечается, что малые годовые периоды отражают в большей степени самостоятельную (естественную) вариабельность грязевулканической деятельности. Указано, что периодам усиления солнечной активности отвечают периоды ослабления грязевулканической активности, и наоборот.

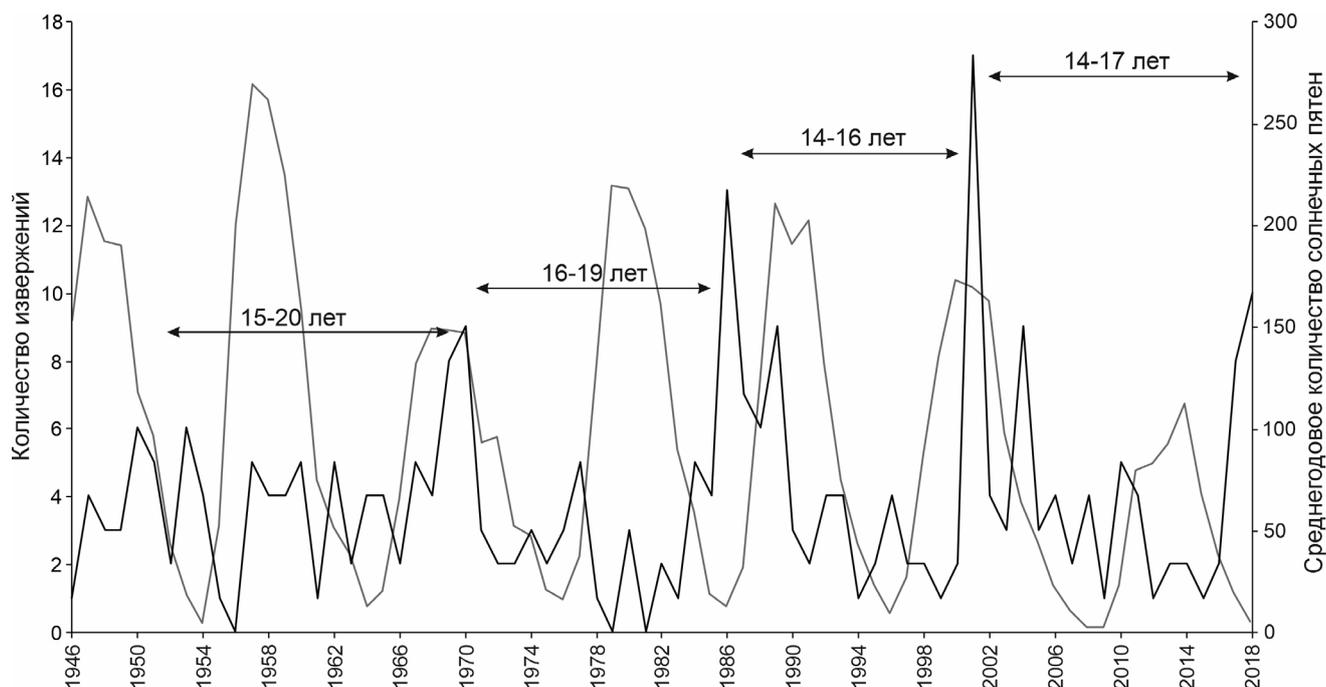
В работе [36] подчеркивается, что у вулканов, располагающихся в разных регионах нашей планеты на больших расстояниях друг от друга, зачастую прослеживаются схожие периодичности активизации. Объяснение этому основано на том, что вулканы (как грязевые, так и магматические) повсеместно связаны с разломами, причем вулканы особо активны в зонах пересечения разломов разных направлений. Периодичность вулканических извержений является неким отражением соответствующей цикличности в создании благоприятных условий для проницаемости и поднятия вулканических масс на поверхность Земли. В свою очередь, это демонстрирует периодичность тектонических движений блоков по разломам. Разносторонние перемещения

блоков относительно разломов создают зоны проницаемости с транзитными путями, облегчающими перемещение грязевулканического и магматического материала с больших глубин на земную поверхность. Периодичность таких тектонических подвижек в земной коре коррелирует с взаимодействием земных и космических факторов, влияющих на эволюцию (развитие) планеты.

Из анализа работ разных исследователей видно, что их выводы в отношении связи между солнечной активностью и грязевулканической деятельностью могут расходиться друг с другом. В частности, одни исследователи утверждают, что 11-летние циклы солнечной и грязевулканической активности происходят синфазно [13], другие говорят, что они находятся в противофазе [36]. Отметим, что эти исследователи использовали данные за разные интервалы времени: 1850–2000 [13] и 1800–1960 гг. [36].

Нами выполнен анализ возможной связи между солнечной активностью и деятельностью грязевых вулканов Азербайджана на временном интервале 1946–2018 гг. Можно утверждать, что имеющийся каталог грязевулканических извержений Азербайджана за 1810–2018 гг. является неполным, т.е. не все произошедшие извержения были зафиксированы. По нашим оценкам, полнота этого каталога составляет около 52 % [18]. При этом степень полноты каталога различна для разных интервалов времени, границы которых можно приближенно выделить на основе среднегодового количества извержений [24]. Число пропусков извержений заметно больше до 1946 г., что мы объясняем отсутствием в то время каких-либо систематических наблюдений за грязевыми вулканами. Поэтому для нашего анализа более корректно использовать интервал времени с 1946 по 2018 г., для которого имеются максимально точные и надежные данные об извержениях.

В качестве анализа эруптивной деятельности грязевых вулканов Азербайджана были построены графики ежегодного числа извержений в период с 1946 по 2018 г. и среднегодового количества солнечных пятен за аналогичный период времени (рис. 3). Видно, что в деятельности грязевых вулканов выделяются циклы, период которых находится в интерва-



**Рис. 3.** Среднегодовое количество солнечных пятен [25] – серая линия. Ежегодное количество извержений грязевых вулканов Азербайджана [20–22] – черная линия.

**Fig. 3.** The average annual number of sunspots [25] – gray line. The annual number of mud volcanic eruptions in Azerbaijan [20–22] – black line.

ле от 14 до 20 лет. Эти циклы мы не можем напрямую сопоставить с 11- или 22-летними циклами солнечной активности. Поскольку цикл грязевулканической активности приблизительно в полтора раза длиннее 11-летнего цикла солнечной активности, то максимумы количества извержений приходятся как на максимумы, так и на минимумы чисел Вольфа. Возможно, цикличность извержений грязевых вулканов Азербайджана лучше сопоставить с нутацией Земли, поскольку периодичность нутационных колебаний близка к периодичности грязевулканических извержений. Нутацией называется покачивание оси вращения Земли, которое обусловлено гравитационным воздействием и положением в пространстве окружающих Землю космических тел (в первую очередь Солнца и Луны), а также внутренними процессами самой планеты [26]. Главная нутационная гармоника имеет период 18.6 года. Другие основные гармоники нутации имеют периоды 13.7 сут, 27.6 сут, 6 мес., 1 год.

### Широтное распределение грязевых вулканов на Земле

На Земле существуют области (пояса), характеризующиеся наиболее активным прояв-

лением геодинамических процессов. Зачастую такие зоны выделяют вблизи так называемых «критических параллелей (широт)»  $\pm 35^\circ$  [7–9, 39]. Предполагается, что одной из причин проявления высокой эндогенной активности в определенных зонах планеты – широтных поясах – является максимальная концентрация там деформаций земного эллипсоида из-за чередования фаз растяжения и сжатия пород и, как следствие, возникающих дизъюнктивных деформаций (трещины, разрывы, разломы) земной коры. Данные процессы обусловлены гравитационной и центробежной силами Земли, изменением скорости ее вращения вокруг своей оси и прецессией планеты [7, 9]. Прецессией называется изменение направления земной оси вращения в пространстве: эта ось описывает коническую поверхность вокруг оси земной орбиты (т.е. перпендикуляра орбитальной плоскости Земли). Период прецессии составляет примерно 25 800 лет [26]. Основным фактором, влияющим на изменение скорости вращения Земли и положение земной оси в пространстве, являются приливные силы Луны и Солнца [7, 9]. При ускорении вращения Земли происходит сжатие пород в полярных зонах (уменьшение полярного радиуса)

и растяжение – в экваториальной зоне (увеличение экваториального радиуса). При замедлении вращения Земли сжатие в полярных зонах и растяжение в экваториальной зоне уменьшаются. Возникает дополнительная энергия, которая высвобождается неравномерно по широтным поясам.

Как мы уже говорили выше, на сейсмическую активность планеты могут влиять не только земные (внутренние), но и различные космические (внешние) факторы. В работе [9] проанализированы 1838 сильных сейсмических событий с магнитудой  $M \geq 7$ . Отмечается четкий максимум землетрясений в пределах параллелей  $35\text{--}45^\circ$  с.ш., а также локальные максимумы для зон  $10\text{--}20^\circ$  с.ш. и  $0\text{--}10^\circ$  ю.ш. Схожую картину дал анализ широтного распределения более 100 тыс. землетрясений с магнитудой  $M \geq 4$  за 1973–1993 гг., при котором выделено два максимума сейсмической активности в пределах  $35\text{--}40^\circ$  с.ш. и вблизи  $10^\circ$  ю.ш. [7, 39]. И примерно к такому же выводу пришли авторы [40]: наибольшие проявления сейсмической активности наблюдаются на широтах около  $30\text{--}40^\circ$  в Северном полушарии и  $0\text{--}10^\circ$  в Южном. Исследование широтного распределения частоты землетрясений с магнитудами  $M = 3$  и  $M = 4$  показало для этих землетрясений устойчивое присутствие в распределении квадруплета максимумов на широтах  $|33| \pm 5^\circ$  и  $|10| \pm 5^\circ$  [41]. Эти широтные пояса с повышенным количеством землетрясений малых магнитуд располагаются не локально в одном месте, а по всему периметру Земли. Таким образом, в целом число землетрясений уменьшается от экватора к полюсам Земли. Вблизи полюсов сейсмические события практически вообще не происходят, за пределами широт  $\pm 80^\circ$  упоминаний о каких-либо землетрясениях нет.

Возможно, что локализация максимума сейсмической активности обусловлена широтным распределением континентальной коры, в которой наблюдается преобладающая часть сейсмических событий [9]. Максимум в распределении земной коры континентального типа приходится на широты  $35\text{--}40^\circ$  с.ш. В Южном – «океаническом» полушарии приливная энергия может в большей степени расходоваться в гидросфере, а в «континентальном» Северном полушарии она в боль-

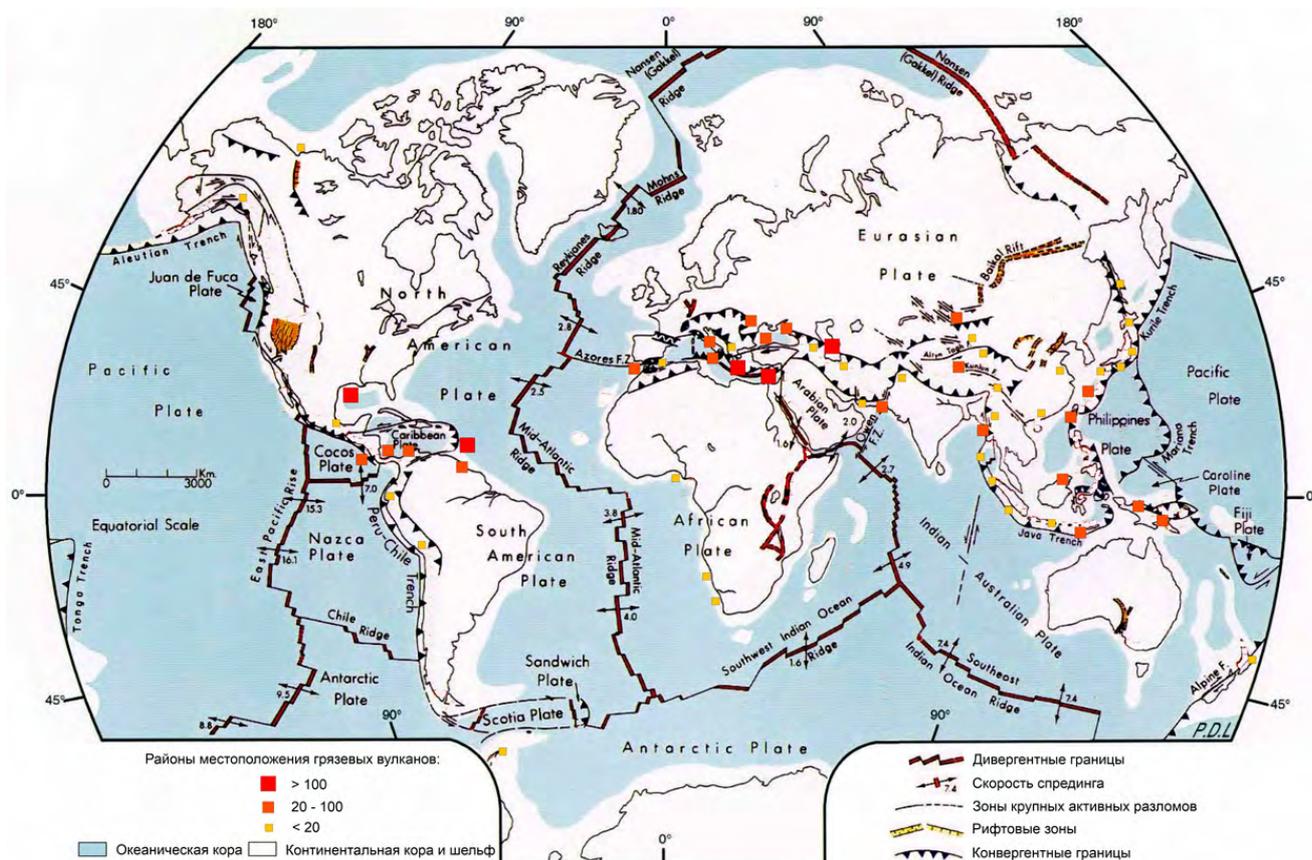
шей степени передается литосфере. Поэтому Северное полушарие отличается более высокой сейсмической активностью по сравнению с Южным. Отмечено [13], что около 99 % всех землетрясений происходит на границах тектонических плит. Примерно 80 % сейсмических событий приходится на субдукционные границы Тихоокеанской плиты и соседствующих с ней главных литосферных плит [13]. Эти границы, как известно, находятся в Северном полушарии Земли. В работе [41] аномально высокие значения сейсмичности в узких полосах широт объясняют приуроченностью этих зон к границам внешнего ядра с мантией и внутренним ядром, спроецированным на земную поверхность в направлении перпендикулярном оси вращения Земли.

В работе [9] на основе анализа 1030 извержений магматических вулканов Земли за период 1900–1977 гг. выделено три широтные зоны в Северном полушарии ( $10\text{--}20^\circ$ ,  $30\text{--}40^\circ$ ,  $50\text{--}60^\circ$ ) и одна в Южном ( $0\text{--}10^\circ$ ), на которые приходятся максимумы числа вулканических извержений. При этом количество извержений в целом убывает от экватора к полюсам. В связи с этим предполагается, что широтное распределение вулканических извержений отражает характер деформаций в земной коре, который имеет вид продольной стоячей волны (растяжения и сжатия) с затухающей от экватора к полюсам амплитудой колебаний. Как и в случае с землетрясениями, Северное полушарие отличается более высокой вулканической активностью по сравнению с Южным. Дизъюнктивные деформации в земной коре являются одним из возможных триггеров усиления активности магматических вулканов Земли. Благодаря возникшим трещинам и разрывам давление в насыщенном газами магматическом расплаве уменьшается. Растворенные в расплаве газы переходят в газообразное состояние с последующим увеличением их объема. Газы поднимаются по образовавшимся трещинам к поверхности Земли, захватывая с собой магму. Схожие данные о широтном распределении извержений магматических вулканов Земли приводятся в работе [40], где максимальная вулканическая активность отмечается в пределах  $30\text{--}40^\circ$  с.ш. и  $0\text{--}10^\circ$  ю.ш.

Логично предположить, что закономерности широтного распределения землетрясений

и извержений магматических вулканов могут быть применимы также и к грязевым вулканам. Однако по сравнению с землетрясениями и извержениями, которые регистрируются достаточно давно, повсеместно и надежно, большие и представительные выборки данных об извержениях грязевых вулканов Земли отсутствуют. Поэтому анализ широтного распределения извержений грязевых вулканов Земли провести попросту невозможно. В то же время имеется информация о расположении на Земле 2500 известных грязевых вулканов [20] (рис. 4). Можно допустить, что в регионах с большим числом грязевых вулканов можно ожидать большее количество извержений. Поэтому мы решили проанализировать широтное распределение числа грязевых вулканов на Земле и сравнить с широтными максимумами частоты землетрясений и извержений магматических вулканов. Выяснилось, что отчет-

ливо выделяются две области максимального количества грязевых вулканов – в пределах широт 10–15° с.ш. и 30–45° с.ш., на которые приходится примерно 22 и 46 % от общего числа вулканов соответственно (рис. 5). В сумме в этих двух широтных зонах располагается более половины всех грязевых вулканов мира – около 68 %. В границах 10–15° с.ш. больше всего грязевых вулканов сосредоточено в районе о. Тринидад (около 200) и в пределах Барбадосской аккреционной призмы, включающей о. Барбадос (около 250), что вместе составляет основную часть всех вулканов, расположенных в данном широтном поясе. В пределах 30–45° с.ш. наиболее крупные по количеству грязевых вулканов следующие провинции: прилегающая к Египту акватория Средиземного моря (около 160 вулканов), восточная часть бассейна Средиземного моря (около 230), территория Азербайджана и при-



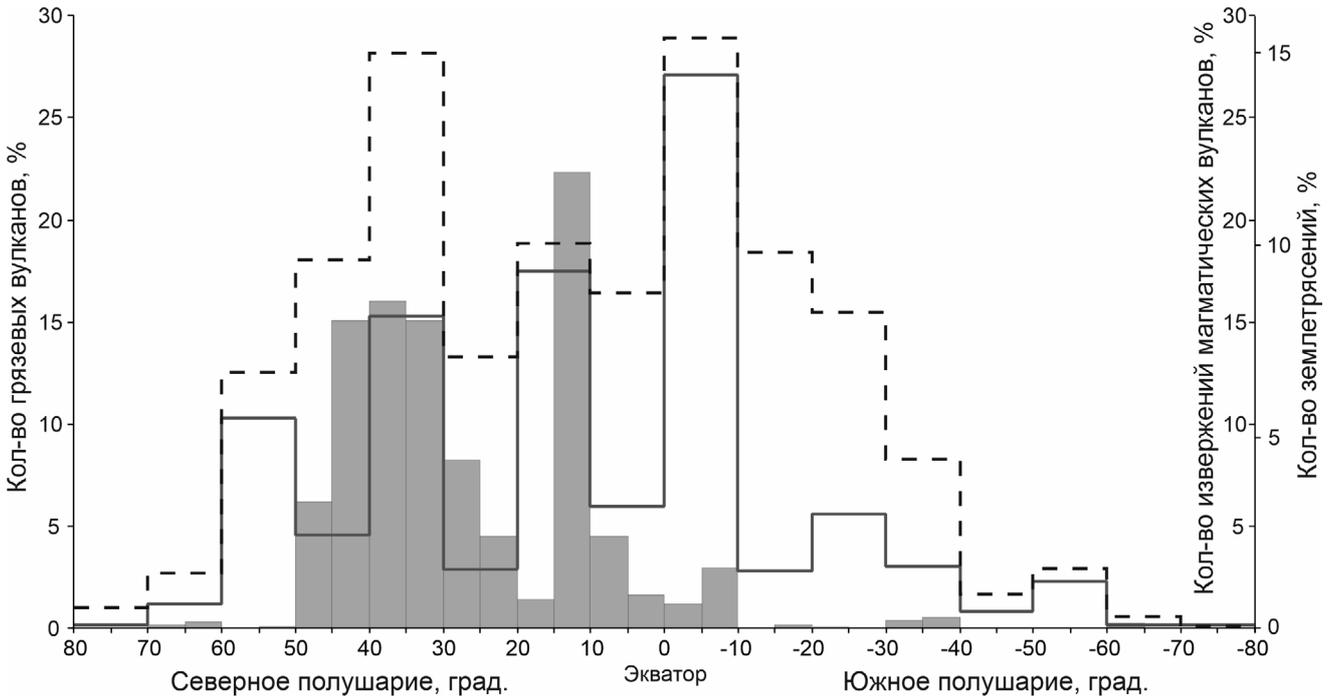
**Рис. 4.** Расположение районов проявления грязевого вулканизма на Земле по отношению к границам тектонических плит и областям распространения континентального шельфа. Рисунок выполнен на основе карты глобальной тектонической и вулканической активности за последний миллион лет [42] с учетом сведений о геоморфологических особенностях морского дна из работы [43].

**Fig. 4.** The location of areas of mud volcanism on the Earth in relation to the boundaries of tectonic plates and areas of continental shelf distribution. The figure is based on a map of global tectonic and volcanic activity over the past million years [42], taking into account information about the geomorphological features of the seafloor from the work [43].

легающая к нему акватория Каспийского моря (около 350 вулканов).

По количеству грязевых вулканов Северное полушарие значительно преобладает над Южным: севернее экватора располагаются почти 95 % всех известных грязевых вулканов. В Южном полушарии наибольшее количество грязевых вулканов – примерно 3 % от их общего числа – находится в границах 5–10° ю.ш. Можно было бы предположить, что это связано с неравномерным распределением суши на Земле, поскольку для идентификации грязевых вулканов на море и на суше используются разные подходы. Наземные грязевые вулканы легко обнаруживают себя на суше по сравнению с морскими вулканами, которые малозаметны в глубоководных районах морского дна. Многие подводные грязевые вулканы недоступны для непосредственного наблюдения и обнаруживаются лишь по ряду косвенных признаков, таким как повышенная газонасыщенность морских донных отложений и расположенной над ними водной толщи, характерная форма рельефа дна, определенный литологический состав донных отложений,

существование в осадочном чехле зон с повышенным поглощением сейсмических волн, наличие подходящих тектонических нарушений и т.д. Кроме того, морские экспедиционные исследования гораздо более дорогостоящие по сравнению с аналогичными наземными исследованиями. Поэтому основная часть морских грязевых вулканов обнаружена в пределах континентального шельфа – относительно неглубокой выровненной области подводной окраины материка (рис. 4). В настоящее время известно около 1100 наземных грязевых вулканов и около 1400 – морских [20]. Суша занимает в Северном полушарии площадь около 100.5 млн км<sup>2</sup>, а в Южном – около 48.5 млн км<sup>2</sup>, т.е. разница примерно в 2 раза. Тогда как количество грязевых вулканов в Северном полушарии примерно в 18 раз больше, чем в Южном. Даже если учесть, что помимо площади участков суши играет роль также длина периметра этих участков (протяженность шельфовой зоны), то и в этом случае неравномерность распределения суши не позволяет объяснить асимметричность распределения грязевых вулканов в разных полушариях. Ближе к по-



**Рис. 5.** Распределение количества землетрясений (штриховая линия) [39], извержений магматических вулканов (сплошная линия) [9], количества грязевых вулканов мира (серые столбцы) по широтным поясам Земли. Левая вертикальная ось значений показывает количество грязевых вулканов (в процентах), правая – количество землетрясений и извержений магматических вулканов (в процентах).

**Fig. 5.** Distribution of the number of earthquakes (dashed line) [39], eruptions of magmatic volcanoes (solid line) [9], the number of mud volcanoes in the world (gray columns) by latitudinal belts of the Earth. The left vertical axis of values shows the number of mud volcanoes (in percent), the right one shows the number of earthquakes and eruptions of magmatic volcanoes (in percent).

люсам – за пределами широт  $\pm 70^\circ$  – грязевые вулканы либо отсутствуют, либо еще пока не открыты. Например, арктический регион, который в последнее время очень активно изучается и осваивается, богат естественными выходами углеводородных газов. В силу определенных геологических условий можно предполагать, что в акваториях Арктики имеются грязевые вулканы.

В целом мы видим, что широтные пояса с наибольшим количеством грязевых вулканов на Земле неплохо согласуются с широтными зонами с максимальным количеством землетрясений и извержений магматических вулканов. В основном это совпадение наблюдается для Северного полушария, в котором пояса вулканической и сейсмической активности приходятся на  $30\text{--}45^\circ$  с.ш. и  $10\text{--}20^\circ$  с.ш. В то же время выбивается из общей закономерности наличие высокого пика числа грязевых вулканов в интервале  $10\text{--}15^\circ$  с.ш. и отсутствие какого-либо значимого пика в интервале  $0\text{--}10^\circ$  ю.ш. (рис. 5). Мы полагаем, что это можно объяснить следующим образом. Большая часть грязевых вулканов Земли приурочена к конвергентным границам литосферных плит, к которым, как известно, приурочена основная геодинамическая активность. При этом большая часть морских грязевых вулканов зафиксирована в зонах континентального шельфа (возможно, из-за более легкого обнаружения вулканов по сравнению с глубоководной частью морского дна). Сочетание обширных областей континентального шельфа с конвергентными границами литосферных плит менее благоприятно в Южном полушарии (рис. 4). Поэтому мы наблюдаем такую резкую асимметрию в широтном распределении грязевых вулканов на Земле с преобладанием вулканов в Северном полушарии, т.е. отсутствие пика в интервале  $0\text{--}10^\circ$  ю.ш. При этом надо заметить, что это не означает малочисленности грязевых вулканов в Южном полушарии на самом деле, просто они могут быть там еще не обнаружены (например, в глубоководных частях морского дна). Пик в интервале  $10\text{--}15^\circ$  с.ш. обусловлен большим количеством морских грязевых вулканов в районе о. Тринидад и в пределах Барбадосской аккреционной призмы. Вероятность лучшей изученности морского дна в этом районе по сравнению с другими районами Мирового океана может

объяснить наличие обсуждаемого пика. Другими словами, наблюдаемая асимметрия в широтном распределении грязевых вулканов на Земле может являться следствием недостаточной изученности человеком Мирового океана, а не отражением реальной геологической обстановки.

## Заключение

Многочисленные исследования показывают возможность влияния разных космических факторов на геодинамические процессы. В нашей работе по литературным данным приведены примеры воздействия приливных сил Луны и Солнца, солнечной активности, изменения угловой скорости вращения Земли на сейсмичность и деятельность флюидодинамических систем (подземных скважин, магматических вулканов, нефтегазовых залежей). Рассмотрены также механизмы, которые предлагают разные исследователи для объяснения влияния космических факторов на эти явления. По аналогии можно ожидать, что космические факторы влияют и на активность грязевых вулканов Земли. Анализ такого влияния выполнен нами главным образом на примере грязевых вулканов Азербайджана, для которых существует наиболее полный каталог извержений (431 событие за почти 210 лет). По результатам нашего анализа и литературным данным можно сделать следующие выводы.

Активность грязевых вулканов может усиливаться после сильных сизигийных приливов (фазы новолуния и полнолуния), благодаря которым в приливных выступах Земли происходят более сильные деформации земной коры. Соответственно, перед новолунием и полнолунием наблюдается уменьшение числа грязевулканических извержений. Если триггером повышения активности являются непосредственно сами сизигийные приливы, то отклик грязевых вулканов на приливное воздействие Луны запаздывает на 5–10 сут. По-видимому, это то необходимое время, которое занимают процессы подготовки извержения: формирование новых трещин, перемещение пузырьков газа и др.

Извержения грязевых вулканов распределены неравномерно в течение года. Выделяются два пика грязевулканической активности: в марте–июне и сентябре–октябре. Первый пик может быть откликом грязевых вулканов на прохождение Землей перигелия

(2–5 января). В этом случае отклик запаздывает на несколько месяцев и достаточно сильно растянут во времени. Абсолютный максимум извержений приходится на июнь – 13.8 % от общего числа (33 события). Второй пик может быть реакцией грязевых вулканов на прохождение Землей афелия (1–5 июля). Эта реакция менее выражена и происходит с меньшим запаздыванием. Запаздывание, вероятно, обусловлено длительностью протекания процессов подготовки извержения: проработка путей миграции флюидов, миграция флюидов с более глубоких горизонтов в приповерхностные резервуары и др. Мы полагаем, что, в отличие от отклика грязевых вулканов на сизигийные приливы, здесь основную роль играют уже те процессы внутри грязевых вулканов, для которых требуется большее характерное для воздействия время.

Вопреки мнению разных исследователей, мы не находим связи между солнечной активностью и грязевулканическими извержениями. Максимумы извержений грязевых вулканов повторяются с периодичностью 14–20 лет. Эта цикличность не соотносится напрямую с 11- или 22-летними циклами солнечной активности: максимумы грязевулканических извержений приходятся как на максимумы, так и на минимумы чисел Вольфа.

Мы полагаем, что циклы грязевулканической активности лучше всего соотносятся с главным нутационным колебанием земной оси. Это колебание имеет период 18.6 года, равный периоду обращения лунных узлов (точки пересечения орбиты Луны с плоскостью эклиптики).

Анализ широтного распределения числа грязевых вулканов на Земле показал, что оно неплохо согласуется с широтным распределением числа землетрясений и извержений магматических вулканов. В Северном полушарии пояса максимальной концентрации грязевых вулканов приходится на 30–45° с.ш. и 10–15° с.ш., что составляет около 22 и 46 % от общего числа вулканов соответственно. В Южном полушарии наибольшее количество грязевых вулканов (около 3 % от их общего числа) находится в границах 5–10° ю.ш. За пределами широт  $\pm 70^\circ$  грязевые вулканы отсутствуют, либо о них попросту еще ничего не известно.

## Список литературы

1. Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Свинцов И.С., Пигулевский П.И., Свистун В.К., Щербина С.В. **2015**. Отклик флюидонасыщенных коллекторов на лунно-солнечные приливы. Ч. 1. Фоновые параметры приливных компонент в смещении грунта и уровне подземных вод. *Физика Земли*, 1: 73–82.
2. Борисов К.И., Горшков Л.К., Софьин А.П., Федорова Л.А. **2019**. Природно-техногенные катастрофы как проявления геодинамической нестабильности земной коры. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 330(6): 126–133. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/6/2134>
3. Сибгатулин В.Г., Перетокин С.А., Кабанов А.А. **2016**. Резонансы гравитационных приливов – мощный энергетический источник геодинамических процессов в земной коре. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 9(2): 146–165.
4. Добрецов Н.Л. **2015**. О периодичности и разномасштабных факторах вулканических извержений. *Геология и геофизика*, 56(12): 2107–2117. <https://doi.org/10.15372/GiG20151201>
5. Одинцов С.Д., Иванов-Холодный Г.С., Георгиева К. **2007**. Солнечная активность и глобальная сейсмичность Земли. *Известия РАН. Серия физическая*, 71(4): 608–610.
6. Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Сычев В.Н. **2011**. О геэффективных солнечных вспышках и вариациях уровня сейсмического шума. *Физика Земли*, 3: 55–71.
7. Левин Б.В. **2006**. О природе некоторых периодических изменений в сейсмическом режиме Земли. *Вестник ДВО РАН*, 1: 51–58.
8. Левин Б.В., Сасорова Е.В., Доманский А.В. **2013**. Свойства «критических широт», вариации вращения и сейсмичность Земли. *Вестник ДВО РАН*, 3: 3–8.
9. Федоров В.М. **2019**. Вращение Земли и особенности широтного распределения вулканической и сейсмической активности. *Жизнь Земли*, 41(3): 250–263. [https://doi.org/10.29003/m668.0514-7468.2019\\_41\\_3/250-263](https://doi.org/10.29003/m668.0514-7468.2019_41_3/250-263)
10. Рябова С.А. **2018**. Исследование возмущения микросейсмического фона геомагнитными импульсами на среднеширотной обсерватории «Михнево». *Вестник НЯЦ РК*, 2: 36–43.
11. Рябова С.А., Спивак А.А. **2017**. Возмущение сейсмического фона геомагнитными импульсами. *Геофизические исследования*, 18(2): 65–76. <https://doi.org/10.21455/gr2017.2-4>
12. Федоров В.М. **2001**. Сопоставление хронологии вулканической активности Земли с характеристиками ее орбитального движения. *Вулканология и сейсмология*, 5: 65–67. EDN: VLBSMB
13. Хаин В.Е., Халилов Э.Н. **2009**. *Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа*. М.: Научный мир, 520 с.

14. Kasahara J. **2002**. Tides, earthquakes, and volcanoes. *Science*, 297: 348–349.
15. Tavares M., Azevedo A. **2011**. Influences of solar cycles on earthquakes. *Natural Science*, 3(6): 436–443. <https://doi.org/10.4236/ns.2011.36060>
16. Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А. **2017**. Эффекты лунно-солнечного прилива в земной коре и атмосфере Земли. *Физика Земли*, 4: 76–92.
17. Свинцов И.С., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В. **2015**. Характеристика состояния флюидонасыщенного коллектора по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод. *Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. журнал)*, 8: 158–165.
18. Ustyugov G.V., Ershov V.V. **2021**. Mud volcanism as a dangerous phenomenon for oil and gas facilities. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 946: 012030, 6 p. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012030>
19. Валяев Б.М., Телепин М.А., Бережная Е.А., Вахтангишвили В.Х., Миндорашвили Г.К., Титков Г.А. **1980**. Корреляция грязевулканической деятельности с солнечной активностью (на примере вулкана Ахтала, Грузия). *Доклады Академии наук СССР*, 255(5): 1204–1207.
20. Алиев Ад.А., Гулиев И.С., Дадашев Ф.Г., Рахманов Р.Р. **2015**. *Атлас грязевых вулканов мира*. Баку: Nafta-Press, 332 с.
21. Юсубов Н.П., Гулиев И.С. **2022**. *Грязевой вулканизм и углеводородные системы Южно-Каспийской впадины*. Баку: Элм, 168 с.
22. Baloglanov E.E., Abbasov O.R., Akhundov R.V. **2018**. Mud volcanoes of the world: classifications, activities and environmental hazard (informational-analytical review). *European J. of Natural History*, 5: 12–26.
23. *Online calculator for determining the age of the Moon*. URL: <https://planetcalc.com/524/> (accessed 23.11.2022).
24. Устюгов Г.В., Ершов В.В. **2019**. Извержения грязевых вулканов Азербайджана и их корреляция с сильными землетрясениями. *Вестник ВГУ. Серия: Геология*, 4: 6–13.
25. *SILSO, World Data Center. Sunspot number and long-term Solar Observations*. On-line sunspot number catalogue. Royal observatory of Belgium, Brussels. URL: <http://www.sidc.be/silso/> (accessed 22.11.2022).
26. Сурдин В.Г. **2002**. *Пятая сила*. М.: Изд-во МЦНМО, 40 с.
27. Кузнецов В.В. **2011**. *Физика Земли*. Новосибирск, 842 с.
28. Швец А.И. **2015**. *Физика Земли*. Санкт-Петербург: НОИР г. Санкт-Петербург, 208 с.
29. Хабитуев Д.С., Шпынев Б.Г., Татарников А.В., Щеглова Е.С. **2017**. Влияние гравитационного прилива Солнца и Луны на динамику параметров атмосферы, ионосферы и океана. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли и космоса*, 14(5): 321–339. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-5-321-339>
30. Мельхиор П. **1968**. *Земные приливы*. М.: Мир, 483 с.
31. Боканенко Л.И., Галаганов О.Н., Передерин В.П. **1999**. Вариации уровня подземных вод Гармского полигона (Таджикистан) и возможности прогнозирования землетрясений. *Физика Земли*, 5: 72–82.
32. Мирзоев К.М., Николаев А.В., Мирзоев В.К., Лукк А.А., Харламов А.И., Дещеревский А.В. **2010**. Способы увеличения добычи нефти с учетом приливных движений Земли. *Экспозиция Нефть Газ*, 4(10): 58–62.
33. Муслимов Р.Х., Мирзоев К.М., Ахмадиев Р.Г., Агафонов В.А., Хузин Р.Р., Тимиров В.С., Мирзоев В.К., Лукк А.А., Дещеревский А.В. **2006**. Влияние гравитационных лунно-солнечных приливов земной коры на добычу нефти. *Нефтяное хозяйство*, 8: 111–115.
34. Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., Дещеревский А.В., Мирзоев В.К. **2011**. Приливные деформации земной коры как природный насос для увеличения нефтеотдачи. *Каротажник*, 200: 78–93.
35. Kikvadze O.E., Lavrushin V.Yu., Polyak B.G. **2020**. Chemical geothermometry: application to mud volcanic waters of the Caucasus region. *Frontiers of Earth Science*, 14: 738–757. <https://doi.org/10.1007/s11707-019-0810-8>
36. Тамразян Г.П. **1963**. Пространственно-временная сопряженность деятельности вулканов, как один из признаков наличия глубинного разлома, и некоторые вопросы ее периодичности. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*, 2: 3–19.
37. Гульельми А.В., Клайн Б.И. **2020**. О воздействии Солнца на сейсмичность Земли. *Солнечно-земная физика*, 6(1): 111–115. <https://doi.org/10.12737/szf-61202010>
38. Никитенко О.А., Ершов В.В. **2021**. Глобальные закономерности формирования химического состава грязевулканических вод. *Геохимия*, 66(10): 887–903.
39. Левин Б.В., Чирков Е.Б. **1999**. Особенности широтного распределения сейсмичности и вращения Земли. *Вулканология и сейсмология*, 6: 65–69.
40. Белов С.В., Шестопалов И.П., Харин Е.П. **2011**. Эндогенная активность Земли и ее связь с солнечной и геомагнитной активностью. *Использование и охрана природных ресурсов России: Бюллетень*, 3: 10–14.
41. Булатова Н.П. **2005**. Широтное распределение сейсмичности Земли в зависимости от положения Солнца и Луны. *Вулканология и сейсмология*, 2: 57–78. EDN: HSFQDQF
42. Lowman P.D.Jr. **1997**. Global tectonic and volcanic activity of the last one million years. *NASA/Goddard Space Flight Center*. Greenbelt, MD 20771. URL: <https://core2.gsfc.nasa.gov/research/lowman/lowman.html> (accessed 13.03.2023).
43. Harris P.T., Macmillan-Lawer M., Rupp J., Baker E.K. **2014**. Geomorphology of the oceans. *Marine Geology*, 352: 4–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mar-geo.2014.01.011>

## References

- Besedina A.N., Vinogradov E.A., Gorbunova E.M., Kabychenko N.V., Svintsov I.S., Pigulevskiy P.I., Shcherbina S.V., Svistun V.K. **2015**. The response of fluid-saturated reservoirs to lunisolar tides. Pt 1. Background parameters of tidal components in ground displacements and groundwater level. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 51(1): 70–79. <https://doi.org/10.1134/s1069351315010036>
- Borisov K.I., Gorshkov L.K., Sofin A.P., Fedorova L.A. **2019**. Natural-technological disasters as manifestations of geodynamic instability of the Earth's crust. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 330(6): 126–133. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/6/2134>
- Sibgatulin V.G., Peretokin S.A., Kabanov A.A. **2016**. Resonances of gravitational tides as a powerful energy source of the geodynamic processes in Earth's crust. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 9(2): 146–165. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1999-494x-2016-9-2-146-16>
- Dobretsov N.L. **2015**. Periodicity and driving forces of volcanism. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 56(12): 1663–1670. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.11.001>
- Odintsov S.D., Ivanov-Kholodnyi G.S., Georgieva K. **2007**. Solar activity and global seismicity of the Earth. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 71(4): 593–595. <https://doi.org/10.3103/s1062873807040466>
- Sycheva N.A., Bogomolov L.M., Sychev V.N. **2011**. On geoeffective solar flares and variations of the seismic noise level. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 47(3): 207–222. <https://doi.org/10.1134/s1069351310101027>
- Levin B.W. **2006**. About the nature of some periodic changes in seismic regime of the Earth. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of Far Eastern Branch of RAS*, 1: 51–58. (In Russ.).
- Levin B.W., Satorova E.V., Domanskiy A.V. **2013**. Features of “critical latitudes”, variations of rotation and seismicity of the Earth. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of Far Eastern Branch of RAS*, 3: 3–8. (In Russ.).
- Fedorov V.M. **2019**. Earth's rotation and features of latitudinal gradients of volcanic and seismic activity. *Zhizn' Zemli = The Life of the Earth*, 41(3): 250–263. (In Russ.). [https://doi.org/10.29003/m668.0514-7468.2019\\_41\\_3/250-263](https://doi.org/10.29003/m668.0514-7468.2019_41_3/250-263)
- Riabova S.A. **2018**. Investigation of the response of the microseismic background to geomagnetic impulses at the mid-latitude observatory «Mikhnevo». *Vestnik NYaTs RK = NNC RK Bulletin*, 2: 36–43. (In Russ.).
- Riabova S.A., Spivak A.A. **2017**. Seismic background disturbance due to geomagnetic impulses. *Geofizicheskie issledovaniya = Geophysical Research*, 18(2): 65–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.21455/gr2017.2-4>
- Fedorov V.M. **2001**. Comparison of the chronology of terrestrial volcanic activity to characteristics of the Earth's orbital motion. *Vulkanologiya i seismologiya = Volcanology & Seismology*, 5: 65–67. (In Russ.).
- Khain V.E., Khalilov E.N. **2009**. *Cycles in geodynamic processes: their possible nature*. Moscow: Scientific World, 520 p. (In Russ.).
- Kasahara J. **2002**. Tides, earthquakes, and volcanoes. *Science*, 297(5580): 348–349. <https://doi.org/10.1126/science.1074601>
- Tavares M., Azevedo A. **2011**. Influences of Solar cycles on earthquakes. *Natural Science*, 3(6): 436–443. <https://doi.org/10.4236/ns.2011.36060>
- Adushkin V.V., Riabova S.A., Spivak A.A. **2017**. Lunar-solar tide effects in the Earth's crust and atmosphere. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 53(4): 565–580. <https://doi.org/10.1134/s1069351317040012>
- Svintsov I.S., Besedina A.N., Vinogradov E.A., Gorbunova E.M., Kabychenko N.V. **2015**. State of fluid-saturated reservoir according to precise monitoring of undergroundwater level. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 8: 158–165. (In Russ.).
- Ustyugov G.V., Ershov V.V. **2021**. Mud volcanism as a dangerous phenomenon for oil and gas facilities. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 946: 012030, 6 p. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012030>
- Valyaev B.M., Telepin M.A., Berezhnaya E.A., Vakh-tangishvili V.Kh., Mindorashvili G.K., Titkov G.A. **1980**. [Correlation of mud volcanic activity with solar activity (on the example of Akhtala volcano, Georgia)]. *Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences]*, 255(5): 1204–1207. (In Russ.).
- Aliev A.A., Guliev I.S., Dadashev F.G., Rakhmanov R.R. **2015**. *Atlas of the World's Mud Volcanoes*. Baku: Naf-ta-Press, 332 p. (In Russ.).
- Yusubov N., Guliev I.S. **2022**. [Mud volcanism and hydrocarbon systems of the South Caspian Basin]. Baku: Elm, 168 p. (In Russ.).
- Baloglanov E.E., Abbasov O.R., Akhundov R.V. **2018**. Mud volcanoes of the world: classifications, activities and environmental hazard (informational-analytical review). *European J. of Natural History*, 5: 12–26.
- Online calculator for determining the age of the Moon*. URL: <https://planetcalc.com/524/> (accessed 23.11.2022).
- Ustyugov G.V., Ershov V.V. **2019**. Eruptions of mud volcanoes in Azerbaijan and their correlation with strong earthquakes. *Vestnik VGU. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 4: 6–13. (In Russ.).
- SILSO, World Data Center. Sunspot number and long-term Solar observations*. On-line sunspot number catalogue. Royal observatory of Belgium, Brussels. URL: <http://www.sidc.be/silso/> (accessed 22.11.2022).
- Surdin V.G. **2002**. [Fifth Force]. Moscow: MCNMO, 40 p. (In Russ.).
- Kuznetsov V.V. **2011**. [Physics of the Earth]. Novosibirsk, 842 p. (In Russ.).

28. Shvets A.I. **2015**. [*Physics of the Earth*]. Saint Petersburg: NOIR St. Petersburg, 208 p. (In Russ.).
29. Khabituiev D.S., Shpynev B.G., Tatarnikov A.V., Scheglova E.S. **2017**. The influence of Lunar-Solar gravity tide on the dynamics of atmosphere, ionosphere and ocean. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli i kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 14(5): 321–339. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-5-321-339>
30. Melchior P. **1968**. *The Earth tides*. Moscow: Mir, 483 p. (In Russ.).
31. Bokanenko L.I., Galaganov O.N., Perederin V.P. **1999**. [Groundwater level variations in the Garm polygon (Tajikistan) and earthquake forecasting possibilities]. *Fizika Zemli = Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 5: 72–82. (In Russ.).
32. Mirzoev K.M., Nikolaev A.V., Mirzoev V.K., Lukk A.A., Kharlamov A.I., Deshcherevsky A.V. **2010**. Ways of oil extraction increase with the registration the Earth tidal movements. *Ekspozitsiya Neft' Gaz = Exposition Oil & Gas*, 4(10): 58–62. (In Russ.).
33. Muslimov R.Kh., Mirzoev K.M., Akhmadiev R.G., Agafonov V.A., Khuzin R.R., Timirov V.S., Mirzoev V.K., Lukk A.A., Deshcherevsky A.V. **2006**. Influence of the moon-solar tides of Earth crust for a mining an oil. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry Journal*, 8: 111–115. (In Russ.).
34. Mirzoev K.M., Nikolaev A.V., Lukk A.A., Deshcherevsky A.V., Mirzoev V.K. **2011**. Tidal deformations of the earth's crust as a natural pump for increasing oil recovery. *Karotazhnik = Logger*, 200: 78–93.
35. Kikvadze O.E., Lavrushin V. Yu., Polyak B.G. **2020**. Chemical geothermometry: application to mud volcanic waters of the Caucasus region. *Frontiers of Earth Science*, 14: 738–757. <https://doi.org/10.1007/s11707-019-0810-8>
36. Tamrazyan G.P. **1963**. [Spatio-temporal conjugation of volcanic activity as one of the signs of the presence of a deep fault, and some questions of its periodicity]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka = Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration*, 2: 3–19. (In Russ.).
37. Guglielmi A.V., Klain B.I. **2020**. Effect of the Sun on the Earth's seismicity. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-Terrestrial Physics*, 6(1): 89–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/stp-61202010>
38. Nikitenko O.A., Ershov V.V. **2021**. Geochemical patterns of mud volcanic waters: reviewed worldwide data. *Geokhimiya = Geochemistry International*, 59(10): 922–937. <https://doi.org/10.1134/s0016702921090044>
39. Levin B.W., Chirkov Ye.B. **1999**. The peculiarities of the seismicity latitude distribution and the Earth rotation. *Vulkanologiya i seismologiya = Volcanology & Seismology*, 6: 65–69. (In Russ.).
40. Belov S.V., Shestopalov I.P., Kharin E.P. **2011**. Endogenous activity of the Earth and its communication with solar and geomagnetic activity. *Ispol'zovanie i okhrana prirodnikh resursov Rossii: Byulleten' = Use and Protection of Natural Resources of Russia*, 3: 10–14. (In Russ.).
41. Bulatova N.P. **2005**. The latitude distribution of terrestrial seismicity in relation to the locations of the Sun and Moon. *Vulkanologiya i seismologiya = Volcanology and Seismology*, 2: 57–78. (In Russ.).
42. Lowman P.D.Jr. **1997**. Global tectonic and volcanic activity of the last one million years. *NASA/Goddard Space Flight Center*. Greenbelt, MD 20771. URL: <https://core2.gsfc.nasa.gov/research/lowman/lowman.html> (accessed 13.03.2023).
43. Harris P.T., Macmillan-Lawer M., Rupp J., Baker E.K. **2014**. Geomorphology of the oceans. *Marine Geology*, 352: 4–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2014.01.011>

#### Об авторах

Сотрудники отдела исследования вещественного состава геосфер ЦКП, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск:

**Устюгов Геннадий Викторович** (<https://orcid.org/0000-0002-7269-7439>), младший научный сотрудник, [gen.ustyugov@mail.ru](mailto:gen.ustyugov@mail.ru)

**Ершов Валерий Валерьевич** (<https://orcid.org/0000-0003-2289-6103>), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, [valery\\_ershov@mail.ru](mailto:valery_ershov@mail.ru)

#### About the Authors

Employees of the Department for the study of material composition of the geospheres of the Centre for the Collective Use, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk:

**Ustyugov, Gennady V.** (<https://orcid.org/0000-0002-7269-7439>), Junior Researcher, [gen.ustyugov@mail.ru](mailto:gen.ustyugov@mail.ru)

**Ershov, Valery V.** (<https://orcid.org/0000-0003-2289-6103>), Cand. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher, [valery\\_ershov@mail.ru](mailto:valery_ershov@mail.ru)

Поступила 30.11.2022

После доработки 16.03.2023

Принята к публикации 19.03.2023

Received 30 November 2022

Revised 16 March 2023

Accepted 19 March 2023



## О сброшенных напряжениях в очагах умеренных и слабых землетрясений: особенности распределения во времени

Л. М. Богомолов<sup>1</sup>, В. Н. Сычев\*<sup>1</sup>, Н. А. Сычева<sup>2</sup>

\*E-mail: koitash@mail.ru

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

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

**Резюме.** Проведен анализ изменения сброшенных напряжений во времени в период форшоковой активности сильных землетрясений для двух сейсмоактивных регионов с различной геодинамической обстановкой: Северный Тянь-Шань и Южные Курильские острова. В качестве исходных данных использованы ранее составленные каталоги динамических параметров (ДП) землетрясений в этих регионах с большим числом событий. Для Северного Тянь-Шаня каталог ДП очагов содержит 183 записи для землетрясений с магнитудами 2.6–6.0, а в случае Южных Курил – 264 записи. Значения сброшенных напряжений анализируются по всей выборке и для форшоковых периодов – 500 дней перед наиболее сильными землетрясениями. Для обоих регионов выделено по 12 таких значимых событий с магнитудами  $M > 5$  для Северного Тянь-Шаня и  $M \geq 6.5$  для Южных Курил. Определены медианные средние значения сброшенных напряжений в 500-дневные периоды. Проведено сравнение изменения сброшенных напряжений во времени с изменениями значений  $b$ -value (модуль углового коэффициента графика повторяемости землетрясений) за одни и те же периоды наблюдений. Для расчетов  $b$ -value в случае Северного Тянь-Шаня использовался каталог сейсмологической сети KNET (1994–2021 гг., более 10 тысяч событий), а в случае Южных Курил – каталог ISC (International Seismological Center) (1964–2000 гг.). В обоих случаях расчет величины  $b$ -value выполняется для скользящего интервала 500 дней, со сдвигом 1 день. По результатам расчетов для обоих изучаемых регионов отчетливо проявился хорошо известный эффект увеличения параметра  $b$ -value перед сильными землетрясениями. Установлено, что такое возрастание  $b$ -value сопровождается уменьшением усредненной величины снятия напряжений. Полученные результаты показали, что проведение мониторинга сброшенных напряжений во времени может быть использовано для выявления нестационарности сейсмического режима.

**Ключевые слова:** землетрясение, сейсмичность, период форшоков, сброшенные напряжения,  $b$ -value, Северный Тянь-Шань, Южные Курильские острова

## On stress drops in the sources of moderate and weak earthquakes: features of distribution in time

Leonid M. Bogomolov<sup>1</sup>, Vladimir N. Sychev\*<sup>1</sup>, Naylya A. Sycheva<sup>2</sup>

\*E-mail: koitash@mail.ru

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

<sup>2</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Russia

**Abstract.** An analysis has been performed of the change in stress drops over time during the period of foreshock activity of strong earthquakes for two seismically active regions with different geodynamic settings: the Northern Tien Shan and the Southern Kuril Islands. The catalogs of earthquake dynamic parameters, DP (source ones in English publications), in these regions, with a number of events, were used as initial data. The DP catalog for the Northern Tien Shan includes 183 records of source parameters of earthquakes with magnitudes of 2.6–6.0, and the catalog for the Southern Kurils – 264 records. The stress drop values throughout a general sampling were analyzed as well as that in foreshock periods of 500 days length before the strongest earthquakes. For each region 12 such meaningful events have been specified, the magnitudes were  $M > 5$  for the Northern Tien Shan, and  $M \geq 6.5$  for the Southern Kurils. The median average values of stress drops during 500-day period have been determined. The temporal variations of stress drops have been compared with changes in the  $b$ -value parameter (angular coefficient of earthquake recurrence plot) in the same observation periods. The computation of  $b$ -value for the case of the Northern Tien Shan involved the catalog data of KNET seismological network (1994–2021, more than 10 000 events), and the catalog of International Seismological Center (ISC, 1964–2000) for the Southern Kurils. In both cases,  $b$ -values were determined in 500-day moving interval with one

day step. The computation gave the result that the well-known effect of  $b$ -value growth before strong earthquakes manifested itself explicitly in the considered regions. It has been established that such increase in  $b$ -value is accompanied by a decrease in the averaged stress drop values. The obtained results showed that the monitoring of the stress drop values can be used to identify the non stationary stage of the seismic regime.

**Keywords:** earthquake, seismicity, foreshocks period, stress drops,  $b$ -value, Northern Tien Shan, Southern Kuril Islands

**Для цитирования:** Богомолов Л.М., Сычев В.Н., Сычева Н.А. О сброшенных напряжениях в очагах умеренных и слабых землетрясений: особенности распределения во времени. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 1, с. 25–53. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.1.025-036.037-053>; <https://www.elibrary.ru/xdworg>

**For citation:** Bogomolov L.M., Sychev V.N., Sycheva N.A. On stress drops in the sources of moderate and weak earthquakes: features of distribution in time. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 1, pp. 25–53. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.1.025-036.037-053>; <https://www.elibrary.ru/xdworg>

### Благодарности и финансирование

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (№ 121022000085-9) и государственного задания Института физики Земли РАН (№ 122040600089-4).

### Введение

В недавних работах [1] была продемонстрирована возможность и целесообразность массового определения динамических параметров (ДП) очагов землетрясений для сейсмически активных регионов, где развернуты современные сейсмологические сети.

Для таких регионов расчет значений ДП позволяет сформировать банки данных по ДП с достаточно большим числом записей, сопоставимым с количеством накопленных сейсмических событий за тот же период наблюдения. Это, в свою очередь, расширяет возможность описания региональных особенностей геодеформационного процесса. К ДП относятся: скалярный сейсмический момент  $M_0$ , радиус очага  $r$  (определяемый, в частности, по модели Брюна [2–6] или альтернативным моделям [7]), а также сброс касательных напряжений  $\Delta\sigma$  и приведенная сейсмическая энергия, представляющая собой отношение излученной сейсмической энергии  $E_s$  к сейсмическому моменту  $M_0$ :  $e_{PR} = E_s/M_0$ .

Стоит отметить, что все еще популярна традиционная точка зрения, по которой лишь для сильных землетрясений имеет смысл определять и рассматривать динамические параметры [2–4, 8]. Однако важность статистически значимого набора данных по ДП отчетливо проявилась при исследовании принципиального вопроса о существовании самоподобия очагов землетрясений. Как аргументировано в [9–12], признаком самоподобия является отсутствие регрессии между значениями приведенной сейсмической энергии (или пропорциональными  $e_{PR}$  значениями сброшенных напряжений). В наших

предшествующих работах [7, 13] для двух сейсмоактивных регионов Северной Евразии с различной геодинамической обстановкой – Северного Тянь-Шаня и северо-западной части Тихого океана – были установлены аппроксимационные зависимости (регрессии) между сброшенными напряжениями  $\Delta\sigma$  и скалярным сейсмическим моментом  $M_0$ . При этом рассматривались значения  $\Delta\sigma$  и  $M_0$  из каталогов динамических параметров землетрясений для Северного Тянь-Шаня [1, 7, 14] и северо-западной части Тихого океана [3] за соответствующие периоды наблюдений.

Естественным продолжением статистического анализа значений  $\Delta\sigma$  из работ [1, 7] является поиск временных особенностей распределений сброшенных напряжений. Есть ли эпохи, когда взаимосвязи между значениями  $\Delta\sigma$  и  $M_0$  отличаются от установленных по всему каталогу? В настоящей работе предпринята попытка ответить на этот вопрос. Предположительно, особенности в распределении сброшенных напряжений проявляются прежде всего в периоды форшоковой и афтершоковой активизации. Поэтому в работе внимание обращено на значения сброшенных напряжений в периоды подготовки значимых землетрясений, когда особенности распределения  $\Delta\sigma$  могут проявиться наиболее контрастно.

Для анализа выбраны сейсмоактивные регионы с различными геодинамическими условиями: Тянь-Шань – область внутриконтинентального орогенеза, северо-западная часть Тихого океана (район южных Курильских островов) – зона субдукции. Для проведения исследований важным условием является регулярный каталог землетрясений и массовое

определение динамических параметров землетрясений. Для обоих регионов такие наборы данных доступны. Это позволит проверить гипотезу уменьшения значения сброшенных напряжений в период подготовки землетрясений и определить также ее зависимость от типа геодинамической обстановки.

### Объект исследования и используемые данные

#### Северный Тянь-Шань

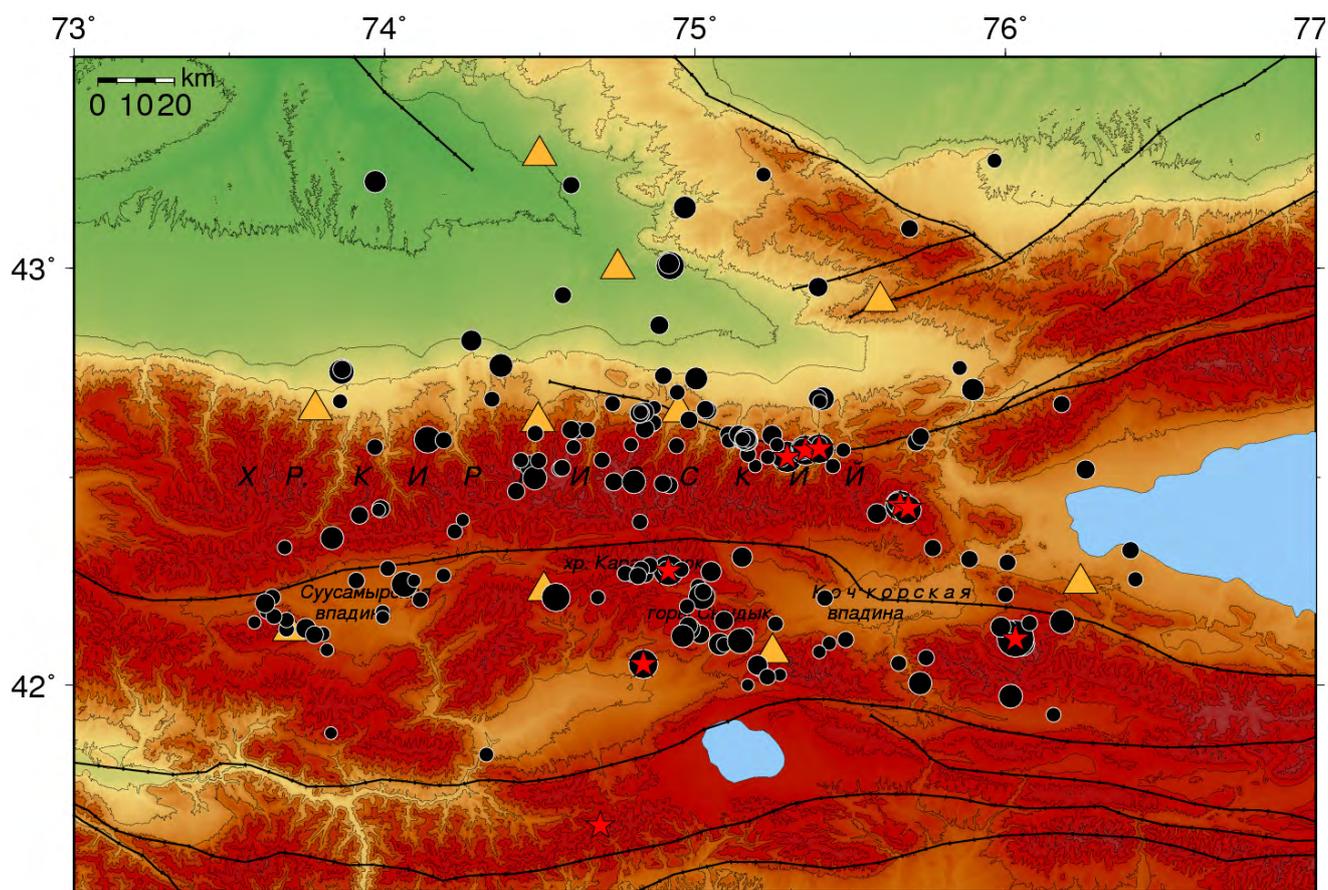
Северный Тянь-Шань – зона современных интенсивных деформаций. Основные тектонические силы в данном регионе обусловлены коллизией между Индийской и Евразийской плитами, которые определяют сейсмическую активность региона [15].

На территории Северного Тянь-Шаня расположена сейсмологическая сеть KNET (Kyrgyz Network), состоящая из десяти цифровых широкополосных станций (рис. 1), позволяющая регистрировать локальную и региональную

сейсмичность [1]. К настоящему моменту каталог землетрясений, полученный по данным сети KNET (каталог KNET), включает в себя более 10 тыс. сейсмических событий, произошедших за 1994–2021 гг. Некоторые характеристики каталога землетрясений и сейсмического процесса приведены в работе [16].

В работе [7] получены значения динамических параметров очагов для 183 землетрясений разных энергетических классов ( $K = 8.7–14.8$ ,  $M = 2.6–6.0$ ) произошедших за 1998–2017 гг. (рис. 1). Основная часть эпицентров землетрясений расположена на северных склонах Киргизского хребта, хр. Карамойнок, горе Сандык и в районе Суусамырской и Кочкорской впадин.

Из каталога KNET сформирована выборка событий с  $M > 5$ , произошедших на исследуемой территории за 1998–2017 гг. Выбор такого порогового значения магнитуды обусловлен тем, что за время работы сети не произошло событий с  $M \geq 6$ , за исключением Кочкорского, 25.12.2006,  $M = 6.0$ . Таким образом, составлен



**Рис. 1.** Эпицентральное расположение землетрясений, для которых рассчитаны ДП (183 события). Треугольники – положение станций сети KNET. Черные линии – региональные разломы. Минимальный круг соответствует событию с  $M = 2.7$ , максимальный – с  $M = 6.0$ . Красные звездочки – события с  $M > 5$ , информация о которых приведена в табл. 1.

рабочий каталог из 12 «тестовых» событий (табл. 1). В таблице кроме параметров 12 наиболее сильных землетрясений приведено число событий,  $N_i$ , попадающих в 500-дневный форшоковый интервал перед главным событием  $i$ , и медианное среднее значение сброшенных напряжений  $Me(\Delta\sigma_i)$ , определенное по  $N_i$  событиям. Эти медианные средние используются для выявления регулярных изменений  $\Delta\sigma$  перед сильными землетрясениями.

При расчете динамических параметров землетрясений для Северного Тянь-Шаня рассматривались события, которые произошли на территории, ограниченной координатами крайних станций сети KNET, и в ее ближайшем окружении. Это связано с целью минимизировать влияние направленности очага землетрясения при построении очагового спектра по нескольким станциям сети KNET [7].

Каталог динамических параметров 183 землетрясений, полученный в работе [7], интересен для исследований еще и тем, что на рассматриваемый период времени приходится дата Кочкорского землетрясения с  $M = 6.0$  (25.12.2006) – сильнейшего события на Северном Тянь-Шане за время работы сети KNET.

В рассматриваемом регионе произошли также землетрясения значительной силы, которые не вошли в таблицу: Луговское 22.05.2003  $M = 6.3$  [17]; Каджи-Сайское 14.11.2014 [18],  $M = 5.5$ ; Каркыра-Сараджаское 28.01.2013,  $M = 6.1$ ; Улахольское 23.11.2013,  $M = 5.2$  [19].

Эти события произошли в отдалении от территории, для которой определены динамические параметры землетрясений, поэтому анализ форшоковой активности для них в настоящем исследовании не проводился.

### Южные Курильские острова

Курило-Камчатская зона субдукции является одним из наиболее сейсмоактивных регионов северо-восточной Евразии, где скорость поддвижения Тихоокеанской литосферной плиты под Североамериканскую и Охотскую плиты достигает 8 см/год [20]. Взаимодействие литосферных плит сопровождается тектоническими деформациями, которые проявляются как на границе плит, так и в ее окрестностях [21]. Наиболее высокая активность землетрясений проявляется вдоль Курильской островной дуги, подавляющее их большинство приурочено к глубинам до 100–150 км с максимумом сейсмической активности на глубинах около 30–40 км. Высокий уровень сейсмичности в районе Курильских островов подтверждает многолетняя статистика зарегистрированных сейсмических событий. В среднем каждые трое суток здесь происходит землетрясение с магнитудой  $M = 4.0$ , примерно раз в месяц – с  $M = 5.0$ , раз в полгода – с  $M = 6.0$ , раз в 2 года – с  $M = 7.0$ . В среднем каждые 10 лет здесь случаются катастрофические землетрясения с  $M = 8.0$  и более [22].

В настоящей работе внимание сосредоточено на области вокруг Южных Куриль-

**Таблица 1.** Параметры землетрясений с  $M > 5$  на Северном Тянь-Шане по данным сети KNET за 1998–2017 гг.

№ п/п	Дата	Время	$\varphi^\circ, N$	$\lambda^\circ, E$	$h, км$	$K$	$M$	$\Delta\sigma, МПа$	$Me(\Delta\sigma_i), МПа$	$N$
1	22.05.2003	18:11:55.01	42.989	72.814	7.0	14.26	5.7	Н.д.	4.71	9
2	16.01.2004	09:06:17.90	42.549	75.297	14.0	13.68	5.4	54.82	3.42	15
3	02.06.2004	17:15:10.82	42.276	74.914	17.9	13.25	5.1	Н.д.	3.42	19
4	08.11.2006	02:21:26.94	42.565	75.356	18.6	13.37	5.2	44.61	4.01	21
5	25.12.2006	20:00:58.32	42.112	76.032	0.1	14.83	6.0	631.66	3.48	22
6	06.06.2007	11:09:25.58	42.569	75.400	13.0	13.25	5.1	33.06	3.17	16
7	02.03.2010	01:55:36.02	42.433	75.661	19.3	13.34	5.2	109.21	3.42	18
8	09.04.2011	12:30:25.45	42.051	74.834	6.3	13.20	5.1	5.28	6.21	8
9	05.02.2012	07:10:15.20	41.396	74.761	13.4	13.21	5.1	Н.д.	8.50	8
10	23.11.2013	09:42:6.75	42.427	75.687	9.9	13.46	5.3	88.79	7.84	11
11	17.11.2015	17:29:36.61	40.426	73.187	3.1	13.53	5.3	Н.д.	6.58	12
12	07.12.2015	08:30:53.22	41.660	74.695	15.9	13.60	5.3	Н.д.	7.80	13

Примечание. Н.д. – нет данных.

ских островов, ограниченной координатами 42°–46° с.ш., 144°–151° в.д. Для анализа зависимости снятия напряжений в очагах от времени использовался каталог динамических параметров очагов северо-западной части Тихого океана за 1969–1996 гг. для региона в пределах 42–51° с.ш., 140–159° в.д. [3]. Этот каталог был составлен Р.Н. Бурымской по данным аналоговых (частотно-избирательных) сейсмостанций. Он остается уникальным и в настоящее время, так как включает динамические параметры (в том числе значения сброшенных напряжений) для 431 землетрясения, что существенно больше по сравнению с другими региональными каталогами ДП. В интересующую нас область вокруг Южных Курильских островов попадают 264 события (рис. 2)

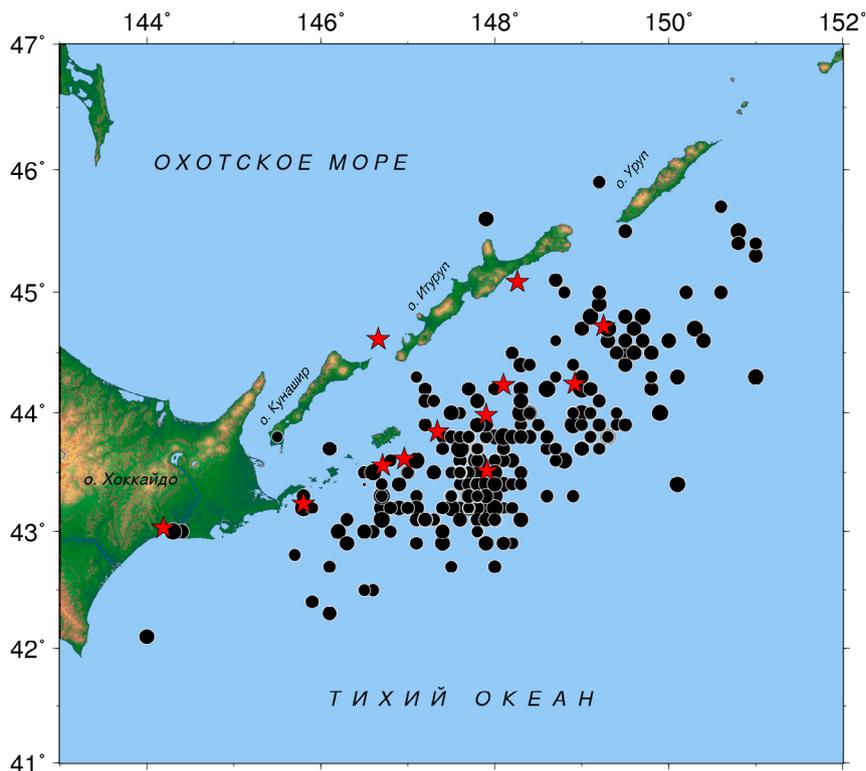


Рис. 2. Эпицентральное расположение землетрясений Южных Курильских островов с рассчитанными динамическими параметрами (264 события) из каталога [3]. Красные звездочки – события с  $M \geq 6.5$  из каталога ISC [24] (табл. 2).

из каталога [3]. Сведения о гипоцентрах и динамических параметрах этих событий приведены в таблице в Приложении. Значения сброшенных напряжений, которые даны в [3] для модели Брюна, пересчитаны на модель Мадариаги.

Интерес к указанной области обусловлен также тем, что в этом регионе произошло Шикотанское землетрясение 04.10.1994,

$M_w = 7.9$  – одно из сильнейших сейсмических событий в мире в конце XX в. Стоит отметить, что в недавних работах, посвященных очагам землетрясений в Сахалин-Курильском регионе, внимание, как правило, сфокусировано на расчетах тензора сейсмического момента [23], а оценки сброшенных напряжений не проводились.

Таблица 2. Параметры землетрясений с  $M \geq 6.5$  в районе Южных Курильских островов по данным ISC за 1969–1996 гг.

№ п/п	Дата	Время	$\varphi^\circ$ , N	$\lambda^\circ$ , E	$h$ , км	$M$	$\Delta\sigma$ , МПа	$Me(\Delta\sigma_r)$ , МПа	N
1	11.08.1969	21:27:36.11	43.514	147.915	28.6	8.2	4.97	10.39	3
2	05.09.1971	18:35:28.52	46.559	141.174	18.1	7.5	Н.д.	14.67	11
3	17.06.1973	03:55:3.01	43.236	145.796	35.0	7.8	197.92	18.70	8
4	23.03.1978	03:15:21.65	45.085	148.257	25.0	7.7	62.59	19.81	10
5	24.03.1978	19:47:49.27	44.243	148.916	12.3	7.8	73.54	21.47	18
6	06.12.1978	14:02:5.85	44.613	146.656	120.5	7.8	Н.д.	5.98	34
7	03.09.1981	05:35:46.49	43.614	146.961	47.3	6.8	140.12	32.85	2
8	03.12.1984	04:08:35.88	44.233	148.102	59.4	6.5	41.35	15.72	1
9	15.01.1993	11:06:7.48	43.031	144.186	98.8	6.8	Н.д.	16.85	7
10	04.10.1994	13:23:0.44	43.842	147.340	35.0	7.9	Н.д.	7.35	29
11	09.10.1994	07:55:41.18	43.981	147.900	33.1	7.0	Н.д.	7.35	29
12	03.12.1995	18:01:10.18	44.721	149.247	30.0	7.6	279.58	5.64	6

Для анализа форшоковой активности сильных землетрясений Южных Курил ( $42^{\circ}$ – $46^{\circ}$  с.ш.,  $144^{\circ}$ – $151^{\circ}$  в.д.) из сейсмологического центра ISC [24] получен каталог землетрясений (12 320 событий), произошедших на территории Сахалина и Курильских островов ( $25^{\circ}$ – $60^{\circ}$  с.ш.,  $130^{\circ}$ – $170^{\circ}$  в.д.) за период с 01.01.1964 по 31.12.2000.

Поскольку регионы Северного Тянь-Шаня и северо-западной части Тихого океана различаются по сейсмической обстановке, то и пороговые значения для выбора «тестовых» землетрясений для них разные: для Южных Курильских островов оно определено на уровне  $M \geq 6.5$ . Если же взять пороговое значение  $M > 5.0$ , как и для Северного Тянь-Шаня, то каталог будет состоять из более чем 1000 событий, с большим количеством перекрывающихся интервалов времени, что затрудняет анализ. Таким образом, из каталога ISC сформирована выборка из 12 землетрясений с  $M \geq 6.5$ . На рис. 2 эпицентры этих землетрясений отмечены красными звездочками, а в табл. 2 приведены некоторые их параметры. Цветом выделены Монеронское и Шикотанское землетрясения, которые ниже будут рассмотрены более подробно.

## Методика

Динамические параметры землетрясений могут характеризовать не только очаговую область, но и изменение (сброс касательных напряжений,  $\Delta\sigma$ ) геодинамического режима сейсмоактивного региона. В связи с этим вызывают интерес вариации  $\Delta\sigma$  в период форшоковой активности.

Методика расчета динамических параметров изложена в классических работах [25, 26]. Результаты расчета динамических параметров очагов землетрясений в северо-западной части Тихого океана представлены в [3]. Вопросы адаптации и применения этой методики для Северного Тянь-Шаня детально освещены в [1, 7].

Для определения динамических параметров очага по параметрам спектров чаще других используются две модели: модель Брюна [5, 6] и модель Мадариаги [27, 28]. В работе [4] дано также хорошо аргументированное сравнение моделей. Приведем кратко основные особенности использования одной или другой модели.

В обеих моделях при вычислениях радиуса очага используется коэффициент  $k$  – чис-

ленный коэффициент, зависящий от модели разрыва в очаге. Выбор значения коэффициента  $k$  может существенно повлиять на погрешность расчета величины радиуса очага и, как следствие, сброшенных напряжений.

В работе [5] значение коэффициента  $k$  определено исходя из простейшей модели очаговой подвижки (зона очага считается шаром с радиусом  $r$ ), а смещение «полусфер»,  $b$ , вдоль плоскости разрыва происходит сразу по всей поверхности, ограниченной кругом радиуса  $r$ , причем  $b \ll r$ . Для этой модели, называемой моделью Брюна и повсеместно используемой в XX в. и в нулевые годы XXI в., расчет в [5] дал значение  $k = 0.37$ .

Однако в последующих работах [29–33] было обращено внимание на то, что значения радиуса очага, основанные на простейшей модели, получаются завышенными, в частности по сравнению с наблюдениями разрывов, выходящих на дневную поверхность. Вследствие этого оценки сброшенных напряжений могут оказаться ниже реальных значений в несколько раз [30]. Модели, описывающие косейсмическое смещение, т.е. механизм очага, более адекватно, были разработаны в [27, 28, 32, 34–36]. Но и модель Брюна, как отмечено в [1], все же может применяться, например, при сравнении расчетов динамических параметров с ранее полученными результатами для данного региона.

В модели Мадариаги [27, 28] в качестве источника сейсмических волн рассматривается дисковая трещина, радиус которой увеличивается с постоянной скоростью  $V_R$ , пока не достигнет максимального значения,  $r_M$ , отождествляемого с радиусом очага (радиусом разрушения, по терминологии [27]). Дальнейшего роста трещины не происходит. В этой модели угловая частота зависит как от радиуса очага, так и от скорости разрыва  $V_R$ , для которой, согласно [30, 32 и др.], обычно принимается приближенное значение  $V_R \approx 0.9 \cdot V_S$ , где  $V_S$  – скорость  $S$ -волны. При такой скорости разрыва коэффициент  $k$  для модели Мадариаги оказывается равным  $k = 0.21$ . Из-за различия значений  $k$  радиус очага в моделях Брюна и Мадариаги различается в 1.76 раза ( $r = 1.76 r_M$ ). А вот значения снятия напряжений для этих моделей различаются примерно в 5 раз, так как  $\Delta\sigma \sim 1/r^3$ . В других работах [32, 34–37], где анализировались уточнения модели Мадариаги или альтернативные

модели, рассчитанные значения радиуса очага и снятия напряжений находятся примерно посередине между их значениями в моделях Брюна и Мадариаги. При этом наиболее важным можно считать результат [32], авторы которого (Kaneko, Shearer) смогли существенно улучшить модель Мадариаги. Согласно [32], коэффициент  $k$  при той же скорости разрушения  $0.9 V_s$  равен 0.26. Для этой модели радиус очага получается на 24 % больше по сравнению с моделью Мадариаги [27, 28], а снятие напряжений в 1.9 раза меньше, чем для модели Мадариаги, но в 2.9 раза больше, чем для модели Брюна. В данной работе использована усовершенствованная модель Мадариаги–Канеко–Ширера [32].

Закон Гутенберга–Рихтера [38], устанавливающий зависимость между магнитудой и общим числом землетрясений для любого заданного региона и промежутка времени, описывается линейной функцией вида:  $\lg N(M) = a - b \cdot M$ , где  $N(M)$  – число землетрясений с магнитудами (или классами) не менее  $M$ ,  $a$  и  $b$  – константы уравнения. Параметр  $a$  ( $a$ -value) формально описывает сейсмическую активность при  $M = 0$ , а  $b$  ( $b$ -value) – тангенс угла наклона линейной части графика частотного распределения землетрясений, определяющий скорость уменьшения относительного числа событий с ростом их магнитуды. Для построения распределения Гутенберга–Рихтера рассчитывается функция  $N(M)$ . График этой функции строится в логарифмическом масштабе: количество землетрясений  $\lg N$  от магнитуды  $M$ . Затем определяются  $M_c$  – минимальная магнитуда, выше которой все землетрясения в пределах определенного региона надежно регистрируются,  $M_{\max}$  – максимальная магнитуда, для которой за исследованный период времени произошло достаточно событий для статистики. Затем интервал графика ( $M_c < x < M_{\max}$ ) функции  $y = \lg N(x)$  аппроксимируется функцией вида  $y = a - b \cdot x$ ;  $b$ -value используется в качестве оценки статистических параметров сейсмического режима [39, 40]. Параметры линейной части распределения Гутенберга–Рихтера –  $a$ -value и  $b$ -value – относятся к важнейшим количественным характеристикам сейсмического режима. Наклон графика выражает соотношение между количеством сильных и слабых сейсмических событий, или (уже

в физической интерпретации) соотношение между количеством больших и малых разрывов геологической среды. Уровень графика характеризует сейсмическую активность – суммарную интенсивность сейсмических проявлений на рассматриваемой сейсмоактивной территории.

В работе рассмотрено поведение параметра  $b$ -value в динамике. Поскольку поток сейсмических событий процесс нестационарный со значительными флуктуациями, то для надежного определения тангенса угла наклона графика повторяемости требуется достаточное количество событий. Поэтому значение параметра  $b$ -value определялось для интервала времени длительностью 500 дней, или  $\sim 1.5$  года. Найденная величина  $b$ -value ставилась в соответствие середине интервала. Затем окно сдвигалось на одни сутки, и процедура расчета повторялась. Начало и конец рассматриваемых временных интервалов определялось по имеющимся каталогам динамических параметров: для Северного Тянь-Шаня с 26.08.1998 по 29.07.2017, для зоны Южно-Курильских островов с 18.03.1969 по 17.08.1996.

Принимая во внимание, что этап подготовки землетрясения медленный, так как отражает процесс геологического преобразования планеты, то для детализации полученной картины изменения  $b$ -value вблизи крупных событий формировалось временное окно 500 дней до события и 50 после. В этом же окне производилась оценка изменения величины сброшенных напряжений  $\Delta\sigma$ : определялось медианное значение по всей выборке  $Me(\Delta\sigma_{\text{all}})$  и сравнивалось с вычисленным значением  $Me(\Delta\sigma_c)$  в предшествующий землетрясению период (500 дней).

## Результаты

Для исследуемых регионов построены гистограммы сброшенных напряжений  $\Delta\sigma$  и изменение параметра  $b$ -value во времени как для всего рассматриваемого интервала, так и для интервалов времени вблизи отдельных крупных событий. Рассмотрим результаты, полученные для каждого региона.

### Северный Тянь-Шань

Результат, полученный для Северного Тянь-Шаня, представлен на рис. 3. Отмечено медианное значение сброса напряжений по всем событиям ( $Me(\Delta\sigma_{\text{all}}) = 5.0$  МПа).

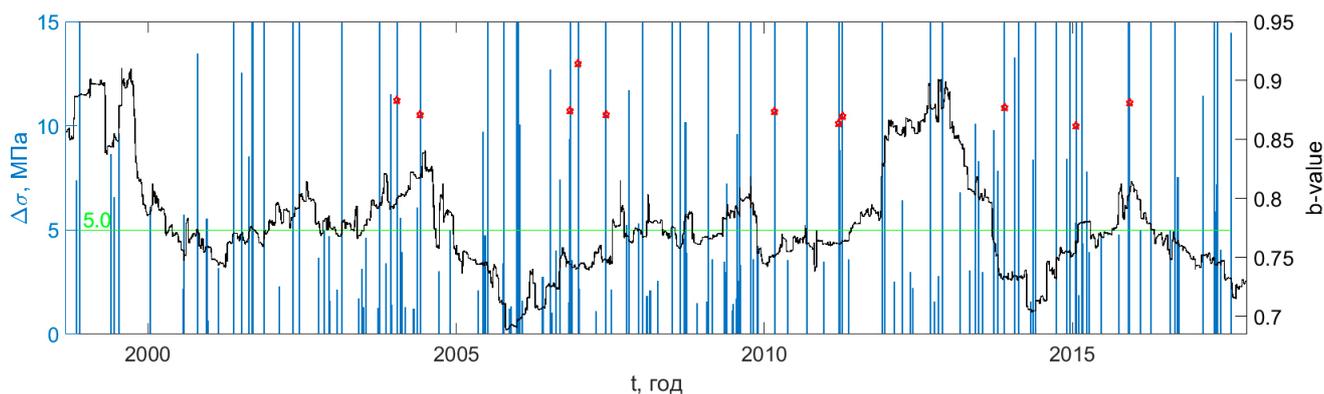


Рис. 3. Северный Тянь-Шань. Гистограмма сброса напряжений в очагах землетрясений во времени за период 1998–2017 гг. (183 события) и изменение параметра  $b$ -value за рассматриваемый интервал времени. Красные звездочки – события с  $M > 5$  из табл. 1. Зеленая линия – медианное значение сброса напряжений по всем событиям.

Значение  $\Delta\sigma$  по всей выборке изменяется в пределах от 0.65 до 631.66 МПа. Для большей наглядности графика в области малых значений сброса напряжений верхняя граница по оси  $\Delta\sigma$  ограничена значением 15.0 МПа.

Большинство отмеченных на диаграмме событий с  $M > 5$  попадают на периоды возрастания значений  $b$ -value, что может говорить о перераспределении событий в пользу землетрясений с малыми энергиями. Полученный результат полностью соответствует опубликованному в [41] по данным сейсмических наблюдений на Гармском полигоне в Таджикистане, где при исследовании временных вариаций  $b$ -value были обнаружены явления, когда крупным событиям предшествуют аномалии, связанные с возрастанием тангенса угла наклона графика повторяемости.

Приведем результаты для некоторых отдельных землетрясений. Для этого возьмем

из выборки событие 02.06.2004,  $M = 5.1$  (№ 3 в табл. 1), с магнитудой, близкой к пороговой  $M > 5$ , и наиболее сильное, 25.12.2006,  $M = 6.0$  (Кочкорское, № 5 в табл. 1). На рис. 4 показано распределение  $\Delta\sigma$  и  $b$ -value для временного периода 500 сут до и 50 сут после землетрясений. Отметим некоторые особенности, характерные для обоих событий.

Первое – в форшоковый период происходит постепенное возрастание значения  $b$ -value, что означает увеличение доли землетрясений малых энергетических классов. Второе – медианное значение сброшенных напряжений, рассчитанное в интервале 500 сут до выбранного события,  $Me(\Delta\sigma_i)$ , меньше медианного значения  $\Delta\sigma$  по всем 183 событиям за весь период времени.

Использование медианного среднего значения некоторого параметра, в том числе  $\Delta\sigma$ , а не среднеарифметического или средневзве-

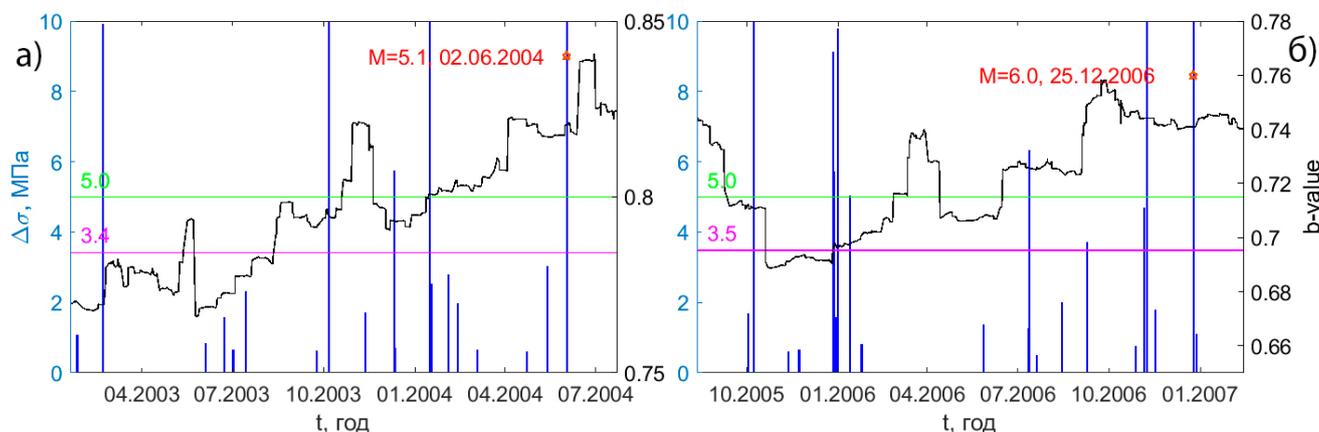


Рис. 4. Гистограмма сброса напряжений перед событием 02.06.2004,  $M = 5.1$  (№ 3 в табл. 1) (а) и событием 25.12.2006,  $M = 6.0$  (№ 5 в табл. 1) (б); изменение параметра  $b$ -value. Зеленая линия – медианное значение сброса напряжений по всем событиям, малиновая – медианное значение сброса напряжений по событиям перед землетрясением. Выбранный интервал времени: 500 сут до события и 50 сут после.

шенного, является стандартным в случае, когда в статистическом ансамбле значения этого параметра различаются радикально, на несколько порядков величины [42]. Медианное среднее описывает типовое значение параметра, вокруг которого группируется большинство значений из выборки.

Для события №3 медианное значение сброшенных напряжений ( $Me(\Delta\sigma_i) = 3.42$  МПа), оказывается меньше на 30 % медианного значения  $\Delta\sigma$  по всем 183 событиям за весь период времени ( $Me(\Delta\sigma_{all}) = 5.0$  МПа). Несмотря на то что непосредственно перед Кочкорским землетрясением произошло крупное землетрясение 08.11.2006,  $M = 5.2$  (№ 4 в табл. 1) и значения сброса напряжений этого события ( $\Delta\sigma = 44.61$  МПа) превосходят медианное значение по всем событиям, медианное значение в рассматриваемом интервале времени перед Кочкорским землетрясением ( $Me(\Delta\sigma_i) = 3.48$  МПа) оказывается также ниже величины  $Me(\Delta\sigma_{all})$  по всей выборке.

Результаты расчетов медианных значений сброшенных напряжений  $Me(\Delta\sigma_i)$  перед сильными и умеренными землетрясениями Северного Тянь-Шаня приведены в табл. 1.

Большинство событий из табл. 1 в предшествующий землетрясению период сопровождаются пониженным значением сброшенных напряжений относительно медианного значения по всей выборке значений.

### Южные Курильские острова

Результат, полученный для Южных Курильских островов, представлен на рис. 5. Отмечено медианное значение сброса напряже-

ний по всем событиям ( $Me(\Delta\sigma_{all}) = 10.0$  МПа). В табл. 2 приведены медианные значения сброшенных напряжений  $\Delta\sigma_i$  перед сильными и умеренными землетрясениями в данном районе.

Для вычисления параметра  $b$ -value использовалось окно длительностью почти 1.5 года, однако временное поведение имеет ступенчатый характер, поскольку каталог содержит события лишь с  $M > 3.6$ , и данных оказывается недостаточно, чтобы построить гладкую кривую поведения  $b$ -value. Детализируем изменение  $b$ -value и  $\Delta\sigma$  в форшоковые периоды для событий из табл. 2 в окне 500 сут до события и 50 после.

На рис. 6 приведены гистограммы распределения сброса напряжений перед землетрясениями Шикотанским 04.10.1994,  $M = 7.9$ , и 03.12.1995,  $M = 7.6$ . Так же как и в другом сейсмоактивном регионе – Северном Тянь-Шане, здесь наблюдается значительное снижение величин сброшенных напряжений перед землетрясением.

По-прежнему сохраняется тенденция, когда возрастание тангенса угла наклона графика повторяемости сопровождается уменьшением величины сброшенных напряжений перед землетрясением.

В рассматриваемом интервале времени произошло еще одно сильное землетрясение – Монеронское, 05.09.1971,  $M = 7.5$  [43] (№ 2 в табл. 2). Однако его гипоцентр лежит далеко за пределами исследуемой территории: под дном Татарского пролива, чуть северо-восточнее о. Монерон, вблизи побережья о. Сахалин. Глубина гипоцентра была 15–20 км. За всю предшествующую историю наблюде-

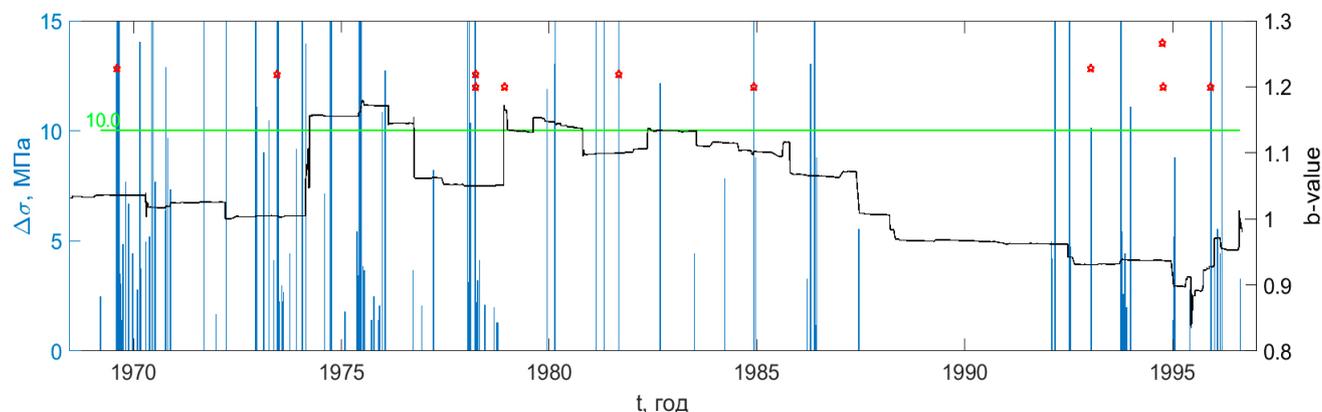
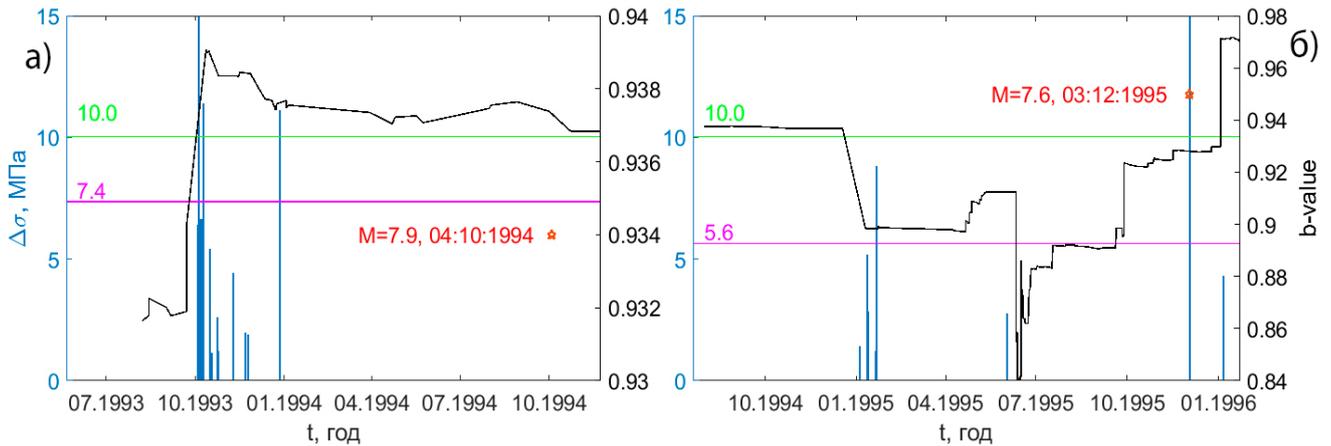


Рис. 5. Южные Курилы. Гистограмма сброса напряжений в очагах землетрясений во времени за период 1969–1996 гг. (264 события) и изменение параметра  $b$ -value за рассматриваемый интервал времени. Красные звездочки – события с  $M \geq 6.5$  из табл. 2. Зеленая линия – медианное значение сброса напряжений по всем событиям.



**Рис 6.** Гистограмма сброса напряжений перед землетрясениями Шикотанским 04.10.1994,  $M = 7.9$  (№ 10 в табл. 2) (а), и 03.12.1995,  $M = 7.6$  (№ 12 в табл. 2) (б); изменение параметра  $b$ -value. Зеленая линия – медианное значение сброса напряжений по всем событиям, малиновая – медианное значение сброса напряжений по событиям перед землетрясением. Выбранный интервал времени: 500 сут до события и 50 после.

ний в окрестностях о. Сахалин землетрясений такой большой энергии не наблюдалось. Монеронское землетрясение вызвало цунами [43], несмотря на мелководье этой части Татарского пролива.

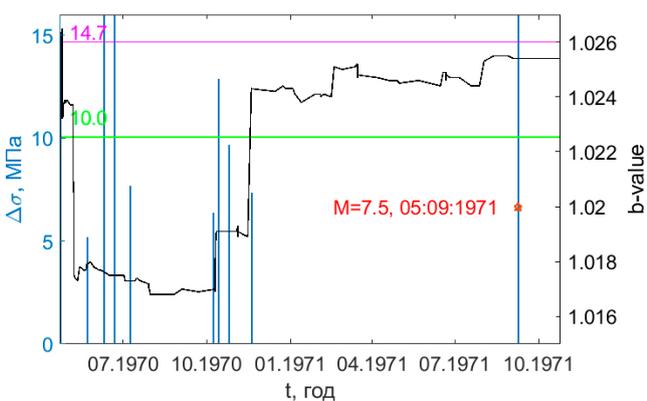
На рис. 7 показано распределение сброшенных напряжений перед Монеронским землетрясением 05.09.1971 и поведение параметра  $b$ -value.

Расстояние от рассматриваемой территории до эпицентра Монеронского землетрясения более 600 км. Несмотря на то что для расчетов использовались значения из каталогов землетрясений и динамических параметров событий на территории, ограниченной координатами  $42^{\circ}$ – $46^{\circ}$  с.ш.,  $144^{\circ}$ – $151^{\circ}$  в.д. и отстоящей на значительном расстоянии от о. Мо-

нерон, наблюдается возрастание тангенса угла наклона графика повторяемости. Однако в данном случае снижения величины сброшенных напряжений нет. Вероятнее всего, «эффект» снижения величины сброшенных напряжений проявляется в окрестности землетрясений, а не на значительном удалении от него.

### Обсуждение и выводы

Накопление стационарных тектонических напряжений, чем в конечном счете обусловлена наибольшая часть землетрясений, связывается со взаимодействием тектонических плит. Перед сильным землетрясением деформационный процесс в области вокруг будущего очага становится неоднородным и нестационарным (характерный период, по-видимому, соответствует времени наблюдения среднесрочных предвестников: от нескольких месяцев до нескольких лет). Пространственная неоднородность проявляется в концентрации напряжений в зоне разлома (в частности, на “asperities”, препятствующих скольжению берегов разлома) и, возможно, в некоторой разгрузке зон вне локализации концентраторов. Это может интерпретироваться как уменьшение характерного размера области концентрации напряжений, на котором происходят изменения напряжений и неупругие деформационные процессы, сейсмологическим проявлением которых является так называемая сейсмическая брешь II рода, т.е. дефицит



**Рис 7.** Гистограмма сброса напряжений перед Монеронским землетрясением 05.09.1971,  $M = 7.5$ ; изменение параметра  $b$ -value. Зеленая линия – медианное значение сброса напряжений по всем событиям, малиновая – медианное значение сброса напряжений по событиям перед землетрясением. Выбранный интервал времени: 500 сут до события и 50 после.

«умеренных» землетрясений с магнитудой на несколько единиц меньше, чем у ожидаемого главного события. Среднесуточное число слабых землетрясений на этом этапе подготовки землетрясения обычно сохраняется на прежнем уровне или (ближе к моменту главного события) увеличивается. Таким образом, увеличение значения параметра  $b$ -value – тангенса угла наклона прямой графика повторяемости – получает естественное объяснение [40, 41, 44]. Уменьшение характерного размера может рассматриваться как интерпретация вышеупомянутого прироста значений  $b$ -value.

Итак, мы установили, что увеличение параметра  $b$ -value перед сильными землетрясениями сопровождается уменьшением среднего медианного значения сброшенных напряжений  $Me(\Delta\sigma)$ . Этот эффект отмечен для двух сейсмоактивных регионов Евразии: Северного Тянь-Шаня и Южных Курильских островов, причем в первом случае он проявляется более контрастно. Скорее всего, это определяется тем, что каталоги динамических параметров для Северного Тянь-Шаня и для Южных Курильских островов различаются диапазоном энергетических уровней регистрируемых событий: Северный Тянь-Шань –  $2.6 \leq M \leq 6.0$  [7], северо-западная часть Тихого океана –  $4.5 \leq M \leq 8.2$  [3]. При определении динамических параметров для широкого класса событий (по энергиям землетрясений) картина, предположительно, будет идентичной.

При дальнейшем сейсмическом мониторинге рассмотренных регионов изменения во времени величины  $\Delta\sigma$  могут использоваться для выявления нестационарности сейсмического режима (в частности, перехода из стационарного режима к форшоковому процессу [45]). Для этого необходимо проводить расчет динамических параметров очагов землетрясений в режиме, максимально приближенном к реальному времени.

Представляется, что для других регионов, где развернуты современные сейсмические сети, также перспективно массовое определение сброса напряжений и других динамических параметров очагов землетрясений, включая события умеренных и слабых энергий. Динамика изменения про-

странственного распределения сброшенных напряжений может быть использована при формировании среднесрочных прогнозов землетрясений.

## Список литературы

1. Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Кузиков С.И. 2020. *Вычислительные технологии в сейсмологических исследованиях (на примере KNET, Северный Тянь-Шань)*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 358 с.
2. Кальметьева З.А., Мельникова Т.А., Мусненко Е.В., Юдахин Ф.Я. 1992. Модели очаговых зон сильных землетрясений. В кн.: *Типовые геолого-геофизические модели сейсмичных и асейсмичных районов*. Бишкек: Илим, с. 124–131.
3. Буримская Р.Н. 2001. Спектральный состав излучения и очаговые параметры землетрясений северо-западной части Тихого океана за 1969–1996 годы. В кн.: *Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений северо-запада Тихого океана*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, т. 1: 48–67.
4. Ключевский А.В., Демьянович В.М. 2002. Динамические параметры очагов землетрясений Байкальской сейсмической зоны. *Физика Земли*, 2: 55–66.
5. Brune J.N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 75(26): 4997–5009. <https://doi.org/10.1029/jb075i026p04997>
6. Brune J. N. 1971. Corrections. *J. of Geophysical Research*, 76: 5002.
7. Сычева Н.А., Богомолов Л.М. 2020. О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии. *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 393–446. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.393-416.417-446>
8. Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H. 1981. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of regional and global seismicity. *J. of Geophysical Research*, 86: 2825–2852. <https://doi.org/10.1029/jb086ib04p02825>
9. Кочарян Г.Г. 2012. Об излучательной эффективности землетрясений (пример геомеханической интерпретации результатов сейсмологических наблюдений). *Динамические процессы в геосферах*, 3: 36–47.
10. Кочарян Г.Г. 2014. Масштабный эффект в сеймотектонике. *Геодинамика и тектонофизика*, 5(2): 353–385. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0133>
11. Кочарян Г.Г. 2016. *Геомеханика разломов*. М.: ГЕОС, 424 с.
12. Кочарян Г.Г., Иванченко Г.Н., Кишкина С.Б. 2016. Энергия, излучаемая сейсмическими событиями различного масштаба и генезиса. *Физика Земли*, 4: 141–156. doi:10.7868/S0002333716040037
13. Богомолов Л.М., Сычева Н.А., Закупин А.С., Камнев П.А., Сычев В.Н. 2015. Распределение спада напряжений в очагах землетрясений и проявления триггерных эффектов. В кн.: *Триггерные эффекты в геосистемах: материалы третьего Всероссийского семинара-совещания (Москва 16–19 июня 2015 г.)*. М.: ГЕОС, с. 48–56.

14. Сычева Н.А. **2020**. Тензор сейсмического момента и динамические параметры землетрясений Центрального Тянь-Шаня. *Геосистемы переходных зон*, 4(2): 178–209. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.178-191.192-209>
15. Molnar P., Tapponnier P. **1975**. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision: features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision. *Science*, 189(4201): 419–426. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419>
16. Сычева Н.А. **2022**. Некоторые характеристики каталога землетрясений и сейсмического процесса по данным сети KNET. *Геодинамика и тектонофизика*, 13(3). <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-3-0640>
17. Нусипов Е.Н., Оспанов А.М., Ли А.Н., Нысанбаев Т.Е. **2004**. Луговское землетрясение 23 мая 2003 года. В кн.: *Современная геодинамика и сейсмический риск Центральной Азии: Доклады Пятого Казахстанско-Китайского Международного симпозиума, 24–27 сент. 2003 г.* Алматы: ИС МОН РК, с. 19–25.
18. Гребенникова В.В., Фролова А.Г., Багманова Н.Х., Берёзина А.В., Першина Е.В., Молдобекова С. **2018**. Каджисайское землетрясение 14 ноября 2014 г. с  $K_p=13.7$ ,  $M_{PVA}=6.2$ ,  $I_0=7$  (Кыргызстан – Южное Прииссыккулье). *Вестник НЯЦ РК*, 2(июнь): 135–143. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2018-2-135-143>
19. Фортуна А.Б., Абдиева С.В., Клоков И.А., Корженков А.М., Стрельников А.А. **2019**. Сейсмичность Иссык-Кульской области. *Вестник Института сейсмологии НАН КР*, 2(14): 98–107.
20. Гусева И.С., Архипова Е.В. **2019**. Анализ системного единства современного развития Курило-Камчатской островной дуги и острова Сахалин на основе сейсмологических данных. *Успехи современного естествознания*, 6: 46–50.
21. Прытков А.С., Василенко Н.Ф., Фролов Д.И. **2017**. Современная геодинамика Курильской зоны субдукции. *Тихоокеанская геология*, 36(1): 23–28.
22. Тихонов И.Н., Левин Б.В. **2015**. Прогноз сильных землетрясений Сахалинской области: история, результаты и перспективы. В кн.: *Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: сб. материалов Всерос. науч. конф. с междунар. участием*. В 2 т. Южно-Сахалинск; Владивосток: Дальнаука, т. 1: 41–45.
23. Сафонов Д.А., Коновалов А.В. **2017**. Использование программы ISOLA для определения тензора сейсмического момента землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов. *Тихоокеанская геология*, 36(3): 102–112.
24. *International Seismological Centre ISC-EHB: Event catalogue*. URL: <http://www.isc.ac.uk/citations/> (дата обращения: 02.11.2022).
25. Костров Б.В. **1975**. *Механика очага тектонического землетрясения*. М.: Наука, 175 с.
26. Ризниченко Ю.В. **1985**. *Проблемы сейсмологии*. Избранные труды. М.: Наука, 408 с.
27. Madariaga R. **1976**. Dynamics of an expanding circular fault. *Bull. of the Seismological Society of America*, 66: 639–666.
28. Madariaga R. **1979**. On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity. *J. of Geophysical Research*, 84: 2243–2250. <https://doi.org/10.1029/jb084ib05p02243>
29. Boore D.M. **2003**. Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*, 160(3): 635–676. <https://doi.org/10.1007/pl00012553>
30. Abercrombie R.E., Rice J.R. **2005**. Can observations of earthquake scaling constrain slip weakening? *Geophysical J. International*, 162: 406–424. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2005.02579.x>
31. Lancieri M., Madariaga R., Bonilla F. **2012**. Spectral scaling of the aftershocks of the Tocopilla 2007 earthquake in northern Chile. *Geophysical J. International*, 189: 469–480. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05327.x>
32. Kaneko Y., Shearer P.M. **2014**. Seismic source spectra and estimated stress drop derived from cohesive zone models of circular sub shear rupture. *Geophysical J. International*, 197(2): 1002–1015. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu030>
33. Gibowicz S.J., Kijko A. **1994**. *An introduction to mining seismology*. San Diego: Academic Press, 399 p.
34. Москвина А.Г. **1969**. Поле смещения упругих волн, создаваемое распространяющейся дислокацией. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 6: 3–10.
35. Москвина А.Г. **1969**. Исследование полей смещения упругих волн в зависимости от характеристик очага землетрясения. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 9: 3–16.
36. Sato T., Hirasawa T. **1973**. Body wave spectra from propagating shear cracks. *J. of Physics of the Earth*, 21: 415–431. <https://doi.org/10.4294/jpe1952.21.415>
37. Kwiatek G., Ben-Zion Y. **2013**. Assessment of *P* and *S* wave energy radiated from very small shear-tensile seismic events in a deep South African mine. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(7): 3630–3641. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50274>
38. Gutenberg B., Richter C.F. **1944**. Frequency of earthquakes in California. *Bull. of the Seismological Society of America*, 34: 185–188. <https://doi.org/10.1785/bssa0340040185>
39. Смирнов В.Б., Завьялов А.Д. **2012**. К вопросу о сейсмическом отклике на электромагнитное зондирование литосферы Земли. *Физика Земли*, 7-8: 63–88.
40. Смирнов В.Б., Пономарев А.В. **2020**. *Физика переходных режимов сейсмичности*. М.: РАН, 412 с.
41. Попандопуло Г.А. **2018**. Детальные исследования временных вариаций параметра *b-value* закона Гутенберга–Рихтера по данным высокоточных сейсмических наблюдений на Гармском полигоне в Таджикистане. *Физика Земли*, 4: 79–99.
42. Любушин А.А. **2007**. *Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга*. М.: Наука, 228 с.
43. Щетников Н.А. **1981**. *Цунами*. М.: Наука, 88 с.
44. Тихонов И.Н. **2006**. *Методы анализа каталогов землетрясений для целей средне- и краткосрочного прогнозов сильных сейсмических событий*. Владивосток; Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 214 с.
45. Богомолов Л.М., Сычева Н.А. **2022**. Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции, предвестники и проблемы. *Геосистемы переходных зон*, 6(3): 145–182. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.3.145-164.164-182>

## On stress drops in the sources of moderate and weak earthquakes: features of distribution in time

Leonid M. Bogomolov<sup>1</sup>, Vladimir N. Sychev\*<sup>1</sup>, Naylya A. Sycheva<sup>2</sup>

\*E-mail: [koitash@mail.ru](mailto:koitash@mail.ru)

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

<sup>2</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Russia

**Abstract.** An analysis has been performed of the change in stress drops over time during the period of foreshock activity of strong earthquakes for two seismically active regions with different geodynamic settings: the Northern Tien Shan and the Southern Kuril Islands. The catalogs of earthquake dynamic parameters, DP (source ones in English publications), in these regions, with a number of events, were used as initial data. The DP catalog for the Northern Tien Shan includes 183 records of source parameters of earthquakes with magnitudes of 2.6–6.0, and the catalog for the Southern Kurils – 264 records. The stress drop values throughout a general sampling were analyzed as well as that in foreshock periods of 500 days length before the strongest earthquakes. For each region 12 such meaningful events have been specified, the magnitudes were  $M > 5$  for the Northern Tien Shan, and  $M \geq 6.5$  for the Southern Kurils. The median average values of stress drops during 500-day period have been determined. The temporal variations of stress drops have been compared with changes in the  $b$ -value parameter (angular coefficient of earthquake recurrence plot) in the same observation periods. The computation of  $b$ -value for the case of the Northern Tien Shan involved the catalog data of KNET seismological network (1994–2021, more than 10 000 events), and the catalog of International Seismological Center (ISC, 1964–2000) for the Southern Kurils. In both cases,  $b$ -values were determined in 500-day moving interval with one day step. The computation gave the result that the well-known effect of  $b$ -value growth before strong earthquakes manifested itself explicitly in the considered regions. It has been established that such increase in  $b$ -value is accompanied by a decrease in the averaged stress drop values. The obtained results showed that the monitoring of the stress drop values can be used to identify the non stationary stage of the seismic regime.

**Keywords:** earthquake, seismicity, foreshocks period, stress drops,  $b$ -value, Northern Tien Shan, Southern Kuril Islands

**For citation:** Bogomolov L.M., Sychev V.N., Sycheva N.A. On stress drops in the sources of moderate and weak earthquakes: features of distribution in time. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 1, pp. 25–53. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.025-036.037-053>; <https://www.elibrary.ru/xdworg>

### Acknowledgements and funding

The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS (no. 121022000085-9) and the state task of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS (no. 122040600089-4).

### Introduction

Recent works [1] have demonstrated the possibility and feasibility of mass determination of dynamic parameters (DP) of earthquake sources in the case of seismically active regions where modern seismological networks are deployed.

For such regions, the computation of DP values allows creating the DP data banks with a sufficiently large number of records comparable to the number of accumulated seismic events during the same observation period. This, in turn, enhances the ability to describe regional features of the geodeformation process. DP includes the scalar seismic moment  $M_0$ , the source radius  $r$  (defined, in particular, according to the Brune's model [2–6] or alternative models [7]), as well as the tangent

stress drop  $\Delta\sigma$  and the specific seismic energy, representing the ratio of the radiated seismic energy  $E_s$  to the seismic moment  $M_0$ :  $e_{PR} = E_s/M_0$ .

It is worth noting that the traditional point of view is still popular, according to which it makes sense to define and consider dynamic parameters only for strong earthquakes [2–4, 8]. However, the importance of a statistically relevant DP dataset has been clearly highlighted in the fundamental question of the existence of the earthquake source self-similarity. As argued in [9–12], the sign of self-similarity is the absence of regression between the values of the specific seismic energy (or proportional  $e_{PR}$  values of stress drops). In our previous works [7, 13], approximate dependencies (regressions) were identified between stress

drops  $\Delta\sigma$  and the scalar seismic moment  $M_0$  for two seismic regions of Northern Eurasia with different geodynamic settings – the Northern Tien Shan and the Northwest Pacific. In this case, the values  $\Delta\sigma$  and  $M_0$  from the earthquake dynamic catalogs for the Northern Tien Shan [1, 7, 14] and the Northwest Pacific [3] were considered for the respective observation periods.

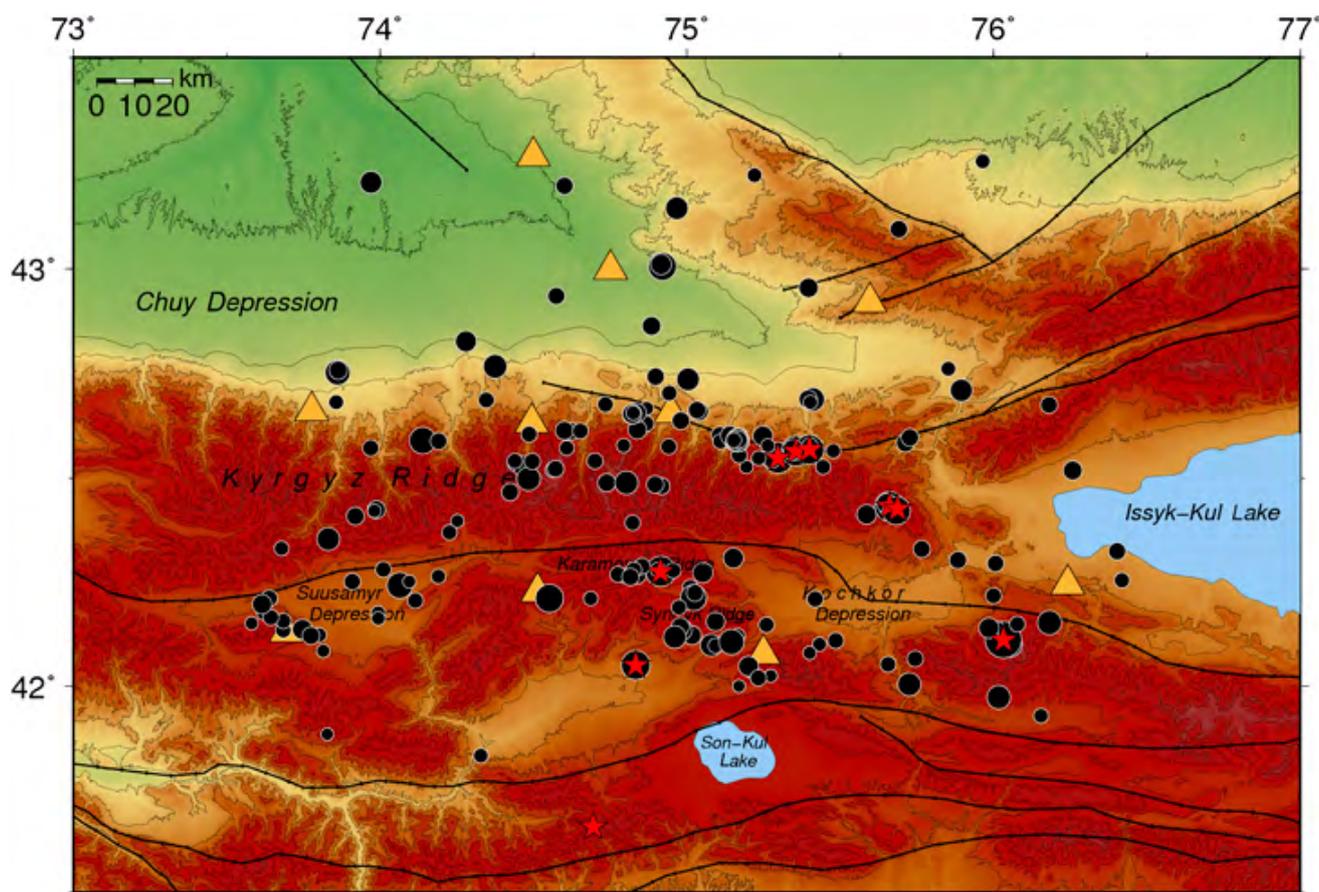
A natural continuation of the statistical analysis of  $\Delta\sigma$  values from [1, 7] is the search of time features of stress drop distributions. Are there the periods when the relationships between  $\Delta\sigma$  and  $M_0$  are different from those identified over the entire catalog? This paper attempts to answer this question. Presumably, the features of stress drop distribution appear primarily during the periods of foreshock and aftershock activation. Therefore, our work pays attention to the values of stress drops during the preparation of significant earthquakes, when the features of  $\Delta\sigma$  distribution can manifest themselves more contrastively.

Seismically active regions with different geodynamic settings have been selected for analysis: the Tien Shan, that is an intracontinental orogenesis region, the Northwest Pacific (the Southern Kuril Islands region), that is a subduction zone. A regular earthquake catalog and mass determination of earthquake dynamic parameters are important condition for research purposes. Such datasets are available for both regions. This will allow testing the hypothesis of reduction of the stress drop value during the preparation of earthquakes and also to determine its dependence on the type of geodynamic setting.

## Study object and data used

### *The Northern Tien Shan*

The Northern Tien Shan is a region of modern intensive deformations. The main tectonic forces in the region are due to the collision between the Indian and Eurasian plates, which determine the seismic activity in the region [15].



**Fig. 1.** Epicentral location of earthquakes (183 events), for which DP were computed. Triangles are the position of the stations of the KNET network. Black lines are regional faults. The minimum circle corresponds to an event with  $M = 2.7$ , the maximum – with  $M = 6.0$ . Red stars are events with  $M > 5$ , information about which is given in Table 1.

**Table 1.** Parameters of earthquakes with  $M > 5$  in the Northern Tien Shan according to the data of the KNET network for the period of 1998–2017

No.	Date	Time	$\varphi^\circ$ , N	$\lambda^\circ$ , E	$h$ , km	$K$	$M$	$\Delta\sigma$ , MPa	$Me(\Delta\sigma_i)$ , MPa	$N$
1	22.05.2003	18:11:55.01	42.989	72.814	7.0	14.26	5.7	N/D	4.71	9
2	16.01.2004	09:06:17.90	42.549	75.297	14.0	13.68	5.4	54.82	3.42	15
3	02.06.2004	17:15:10.82	42.276	74.914	17.9	13.25	5.1	N/D	3.42	19
4	08.11.2006	02:21:26.94	42.565	75.356	18.6	13.37	5.2	44.61	4.01	21
5	25.12.2006	20:00:58.32	42.112	76.032	0.1	14.83	6.0	631.66	3.48	22
6	06.06.2007	11:09:25.58	42.569	75.400	13.0	13.25	5.1	33.06	3.17	16
7	02.03.2010	01:55:36.02	42.433	75.661	19.3	13.34	5.2	109.21	3.42	18
8	09.04.2011	12:30:25.45	42.051	74.834	6.3	13.20	5.1	5.28	6.21	8
9	05.02.2012	07:10:15.20	41.396	74.761	13.4	13.21	5.1	N/D	8.50	8
10	23.11.2013	09:42:6.75	42.427	75.687	9.9	13.46	5.3	88.79	7.84	11
11	17.11.2015	17:29:36.61	40.426	73.187	3.1	13.53	5.3	N/D	6.58	12
12	07.12.2015	08:30:53.22	41.660	74.695	15.9	13.60	5.3	N/D	7.80	13

The KNET (Kyrgyz Network) seismic network, that consists of ten digital broadband stations (Fig. 1) and allows recording local and regional seismicity [1], is located on the territory of the Northern Tien Shan. To date, the earthquake catalog obtained from the data of the KNET network (KNET catalog) includes more than 10 thousand seismic events, that have occurred in 1994–2021. Some characteristics of the earthquake catalog and seismic process are given in the work [16].

The values of dynamic parameters of the sources for 183 earthquakes of different energy classes ( $K = 8.7–14.8$ ,  $M = 2.6–6.0$ ), which had occurred during the period of 1998–2017 (Fig. 1), were obtained in the work [7]. Most of the earthquake epicenters are located on the northern slopes of the Kyrgyz Ridge, the Karamoynok Ridge, Sandyk Mountain and in the area of Suusamy and Kochkor depressions.

A sample of events with  $M > 5$  occurred in the study area in 1998–2017 was formed from the KNET catalog. The choice of this magnitude threshold is due to the fact that no events occurred with  $M \geq 6$  during the network operation, except for the 25 December, 2006  $M = 6.0$  Kochkor earthquake. Thus, a working catalog of 12 «test» events (Table 1) was compiled. In addition to the parameters of the 12 most powerful earthquakes, the table shows the number of events,  $N_i$ , falling into the 500-day period before the main event  $i$ , and the median value of stress drops  $Me(\Delta\sigma_i)$ , determined

by  $N_i$  events. These medians are used further to detect regular  $\Delta\sigma$  changes prior to strong earthquakes.

The events that had been occurred in the territory, bounded by the coordinates of edge stations of the KNET network, and its immediate surroundings were considered when computing the earthquake dynamic parameters for the Northern Tien Shan. This is due to the aim to minimize the influence of the direction of the earthquake source when constructing the source spectrum by several stations of the KNET network [7].

The earthquakes of significant magnitude that were not included in the table also occurred in the study region: the 22 May, 2003  $M = 6.3$  Lugovskoye [17]; the 14 November, 2014  $M = 5.5$  Kajy-Say [18]; the 28 January, 2013  $M = 6.1$  Karkyra-Saraja; the 23 November, 2013  $M = 5.2$  Ulaholskoye [19]. These events had occurred at a distance from the area for which dynamic parameters of earthquakes are defined, so their foreshock activity was not analyzed in this study.

#### *The Southern Kuril Islands*

The Kuril-Kamchatka subduction zone is one of the most seismically active regions of Northeastern Eurasia, where the rate of subduction of the Pacific lithospheric plate under the North American and Okhotsk ones reaches 8 cm/year [20]. Interaction of lithospheric plates is accompanied by tectonic deformations, which appear both at the plate boundary and in its vicinity [21]. Earthquakes are most active along the Kuril island arc, with the vast majority occurring at depths of up to 100–150 km

with maximum seismic activity at depths of about 30–40 km. The high level of seismic activity in the area of the Kuril Islands is confirmed by the long-term statistics of recorded seismic events. On average, an earthquake with a magnitude of  $M = 4.0$  occurs here every three days, with  $M = 5.0$  – approximately once a month, with  $M = 6.0$  – every six months, and with  $M = 7.0$  – every two years. Catastrophic earthquakes with  $M = 8.0$  or more occur every 10 years, on average [22].

The present work focuses on the area around the Southern Kuril Islands, bounded by coordinates  $42^{\circ}$ – $46^{\circ}$  N,  $144^{\circ}$ – $151^{\circ}$  E. Dynamic parameters of the sources in the northwestern part of the Pacific Ocean for the period of 1969–1996 for an area within  $42$ – $51^{\circ}$  N,  $140$ – $159^{\circ}$  E [3] were used to analyze the dependence of stress drop in the sources on time. This catalog was compiled by R.N. Burymskaya according to the data of analog (frequency-selective) seismic stations. It remains unique today as it includes dynamic parameters (including stress drop values) for 431 earthquakes, which is significantly greater compared to other regional DP catalogs. 264 events (Fig. 2) from the catalog [3] fall into the area of our interest around the Southern Kuril Islands. The information

about the hypocenters and dynamic parameters of these events is given in Table in the Appendix. The stress drop values given in [3] for the Brune's model are recalculated to the Madariaga model.

Interest to this area is also due to the 4 October, 1994  $M_w = 8.3$  Shikotan earthquake, which is one of the strongest seismic events in the world at the end of the 20<sup>th</sup> century. It is worth noting that in recent works dedicated to the earthquakes in Sakhalin-Kuril region, attention is generally focused on the seismic moment tensor computations [23], and there are no assessments of stress drops.

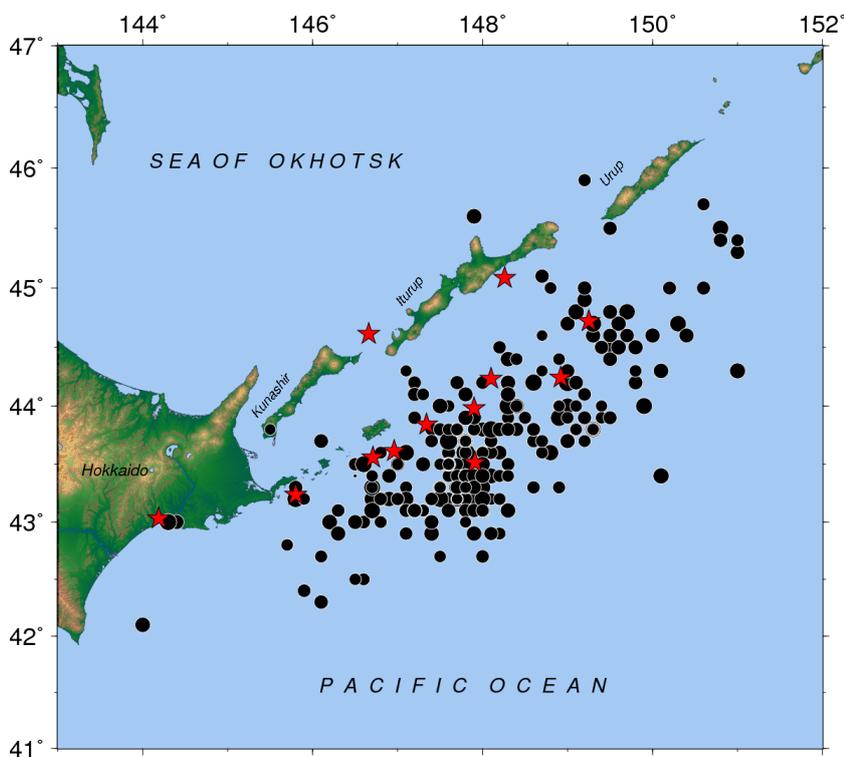
A catalog of earthquakes (12 320 events) that occurred in the territory of Sakhalin and the Kuril Islands ( $25^{\circ}$ – $60^{\circ}$  N,  $130^{\circ}$ – $170^{\circ}$  E) from 01.01.1964 to 31.12.2000 was received from the ISC seismological center to analyze the foreshock activity of strong earthquakes in the Southern Kurils ( $42^{\circ}$ – $46^{\circ}$  N,  $144^{\circ}$ – $151^{\circ}$  E).

Since the regions of the Northern Tien Shan and the Northwest Pacific differ in seismic settings, the thresholds for selecting the «test» earthquakes for them are different: it is defined at  $M \geq 6.5$  level for the Southern Kuril Islands. If we take the threshold value  $M > 5.0$  as for the Northern Tien Shan, then the catalog will consist of more than

1 000 events, with a large number of overlapping time intervals, that complicates the analysis. Thus, a sample of 12 earthquakes with  $M \geq 6.5$  was formed from the ISC catalog. The epicenters of these earthquakes are marked by red stars in Fig. 2, and some of their parameters are given in Table 2. The Moneron and Shikotan earthquakes, which will be discussed in more detail below, are highlighted in color.

## Methodology

The earthquake dynamic parameters can characterize not only the source area, but also the change (shear stress drop,  $\Delta\sigma$ ) in the geodynamic regime of the seismically active region. In this regard, the variations of  $\Delta\sigma$  during the period of foreshock activity are interesting.



**Fig. 2.** Epicentral location of earthquakes in the Southern Kuril Islands with computed dynamic parameters (264 events) from the catalog [3]. Red stars are the events with  $M \geq 6.5$  from the ISC catalog [24] (Table 2).

**Table 2.** Parameters of earthquakes with  $M \geq 6.5$  in the region of the Southern Kuril Islands according to the ISC data for the period of 1969–1996

No.	Date	Time	$\varphi^\circ$ , N	$\lambda^\circ$ , E	$h$ , km	$M$	$\Delta\sigma$ , MPa	$Me(\Delta\sigma)$ , MPa	N
1	11.08.1969	21:27:36.11	43.514	147.915	28.6	8.2	4.97	10.39	3
2	05.09.1971	18:35:28.52	46.559	141.174	18.1	7.5	N/D	14.67	11
3	17.06.1973	03:55:3.01	43.236	145.796	35.0	7.8	197.92	18.70	8
4	23.03.1978	03:15:21.65	45.085	148.257	25.0	7.7	62.59	19.81	10
5	24.03.1978	19:47:49.27	44.243	148.916	12.3	7.8	73.54	21.47	18
6	06.12.1978	14:02:5.85	44.613	146.656	120.5	7.8	N/D	5.98	34
7	03.09.1981	05:35:46.49	43.614	146.961	47.3	6.8	140.12	32.85	2
8	03.12.1984	04:08:35.88	44.233	148.102	59.4	6.5	41.35	15.72	1
9	15.01.1993	11:06:7.48	43.031	144.186	98.8	6.8	N/D	16.85	7
10	04.10.1994	13:23:0.44	43.842	147.340	35.0	7.9	N/D	7.35	29
11	09.10.1994	07:55:41.18	43.981	147.900	33.1	7.0	N/D	7.35	29
12	03.12.1995	18:01:10.18	44.721	149.247	30.0	7.6	279.58	5.64	6

The method of dynamic parameters computation is given in classical works [25, 26]. The computation results of dynamic parameters of the earthquakes in the Northwest Pacific are presented in [3]. The adaptation and application of this methodology for the Northern Tien Shan are covered in detail in [1, 7].

Two models are most often used to determine dynamic parameters of the source on the base of spectrum parameters: Brune's model [5, 6] and Madariaga one [27, 28]. The work [4] also provides a well-reasoned comparison of the models. We will briefly review the main features of using one or the other model.

In both models, a  $k$  coefficient is used to compute the source radius. It is a numerical coefficient that depends on the rupture model in a source. The choice of the  $k$  coefficient can significantly affect the error of the computation of the source radius value and, as a consequence, the stress drops.

In the work [5] the value of the  $k$  coefficient is determined on the basis of the simplest model of the source movement (the source zone is considered to be a ball with the radius  $r$ ), and the shift of «hemispheres»,  $b$ , along the rupture plane occurs immediately over the entire surface, bounded by the radius  $r$ , and  $b \ll r$ . The [5] computation gave  $k = 0.37$  for this model, which is called the Brune's model and commonly used in the 20<sup>th</sup> century and in the zero years of 21<sup>st</sup> century.

However, the subsequent studies [29–33] have paid attention to the fact, that the values of

the source radius, based on the simplest model, turn out to be overestimated, in particular, when compared to the observations of a rupture breaking the ground surface. As a result, the estimates of stress drop may be several times lower than the actual values [30]. Models describing a coseismic displacement, i.e. the source mechanism, have been developed more adequately in [27, 28, 32, 34–36]. But the Brune's model, as noted in [1], can still be used, for example, when comparing the computations of dynamic parameters with the previously obtained results for a given region.

In the Madariaga model [27, 28], a disk rupture is considered as a source of seismic waves, the radius of which increases at a constant rate of  $V_R$  until it reaches a maximum value,  $r_M$ , identified with the source radius (radius of destruction, in the terms of [27]). No further growth of the crack occurs. In this model, the angular frequency depends on both the source radius and the  $V_R$  rupture rate, for which, according to [30, 32, etc.] the approximate value of  $V_R \approx 0.9 \cdot V_S$  is generally accepted, where  $V_S$  is the rate of the  $S$ -wave. At this fracture rate, the coefficient  $k$  for the Madariaga model turns out to be  $k = 0.21$ . Due to the difference in  $k$  values, the source radius in the Brune's and Madariaga models differs by 1.76 times ( $r = 1.76 r_M$ ). But the stress drop values for these models differ by about 5 times, since  $\Delta\sigma \sim 1/r^3$ . In other studies [32, 34–37], where the refinements of the Madariaga model or alternative models were analyzed, the computed values of the

source radius and stress drops are approximately in between their values in the Brune's and Madariaga models. In this case, the result obtained by Kaneko and Shearer [32], who were able to significantly improve the Madariaga model, can be considered to be important. According to [32], the  $k$  coefficient is 0.26 at the same rupture rate of  $0.9 \cdot V_s$ . In the case of this model, the source radius is 24 % larger than for the Madariaga model [27, 28], and stress drop is 1.9 times less than for the Madariaga model, but 2.9 times more than for the Brune's model. Our work uses an improved Madariaga–Kaneko–Shearer model [32].

The Gutenberg–Richter law [38] expresses the relationship between the magnitude and total number of earthquakes in any given region and time period. This law is described by a linear function of the form:  $\lg N(M) = a - b \cdot M$ , where  $N(M)$  is the number of earthquakes with magnitudes (or classes) of at least that  $M$ , and  $a$  and  $b$  are equation constants. The parameter  $a$  ( $a$ -value) formally describes seismic activity when  $M = 0$ , and the  $b$  ( $b$ -value) is a slope of the linear part of the earthquake frequency distribution plot, which determines the rate of decrease in the relative number of events as their magnitude increases. The function  $N(M)$  is computed to construct the Gutenberg–Richter distribution. This function graph is plotted on a logarithmic scale: the number of earthquakes  $\lg N$  on magnitude  $M$ . Then we determine  $M_c$  – the minimum magnitude above which all earthquakes within a certain region are reliably recorded,  $M_{\max}$  – the maximum magnitude, for which enough events for statistics have occurred during the study time period. Further the plot interval ( $M_c < x < M_{\max}$ ) of  $y = \lg N(x)$  is approximated by a function of the form  $y = a - b \cdot x$ ;  $b$ -value is used as an assessment of the statistical parameters of the seismic regime [39, 40]. The parameters of the linear part of the Gutenberg–Richter distribution –  $a$ -value and  $b$ -value – refer to the most important quantitative characteristics of the seismic regime. The slope of the graph expresses the ratio between the number of strong and weak seismic events, or (already in physical interpretation) the ratio between the number of large and small ruptures in the geological medium. The level of the graph characterizes seismic activity – the total intensity of seismic manifestations on the study seismic active area.

The work considers the behavior of the  $b$ -value parameter in the dynamics. Since the seismic event flow is a non-stationary process with significant fluctuations, a sufficient number of events are required to reliably determine the slope of the recurrence plot. Therefore, the  $b$ -value parameter was determined for a time interval of 500 days, or  $\sim 1.5$  years. The  $b$ -value found was associated with the middle of the interval. Then the window was moved by one day, and the computation procedure was repeated. The beginning and end of the considered time intervals were determined according to the available catalogs of dynamic parameters: for the Northern Tien Shan from 26.08.1998 to 29.07.2017, for the zone of the Southern Kuril Islands from 18.03.1969 to 17.08.1996.

Taking into account the fact, that the stage of earthquake preparation is slow, as it reflects the process of geological transformation of the planet, a time window of 500 days before the event and 50 days after it was formed to detail the obtained time history of  $b$ -value close to large events. In the same window, the change in stress drops  $\Delta\sigma$  was estimated: the median average value  $Me(\Delta\sigma_{\text{all}})$  over the entire sample was determined and compared to the computed value  $Me(\Delta\sigma_i)$  in the period preceding the earthquake (500 days).

## Results

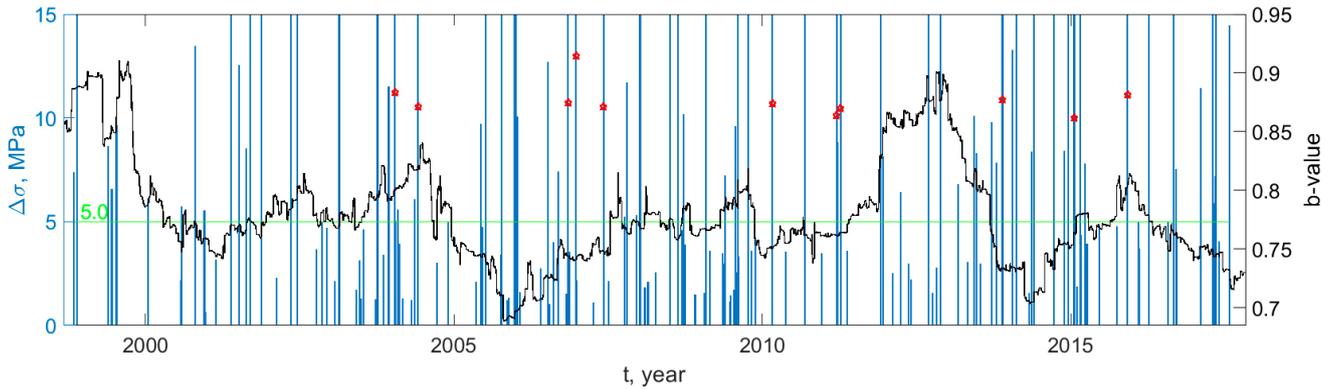
The histograms of stress drops  $\Delta\sigma$  and change in the  $b$ -value in time were constructed for the study regions both for the entire interval under review, and for the time intervals close to the separate large events. Let us review the results obtained for each region.

### *The Northern Tien Shan*

Result obtained for the Northern Tien Shan is presented in Fig. 3. The median average of stress drops over all events is marked ( $Me(\Delta\sigma_{\text{all}}) = 5.0$  MPa).

The  $\Delta\sigma$  value over the entire sample varies between 0.65 and 631.66 MPa. For better visualization of the graph in the area of small stress drop values, the upper limit on the  $\Delta\sigma$  axis is constrained by 15.0 MPa.

Most of the events with  $M > 5$  shown in the diagram occur during the periods of the  $b$ -value increasing, which may indicate a redistribution of events in favor of low-energy earthquakes. The obtained result fully corresponds to the pub-



**Fig. 3.** The Northern Tien Shan. Histogram of stress drops in earthquake sources over time for the period of 1998–2017 (183 events) and the change in the  $b$ -value parameter for the considered time interval. Red stars are events with  $M > 5$  from Table 1. Green line is the median average stress drops over all events.

lished one in [41] on the base of seismic observations at the Garm site in Republic of Tadjikistan, where studies of the  $b$ -value time variations revealed the phenomena, when large events preceded by anomalies associated with increasing in the slope of the recurrence graph.

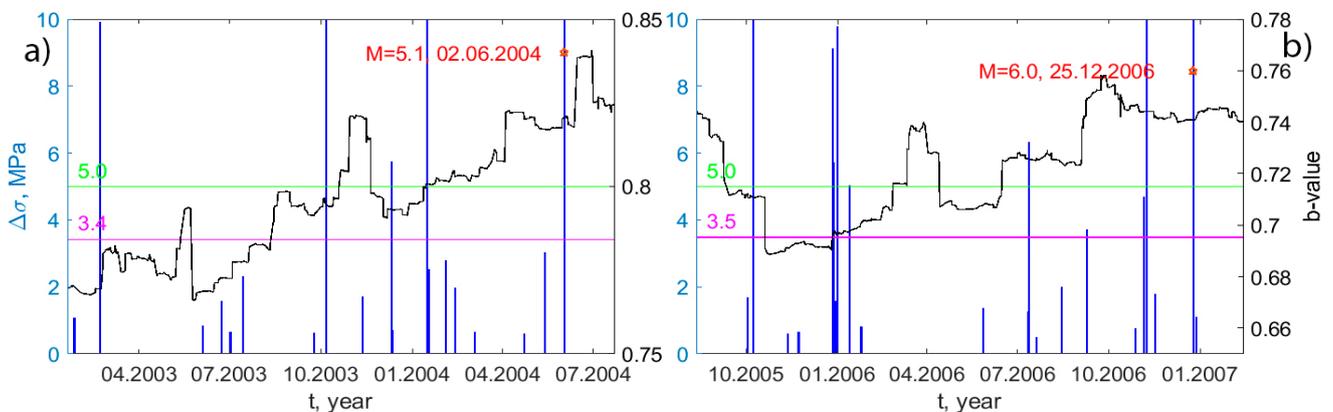
Let us present the results for some separate earthquakes. For this purpose, we take the event of 02.06.2004 with  $M = 5.1$  (no. 3 in Table 1) from the sample, which magnitude is close to the threshold  $M > 5$ , and the strongest one, the earthquake of 25.12.2006 with  $M = 6.0$  (Kochkor earthquake, no. 5 in Table 1). Fig. 4 shows the distribution of  $\Delta\sigma$  and the  $b$ -value for a time period of 500 days before and 50 days after the earthquakes. Note some features that are characteristic of both events.

First, in the foreshock period, the  $b$ -value gradually increases, which means an increase in the percent of the earthquakes of small energy classes. The second, the median average value

of stress drops computed in the interval average of 500 days till the selected event,  $Me(\Delta\sigma_i)$ , is less than the median average value of  $\Delta\sigma$  over all 183 events throughout the entire time period.

The use of the median average value of some parameter, including  $\Delta\sigma$ , rather than the arithmetic mean or weighted mean, is standard when the values of this parameter differ radically in a statistical ensemble by several orders of magnitude [42]. The median describes the typical value of a parameter, around which most of the values in the sample are grouped.

The median average value of stress drops ( $Me(\Delta\sigma_i) = 3.42$  MPa for the event no. 3 turned out to be 30 % less, than the median average value of  $\Delta\sigma$  throughout all 183 events over the entire period ( $Me(\Delta\sigma_{all}) = 5.0$  MPa. Despite the fact, that a large earthquake occurred on 08.11.2006 with  $M = 5.2$  (no. 4 in Table 1) just before the Kochkor one and the values of stress drops for this



**Fig. 4.** Stress drop histogram before the event of 02.06.2004 with  $M = 5.1$  (no. 3 in Table 1) (a) and the event of 25.12.2006 with  $M = 6.0$  (no. 5 in Table 1) (b); the change in the  $b$ -value parameter. Green line is the median average value of stress drops for all events, the crimson line is the median average value of stress drops for the events before the earthquake. Selected time interval: 500 days before the event and 50 days after.

event ( $\Delta\sigma = 44.61$  MPa) exceed the median value throughout all events, the median average value ( $Me(\Delta\sigma_i) = 3.48$  MPa) in the considered time interval before the Kochkor earthquake is also lower than  $Me(\Delta\sigma_{all})$  over the entire sample.

The results of computation of the median average values of stress drops  $Me(\Delta\sigma_i)$  before strong and moderate earthquakes in the Northern Tien Shan are given in Table 1.

Most of the events from Table 1 during the pre-earthquake period are accompanied by a reduced value of stress drops relative to the median value over the entire sample of values.

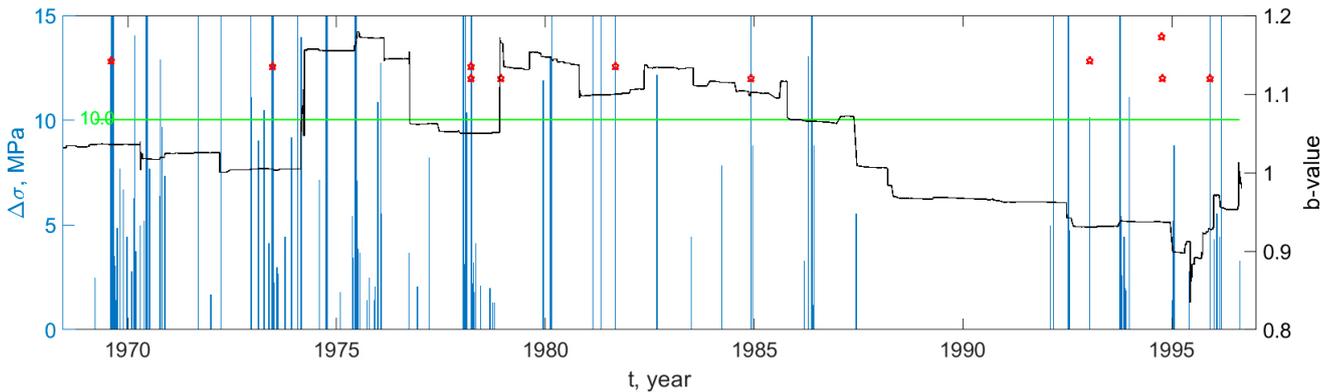
**The Southern Kuril Islands**

The result obtained in the case of the Southern Kuril Islands is presented in Fig. 5. The median average value of stress drops over all events is  $Me(\Delta\sigma_{all}) = 10.0$  MPa. The median average values of stress drops  $\Delta\sigma_i$  before strong and moderate earthquakes in this region are given in Table 2.

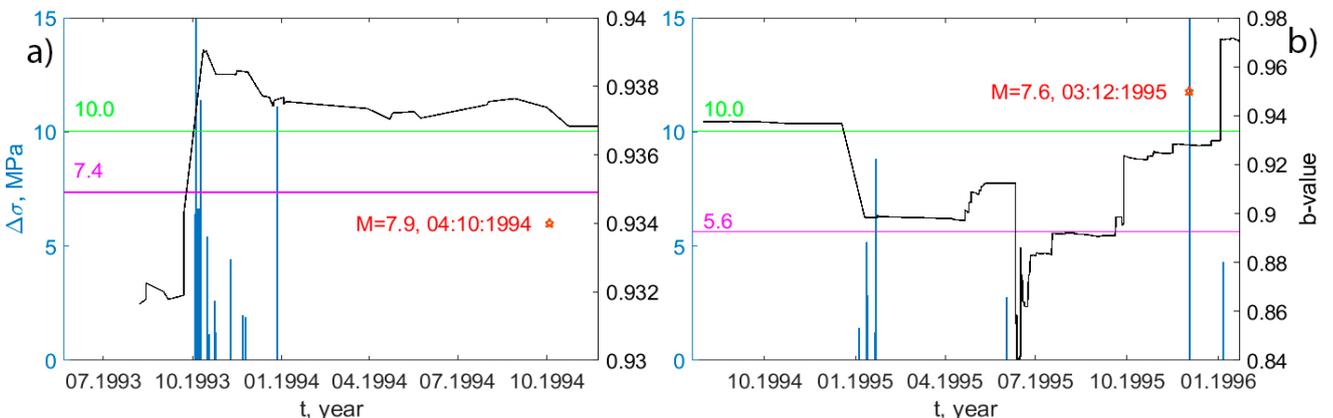
A nearly 1.5-year window was used for computing the  $b$ -value parameter, however, the time behavior is gradual, because the catalog contains only events with  $M > 3.6$ , and there is not enough data to construct a smooth behavior curve of the  $b$ -value. Let us detail the change in the  $b$ -value and  $\Delta\sigma$  during the foreshock periods for the events from Table 2 in the window of 500 days before the event and 50 after.

Fig. 6 shows the histograms of the stress drop distribution before the Shikotan earthquake of 04.10.1994, with  $M = 7.9$ , and the earthquake of 03.12.1995, with  $M = 7.6$ . As in the other seismic region, the Northern Tien Shan, there is a significant decrease in the stress drop value before the earthquake.

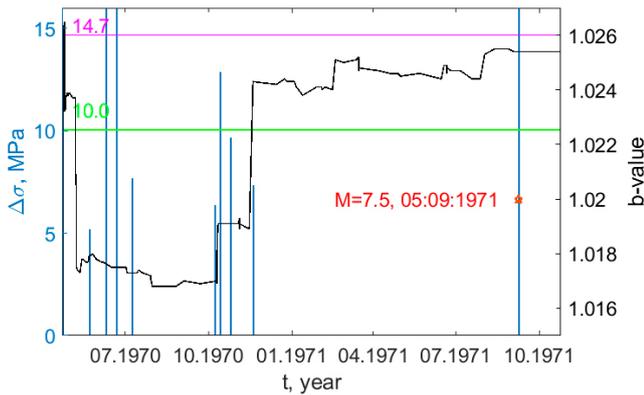
There is still a tendency for the increase in the slope of the recurrence plot to be accompanied by the decrease in stress drop value before an earthquake.



**Fig. 5.** The Southern Kurils. Histogram of stress drops in earthquake sources in time for the period of 1969–1996 (264 events) and the change in the  $b$ -value parameter for the considered time interval. Red stars are the events with  $M \geq 6.5$ . Green line is the median average stress drops over all events.



**Fig 6.** Stress drop histogram before the Shikotan earthquake of October 4, 1994,  $M = 7.0$  (no. 10 in Table 2) (a), and the earthquake of December 3, 1995,  $M = 7.6$  (no. 12 in Table 2) (b); the change in the  $b$ -value parameter. Green line is the median average value of stress drops over all events, the crimson line is the median value of stress drops for events before the earthquake. Selected time interval: 500 days before the event and 50 days after.



**Fig. 7.** Stress drop histogram before the Moneron earthquake of 05.09.1971,  $M = 7.5$  and the change in the  $b$ -value parameter. Green line is the median average value of stress drops over all events, the crimson line is the median average value of stress drops for events before the earthquake. Selected time interval: 500 days before the event and 50 days after.

In the study time interval, there was another strong event – the Moneron earthquake of 05.09.1971 with  $M = 7.5$  [43] (no. 2 in Table 2). However, its hypocenter was far beyond the study area: under the bottom of the Tatar Strait, a little northeast of Moneron Island, near the coast of Sakhalin Island. The hypocenter depth was 15–20 km. For all the previous observation history in the vicinity of Sakhalin Island, the earthquakes of such a great energy were not observed. The Moneron earthquake caused a tsunami [43], despite the shallow depth of this part of the Tatar Strait.

Fig. 7 shows the stress drop distribution before the Moneron earthquake of 05.09.1971 and the behavior of the  $b$ -value parameter.

The study area is more than 600 km from the epicenter of the Moneron earthquake. Despite the fact, that we have used for computations the values from the catalogs of earthquakes and dynamic parameters of events on the territory, bounded by coordinates  $42^{\circ}$ – $46^{\circ}$  N,  $144^{\circ}$ – $151^{\circ}$  E, and located at a significant distance from Moneron Island, an increase in the slope of recurrence plot is observed. However, there is no decrease in the stress drop value in this case. It is most likely, that the “effect” of a decrease in the stress drop value is observed in the vicinity of earthquakes, rather than at a significant distance from it.

## Discussion and conclusion

The accumulation of stationary tectonic stresses, which ultimately causes the most part of earthquakes, is associated with the interaction of tectonic plates. The deformation process in the area

around the future source becomes heterogeneous and non-stationary (the characteristic period seems to correspond to the observation time of medium-term precursors: from a few months to several years) prior to strong earthquake. Spatial heterogeneity manifests itself as the stress concentration in the fault zone (in particular, on the “asperities” that prevent slipping of the fault sides) and possibly in some unloading of zones outside the concentrator localization. This can be interpreted as a decrease in the characteristic size of the stress concentration area, on which there are change in stresses and inelastic deformation processes. This seismological manifestation of change is the so-called seismic gap of the second kind, i.e. a deficit of “moderate” earthquakes with a magnitude several units less than the expected main event. The average daily number of weak earthquakes during this stage of earthquake preparation usually remains at the same level or (closer to the moment of the main event) increases. Thus, the increase in  $b$ -value parameter – the slope of the recurrence plot – gets a natural explanation [40, 41, 44]. The decrease in characteristic size can be considered as an interpretation of the above-mentioned increase in the  $b$ -value.

So, we have found the increase in the  $b$ -value parameter before strong earthquakes to be accompanied by the decrease in the median average value of stress drops  $Me(\Delta\sigma_i)$ . This effect was observed in two seismic regions of Eurasia: the Northern Tien Shan and the Southern Kuril Islands, and in the first case it appears more contrastingly. This is most likely due to the fact that the catalogs of dynamic parameters for the Northern Tien Shan and for the Southern Kuril Islands differ by the range of energy levels for recorded events: the Northern Tien Shan –  $2.6 \leq M \leq 6.0$  [7], the Northwestern Pacific –  $4.5 \leq M \leq 8.2$  [3]. When determining dynamic parameters for a wide class of events (by earthquake energies), the picture is expected to be the same.

In the case of further seismic monitoring of the considered regions, changes in the value of  $\Delta\sigma$  in time can be used to reveal the non-stationary mode of the seismicity (in particular, the transition from stationary regime to the foreshock process [45]). For this purpose, it is necessary to compute dynamic parameters of the earthquake sources in a mode as close as possible to real time.

It seems that for other regions, where modern seismic networks are deployed, a massive

determination of stress drops and other dynamic parameters of earthquake source, including moderate and low energy events, is also promising. Dynamics of change in spatial distribution of stress drops can be used when forming the medium-term earthquake prediction.

## References

1. Sycheva N.A., Bogomolov L.M., Kuzikov S.I. **2020**. *Computational technologies in seismological studies (on the example of KNET, Northern Tien Shan)*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 358 p. (In Russ.). <https://dx.doi.org/10.30730/978-5-6040621-6-6.2020-2>
2. Kal'met'eva Z.A., Mel'nikova T.A., Musienko E.V., Yudahin F. Ya. **1992**. [Models of source zones of strong earthquakes]. In: [Typical geological and geophysical models of seismic and aseismic regions]. Bishkek: Ilim, p. 124–131. (In Russ.).
3. Burymskaya R.N. **2001**. [Radiation spectral content and the source parameters of earthquake in the northwestern Pacific during 1969–1996]. In: A.I. Ivashchenko (ed.) [Dynamics of source zones and forecast of the strong earthquakes in the Northwestern Pacific]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, vol. 1: 48–67. (In Russ.).
4. Klyuchevskii A.V., Demjanovich V.M. **2002**. Source amplitude parameters of strong earthquakes in the Baikal seismic zone. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 38(2): 139–148. EDN: LHLKPZ
5. Brune J.N. **1970**. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 75(26): 4997–5009. <https://doi.org/10.1029/jb075i026p04997>
6. Brune J.N. **1971**. Corrections. *J. of Geophysical Research*, 76: 5002.
7. Sycheva N.A., Bogomolov L.M. **2020**. On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 393–446. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.393-416.417-446>
8. Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H. **1981**. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of regional and global seismicity. *J. of Geophysical Research*, 86: 2825–2852. <https://doi.org/10.1029/jb086ib04p02825>
9. Kocharyan G.G. **2012**. About the radiative efficiency of earthquakes (example of geomechanical interpretation of seismological observation results). *Dynamic processes in the geospheres*, 3: 36–47. (In Russ.).
10. Kocharyan G.G. **2014**. Scale effect in seismotectonics. *Geodynamics & Tectonophysics*, 5(2): 353–385. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0133>
11. Kocharyan G.G. **2016**. *Geomechanics of faults*. Moscow: GEOS, 424 p. (In Russ.).
12. Kocharyan G.G., Ivanchenko G.N., Kishkina S.B. **2016**. Energy radiated by seismic events of different scales and genesis. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 52(4): 606–620. <https://doi.org/10.1134/s1069351316040030>
13. Bogomolov L.M., Sycheva N.A., Zakupin A.S., Kamevnev P.A., Sychev V.N. **2015**. Stress drop distribution in sources of earthquakes and trigger effects manifestation. In: [Trigger effects in geosystems: Proceedings of the Third All-Russian workshop-meeting (Moscow, 16–19 June, 2015), IDG RAS]. Moscow: GEOS, p. 48–56. (In Russ.).
14. Sycheva N.A. **2020**. Seismic moment tensor and dynamic parameters of earthquakes in the Central Tien Shan: translation. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(2): 178–209. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.2.178-191.192-209>
15. Molnar P., Tapponnier P. **1975**. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision: features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision. *Science*, 189(4201): 419–426. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419>
16. Sycheva N.A. **2022**. Some characteristics of the earthquake catalog and the seismic process according to the KNET network. *Geodynamics & Tectonophysics*, 13(3). (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-3-0640>
17. Nusipov E.H., Ospanov A.M., Li A.N., Nysanbaev T.E. **2004**. Lugovskoe earthquake May 23, 2003. In: [Modern geodynamics and seismic risk in Central Asia: Reports of the Fifth Kazakh-Chinese International Symposium, September 24–27, 2003]. Almaty: IS MON RK, p. 19–25. (In Russ.).
18. Grebennikova V.V., Frolova A.G., Bagmanova N.H., Beryozina A.V., Pershina E.V., Moldobekova S. **2018**. Kadji-Say earthquake (November 14, 2014) with  $K=13.7$ ,  $M_{pVA}=6.2$ ,  $I_0=7$  (Kyrgyzstan – Southern Issyk-Kul). *NRC RK Bulletin*, 2(June): 135–143. (In Russ.). <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2018-2-135-143>
19. Fortuna A.B., Abdieva S.V., Klokov I.A., Korzhenkov A.M., Strel'nikov A.A. **2019**. [Seismicity of Issyk-Kul region]. *Vestnik Instituta seismologii NAN KR [Bull. of the Institute of Seismology of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic]*, 2(14): 98–107. (In Russ.). [https://journal.seismo.kg/archive/journal\\_2019-14/article11.pdf](https://journal.seismo.kg/archive/journal_2019-14/article11.pdf)
20. Guseva I.S., Arkhipova E.V. **2019**. [Analysis of the system unity of the modern development of the Kuril-Kamchatka Island Arc and Sakhalin Island on the basis of seismological data]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*, 6: 46–50. (In Russ.).
21. Prytkov A.S., Vasilenko N.F., Frolov D.I. **2017**. Recent geodynamics of the Kuril subduction zone. *Russian J. of Pacific Geology*, 11(1): 19–24.
22. Tihonov I.N., Levin B.V. **2015**. [Forecast of strong earthquakes in the Sakhalin region: history, results and prospects]. [Geodynamic processes and natural disasters. Experience of Neftegorsk: Sat. materials of the All-Russian scientific conference with international participation (ed. by B.V. Levin, O.N. Likhacheva)]. In 2 vol. Yuzhno-Sahalinsk; Vladivostok: Dal'nauka, vol. 1: 41–45. (In Russ.).
23. Safonov D.A., Konovalov A.V. **2017**. Moment tensor inversion in the Kuril-Okhotsk and Sakhalin regions using ISO-LA software. *Tikhookeanskaya Geologiya*, 36(3): 102–112. (In Russ.).
24. *International Seismological Centre ISC-EHB: Event catalogue*. URL: <http://www.isc.ac.uk/citations/> (accessed: 02.11.2022).
25. Kostrov B.V. **1975**. *Focal mechanics of a tectonic earthquake*. Moscow: Nauka, 175 p. (In Russ.).
26. Riznichenko Yu.V. **1985**. [Problems of seismology]. In: *Izbrannye trudy [Selected works]*. Moscow: Nauka, 408 p. (In Russ.).
27. Madariaga R. **1976**. Dynamics of an expanding circular fault. *Bull. of the Seismological Society of America*, 66: 639–666.
28. Madariaga R. **1979**. On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity. *J. of Geophysical Research*, 84: 2243–2250. <https://doi.org/10.1029/jb084ib05p02243>
29. Boore D.M. **2003**. Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*, 160(3): 635–676. <https://doi.org/10.1007/pl00012553>

30. Abercrombie R.E., Rice J.R. **2005**. Can observations of earthquake scaling constrain slip weakening? *Geophysical J. International*, 162: 406–424. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2005.02579.x>
31. Lancieri M., Madariaga R., Bonilla F. **2012**. Spectral scaling of the aftershocks of the Tocopilla 2007 earthquake in northern Chile. *Geophysical J. International*, 189: 469–480. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05327.x>
32. Kaneko Y., Shearer P.M. **2014**. Seismic source spectra and estimated stress drop derived from cohesive zone models of circular subshear rupture. *Geophysical J. International*, 197(2): 1002–1015. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu030>
33. Gibowicz S.J., Kijko A. (eds) **1994**. *An introduction to mining seismology*. San Diego: Academic Press, 399 p. <https://doi.org/10.1016/c2009-0-02348-4>
34. Moskvina A.G. **1969**. [The displacement field of elastic waves formed by propagating dislocation]. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*, 6: 3–10. (In Russ.).
35. Moskvina A.G. **1969**. [Studies of the displacement fields of elastic waves depending on characteristics of earthquake source]. *Izvestiya AN SSSR, Fizika Zemli*, 9: 3–16. (In Russ.).
36. Sato T., Hirasawa T. **1973**. Body wave spectra from propagating shear cracks. *J. of Physics of the Earth*, 21: 415–431. <https://doi.org/10.4294/jpe1952.21.415>
37. Kwiatek G., Ben-Zion Y. **2013**. Assessment of *P* and *S* wave energy radiated from very small shear-tensile seismic events in a deep South African mine. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(7): 3630–3641. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50274>
38. Gutenberg B., Richter C.F. **1944**. Frequency of earthquakes in California. *Bull. of the Seismological Society of America*, 34: 185–188. <https://doi.org/10.1785/bssa0340040185>
39. Smirnov V.B., Zavyalov A.D. **2012**. Seismic response to electromagnetic sounding of the Earth's lithosphere. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 48(7): 615–639. <https://doi.org/10.1134/s1069351312070075>
40. Smirnov V.B., Ponomaryov A.V. **2020**. *Physics of transitional regimes of seismicity*. Moscow: RAN, 412 p. (In Russ.).
41. Popandopoulos G.A. **2018**. Detailed study of time variations in the Gutenberg–Richter *b*-value based on highly accurate seismic observations at the Garm prognostic site, Tajikistan. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 54(4): 612–631. <https://doi.org/10.1134/s1069351318040092>
42. Lyubushin A.A. **2007**. *Analysis of data from geophysical and environmental monitoring systems*. Moscow: Nauka, 228 p. (In Russ.).
43. Shchetnikov N.A. **1981**. *Tsunami*. Moscow: Nauka, 88 p. (In Russ.).
44. Tikhonov I.N. **2006**. [Earthquake catalog analysis methods for medium- and short-term predictions of strong seismic events]. Vladivostok; Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 214 p. (In Russ.).
45. Bogomolov L.M., Sycheva N.A. **2022**. Earthquake predictions in XXI century: prehistory and concepts, precursors and problems. *Geosistemy perednykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 6(3): 145–182. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.145-164.164-182>

## APPENDIX

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Dynamic parameters of earthquakes in the Southern Kurils Динамические параметры землетрясений Южных Курил

The Table has been formed by the catalog of source parameters of earthquake in the Northwestern Pacific [3] as refined sampling for the territory of highest seismicity but without Hokkaido Island.

The table presents: date, time, hypocenter coordinates ( $\varphi$  – latitude,  $\lambda$  – longitude),  $H$  – depth,  $M_w$  – moment magnitude,  $\lg M_0$  – decimal logarithm of scalar seismic moment,  $\Delta\sigma$  – stress drops.

Таблица составлена по материалам каталога динамических параметров землетрясений северо-восточной части Тихого океана [3] как выборка для территории с наиболее высокой сейсмичностью (не включая о. Хоккайдо).

Представлены: дата, время, координаты гипоцентра ( $\varphi$  – широта,  $\lambda$  – долгота),  $H$  – глубина,  $M_w$  – моментная магнитуда,  $\lg M_0$  – десятичный логарифм скалярного сейсмического момента,  $\Delta\sigma$  – сброс напряжений.

No.	Date	Hour: min	$\varphi^\circ$	$\lambda^\circ$	$H$ , km	$M_w$	$\lg M_0$ , N·m	$\Delta\sigma$ , МПа
1	18.03.1969	16:16	45.0	150.6	50	5.8	17.8	4.97
2	01.08.1969	23:43	45.5	150.8	40	7.2	19.6	10.39
3	02.08.1969	00:34	45.3	151.0	20	6.1	18.1	26.09
4	11.08.1969	21:08	43.5	147.8	40	5.2	16.8	59.77
5	11.08.1969	21:21	43.3	147.9	40	4.8	16.3	4.97
6	11.08.1969	21:27	43.3	147.7	15	7.2	19.9	222.07
7	11.08.1969	21:27	43.6	147.8	40	8.7	21.2	136.93
8	12.08.1969	02:36	43.5	148.3	30	5.6	17.6	3.60
9	12.08.1969	03:33	43.1	148.0	20	6.6	19.0	1338.13
10	12.08.1969	04:53	43.1	147.8	30	6.2	18.4	28.61
11	12.08.1969	05:03	43.4	148.1	30	6.9	18.5	45.34

No.	Date	Hour: min	$\varphi^\circ$	$\lambda^\circ$	$H$ , km	$M_w$	$\lg M_0$ , N·m	$\Delta\sigma$ , MPa
12	12.08.1969	05:53	43.6	148.8	30	7.1	18.8	49.72
13	12.08.1969	09:25	43.2	147.7	30	5.8	17.8	19.34
14	12.08.1969	09:33	43.4	147.7	30	6.0	18.1	13.69
15	12.08.1969	11:21	43.7	149.0	50	6.8	19.3	57.08
16	12.08.1969	13:18	43.6	148.1	5	6.0	18.1	7.02
17	12.08.1969	15:28	44.0	148.9	30	5.3	17.0	15.36
18	12.08.1969	15:49	43.6	148.7	30	5.0	16.6	2.38
19	12.08.1969	21:16	43.0	146.6	40	5.6	17.5	4.75
20	12.08.1969	21:56	43.3	147.8	20	5.5	17.4	6.12
21	12.08.1969	22:57	44.0	148.4	40	6.3	18.6	8.25
22	12.08.1969	23:06	43.6	148.0	35	5.7	17.7	15.01
23	13.08.1969	03:29	43.6	147.6	40	5.7	17.7	12.20
24	13.08.1969	08:31	43.8	148.0	50	6.5	18.9	20.25
25	13.08.1969	12:30	43.2	148.1	40	4.9	16.4	3.21
26	13.08.1969	19:33	43.8	147.9	50	5.3	17.0	4.43
27	13.08.1969	22:57	44.0	148.4	40	6.5	18.9	5.58
28	14.08.1969	14:19	43.2	147.7	40	7.0	18.6	58.41
29	15.08.1969	04:32	43.3	147.8	30	6.2	18.4	55.78
30	15.08.1969	06:18	43.3	147.8	20	5.2	16.9	17.24
31	15.08.1969	09:47	43.4	147.6	20	5.1	16.8	6.12
32	15.08.1969	10:02	43.1	148.3	30	6.6	18.6	164.63
33	15.08.1969	22:43	43.2	147.5	40	5.2	16.8	15.01
34	16.08.1969	09:03	43.9	148.5	40	5.3	17.1	4.43
35	16.08.1969	12:44	43.9	148.3	40	5.3	17.0	3.36
36	16.08.1969	15:15	43.3	147.5	60	5.9	17.9	17.64
37	16.08.1969	17:13	43.2	147.6	50	5.6	17.5	8.44
38	18.08.1969	11:43	43.7	148.6	50	5.5	17.3	42.32
39	19.08.1969	08:49	43.6	148.2	40	6.2	18.4	55.78
40	21.08.1969	00:28	43.2	148.2	5	5.1	16.6	2.22
41	21.08.1969	03:32	42.9	147.1	30	5.5	17.3	50.87
42	21.08.1969	13:24	43.6	148.1	20	5.5	17.3	42.32
43	27.08.1969	01:10	43.3	147.8	30	5.1	16.6	2.22
44	27.08.1969	03:26	43.2	147.8	30	5.3	17.0	5.21
45	28.08.1969	21:35	43.2	147.8	20	5.3	17.0	18.90
46	30.08.1969	07:11	43.7	147.8	30	6.5	18.9	32.85
47	30.08.1969	08:28	43.5	147.8	25	6.0	18.1	19.79
48	04.09.1969	21:12	43.8	147.4	40	5.6	17.5	7.02
49	06.09.1969	07:43	43.8	147.4	40	5.4	17.1	6.55
50	07.09.1969	18:43	43.4	148.2	40	5.2	16.9	4.14
51	13.09.1969	11:52	43.5	147.7	50	5.2	16.9	2.61
52	14.09.1969	06:11	43.3	147.5	40	5.0	16.6	6.12
53	18.09.1969	11:52	43.3	147.1	30	5.2	16.9	2.80
54	22.09.1969	02:35	43.5	147.6	40	5.2	16.7	2.38
55	29.09.1969	17:58	43.3	147.7	40	5.4	17.4	9.69
56	26.10.1969	19:15	43.7	148.1	50	5.7	17.6	15.36

No.	Date	Hour: min	$\varphi^\circ$	$\lambda^\circ$	$H$ , km	$M_w$	$\lg M_0$ , N·m	$\Delta\sigma$ , MPa
57	20.11.1969	21:00	43.4	147.9	40	5.3	17.0	13.38
58	21.11.1969	08:12	43.7	147.8	40	5.4	17.1	13.08
59	21.11.1969	08:57	43.2	147.9	35	5.0	16.6	5.21
60	19.12.1969	04:30	43.2	147.9	30	5.4	17.1	8.84
61	28.12.1969	04:53	43.4	147.7	30	5.4	17.1	8.84
62	04.02.1970	13:07	43.3	147.9	30	5.2	16.8	5.58
63	04.02.1970	20:05	44.5	148.2	25	4.1	15.2	2.80
64	26.02.1970	23:06	43.3	147.7	25	5.8	17.8	8.64
65	26.02.1970	23:29	43.3	147.8	45	5.6	17.5	8.25
66	27.02.1970	01:45	43.2	147.8	10	5.6	17.5	52.06
67	27.02.1970	02:50	43.3	147.8	40	4.4	15.7	2.07
68	10.03.1970	04:58	44.7	149.0	70	6.4	15.6	7.52
69	18.04.1970	23:25	42.9	147.4	30	5.6	17.5	9.92
70	23.05.1970	23:09	43.6	148.0	30	5.1	16.6	10.39
71	10.06.1970	16:17	44.8	149.7	40	6.7	19.2	41.35
72	22.06.1970	21:33	43.5	147.6	50	6.0	18.2	49.72
73	09.07.1970	12:11	43.8	148.4	30	6.0	17.7	15.36
74	08.10.1970	23:36	43.8	147.5	45	5.6	17.4	12.78
75	14.10.1970	16:00	43.3	148.0	40	5.1	16.8	7.19
76	14.10.1970	18:06	43.6	147.8	30	5.2	16.9	5.98
77	14.10.1970	18:15	43.4	148.0	40	6.3	18.5	21.21
78	14.10.1970	21:14	43.5	147.0	40	6.2	18.4	12.78
79	26.10.1970	19:15	43.7	148.1	50	5.6	17.4	19.34
80	20.11.1970	13:48	43.6	146.8	45	5.1	16.7	14.67
81	09.09.1971	23:01	44.3	151.0	30	6.9	19.5	44.31
82	26.12.1971	14:20	43.3	148.0	25	5.0	16.5	3.36
83	25.03.1972	22:59	43.0	146.2	45	6.8	19.3	58.41
84	10.12.1972	18:26	44.5	149.5	20	6.7	19.1	35.20
85	17.12.1972	00:18	44.5	149.5	50	5.8	17.9	22.21
86	17.02.1973	19:15	45.0	148.8	130	5.0	16.6	18.05
87	05.04.1973	22:17	43.4	147.8	41	6.0	18.0	16.09
88	06.04.1973	00:01	43.4	147.8	30	6.0	18.2	3.28
89	06.04.1973	01:48	44.2	147.2	25	5.6	17.5	19.34
90	18.05.1973	10:36	44.5	149.4	55	4.9	16.5	8.25
91	17.06.1973	03:55	43.2	145.8	50	7.7	20.6	197.92
92	18.06.1973	05:37	42.5	146.6	45	5.1	16.8	10.15
93	18.06.1973	17:45	42.3	146.1	25	6.0	18.1	14.34
94	19.06.1973	02:54	42.7	146.1	50	5.2	17.0	6.55
95	22.06.1973	06:07	42.9	146.3	53	6.5	18.9	62.59
96	23.06.1973	02:09	43.1	147.3	50	5.0	16.5	9.47
97	24.06.1973	02:43	43.4	146.5	57	7.6	20.5	1.76
98	24.06.1973	03:28	43.2	146.8	20	5.7	17.6	20.25
99	26.06.1973	18:02	43.2	147.1	50	6.7	19.1	49.72
100	26.06.1973	22:32	43.2	146.7	50	6.9	19.4	140.12
101	27.06.1973	03:42	42.8	145.7	40	4.9	16.4	3.28

No.	Date	Hour: min	$\varphi^\circ$	$\lambda^\circ$	$H$ , km	$M_w$	$\lg M_0$ , N·m	$\Delta\sigma$ , MPa
102	29.06.1973	03:26	43.3	145.8	55	5.9	17.9	2.55
103	05.07.1973	00:58	43.8	148.1	30	5.2	16.8	4.53
104	29.07.1973	14:51	43.0	146.8	30	5.1	16.7	5.98
105	03.08.1973	19:13	43.0	147.8	40	4.8	16.2	4.53
106	09.08.1973	10:44	43.5	146.5	57	5.5	17.4	5.33
107	07.10.1973	09:27	42.5	146.5	15	4.8	16.3	8.84
108	01.12.1973	10:38	43.1	146.3	40	5.5	17.3	7.35
109	01.12.1973	23:16	43.1	147.1	30	5.7	19.2	5.71
110	01.12.1973	23:18	43.3	146.7	55	7.4	20.2	13.69
111	24.01.1974	19:12	42.1	144.0	30	6.7	19.4	44.31
112	25.02.1974	05:46	43.9	147.9	40	6.0	18.2	27.96
113	04.08.1974	15:00	42.4	145.9	5	5.6	17.5	14.34
114	27.09.1974	05:47	43.1	146.7	40	7.3	20.1	153.64
115	09.10.1974	07:32	44.7	150.3	50	7.3	20.0	67.07
116	02.02.1975	16:17	44.3	147.1	150	4.6	16.0	3.60
117	18.05.1975	22:34	44.2	147.7	105	5.9	17.9	10.88
118	27.05.1975	06:41	44.1	148.3	50	4.9	16.4	6.86
119	10.06.1975	13:47	43.2	147.5	30	7.6	20.4	42.32
120	10.06.1975	14:37	42.9	147.9	27	6.6	19.0	32.85
121	10.06.1975	14:58	43.9	147.8	30	6.6	19.0	43.30
122	10.06.1975	15:21	43.5	147.3	25	6.4	18.7	22.21
123	11.06.1975	14:20	43.3	147.8	15	5.3	17.0	3.86
124	11.06.1975	15:32	43.3	147.8	15	5.2	16.9	4.43
125	12.06.1975	23:21	43.1	148.0	20	5.6	17.4	8.84
126	13.06.1975	01:45	42.7	147.5	25	4.9	16.5	2.80
127	13.06.1975	12:57	43.1	147.3	24	5.1	16.7	2.43
128	13.06.1975	18:08	43.3	148.0	20	7.1	19.8	127.79
129	14.06.1975	02:59	43.1	147.8	30	5.7	17.7	7.52
130	14.06.1975	03:05	43.1	147.6	30	6.1	17.7	31.37
131	14.06.1975	05:02	43.4	147.8	30	5.7	17.7	3.95
132	14.06.1975	08:43	43.3	147.9	30	5.6	17.4	7.88
133	14.06.1975	09:02	43.3	147.7	29	4.7	16.1	7.88
134	14.06.1975	17:11	43.2	147.7	30	5.0	16.5	7.70
135	14.06.1975	17:37	43.1	147.2	24	6.1	18.3	21.70
136	14.06.1975	18:38	43.5	148.0	30	6.7	19.1	47.48
137	14.06.1975	18:49	43.4	147.9	30	6.1	18.3	11.13
138	14.06.1975	18:52	43.1	147.9	30	5.9	18.0	7.88
139	14.06.1975	20:35	43.7	147.8	24	5.1	16.7	4.64
140	14.06.1975	23:35	43.7	147.8	24	4.8	16.4	5.71
141	15.06.1975	00:19	43.2	148.0	29	7.1	19.8	82.51
142	20.06.1975	03:37	43.3	147.8	30	4.7	16.1	2.27
143	22.06.1975	01:50	43.3	147.8	30	4.7	16.1	2.27
144	22.06.1975	02:29	42.9	147.4	30	6.2	18.3	55.78
145	22.06.1975	22:44	42.9	147.4	30	6.7	19.1	49.72
146	22.06.1975	23:00	43.0	147.4	20	6.2	18.4	20.73

No.	Date	Hour: min	$\varphi^\circ$	$\lambda^\circ$	$H$ , km	$M_w$	$\lg M_0$ , N·m	$\Delta\sigma$ , MPa
147	23.06.1975	09:13	43.1	147.2	25	6.4	18.4	36.02
148	26.06.1975	10:32	43.1	148.0	23	5.4	17.1	13.38
149	26.06.1975	13:07	42.9	148.2	30	5.1	16.7	7.52
150	09.07.1975	11:34	43.2	147.4	20	5.5	17.3	7.70
151	20.07.1975	08:02	44.2	148.0	80	5.6	17.5	7.35
152	24.09.1975	09:51	43.2	147.7	40	4.3	15.5	2.80
153	13.10.1975	11:51	43.0	147.8	20	4.6	16.0	4.97
154	24.11.1975	07:58	43.3	147.7	30	5.8	17.0	2.80
155	03.12.1975	07:14	43.2	145.9	50	4.9	16.4	4.14
156	27.12.1975	07:41	43.1	147.2	40	5.9	17.9	21.70
157	21.01.1976	10:05	44.8	149.1	55	7.1	19.7	22.21
158	22.01.1976	08:07	44.4	149.5	27	6.2	18.4	25.50
159	25.01.1976	12:23	44.8	149.7	60	7.2	19.8	11.13
160	22.09.1976	00:16	44.9	149.2	75	6.6	19.1	7.35
161	08.12.1976	19:19	43.3	147.9	30	6.1	18.3	4.14
162	19.03.1977	10:56	44.2	148.3	50	6.5	18.9	16.46
163	13.01.1978	20:03	44.6	150.0	40	6.5	18.8	18.90
164	14.01.1978	03:24	44.5	149.6	31	6.7	19.6	39.49
165	24.01.1978	05:54	44.6	149.3	24	6.5	18.8	6.26
166	29.01.1978	02:05	45.9	149.2	159	5.3	17.1	88.41
167	09.02.1978	08:02	44.3	150.1	30	6.6	19.0	20.73
168	22.03.1978	00:50	44.0	149.0	40	7.0	19.6	150.14
169	22.03.1978	08:25	43.8	149.3	30	5.0	16.5	4.86
170	22.03.1978	21:34	43.8	149.3	36	7.1	19.8	32.85
171	23.03.1978	00:30	44.2	149.0	40	8.1	21.3	65.54
172	23.03.1978	01:49	43.7	149.0	35	6.4	18.8	26.09
173	23.03.1978	03:14	44.2	149.8	30	6.1	19.3	40.41
174	23.03.1978	03:15	43.9	148.9	40	7.7	20.7	62.59
175	23.03.1978	07:32	44.0	148.9	40	4.7	16.0	3.00
176	23.03.1978	08:14	44.2	149.1	30	6.2	18.4	9.69
177	23.03.1978	16:52	44.0	149.4	40	4.7	16.2	5.09
178	23.03.1978	19:12	44.0	149.9	40	7.4	20.2	22.21
179	24.03.1978	22:08	43.8	149.3	40	5.8	17.8	13.69
180	24.03.1978	19:47	44.2	148.6	40	7.7	20.6	73.54
181	25.03.1978	05:24	43.9	149.4	40	4.9	16.4	5.71
182	25.03.1978	08:01	43.8	149.3	40	4.8	16.3	6.86
183	25.03.1978	23:52	43.8	148.6	40	5.6	17.4	3.52
184	26.03.1978	06:00	44.3	149.8	35	5.0	16.6	4.23
185	26.03.1978	23:56	43.7	149.2	30	5.1	16.8	5.33
186	28.03.1978	21:13	43.8	148.6	20	4.8	16.3	4.33
187	28.03.1978	22:12	43.8	148.6	20	5.7	17.6	3.14
188	05.04.1978	16:04	43.7	148.7	35	5.2	16.9	4.43
189	12.04.1978	01:22	44.1	147.8	87	5.8	17.8	6.40
190	18.04.1978	11:43	43.9	149.2	40	5.7	17.6	3.60
191	01.05.1978	06:54	44.0	149.1	35	4.9	16.4	5.09

No.	Date	Hour: min	$\varphi^\circ$	$\lambda^\circ$	$H$ , km	$M_w$	$\lg M_0$ , N·m	$\Delta\sigma$ , MPa
192	01.05.1978	17:59	43.9	149.0	30	5.1	16.7	5.71
193	15.06.1978	09:28	44.1	149.2	40	5.6	17.6	4.23
194	03.09.1978	22:12	43.9	149.5	40	5.7	17.7	3.95
195	29.09.1978	11:07	43.8	149.1	35	5.0	16.6	2.61
196	11.10.1978	10:26	44.4	148.9	50	5.0	16.6	2.61
197	14.12.1979	07:19	43.0	144.4	40	6.3	18.5	23.80
198	15.02.1980	14:25	44.7	149.6	53	6.6	19.1	26.09
199	18.02.1980	06:08	43.7	146.1	110	6.2	18.4	15.01
200	23.02.1980	05:51	43.5	146.6	40	7.4	20.2	18.05
201	23.02.1980	22:38	43.2	146.9	39	6.7	19.2	32.85
202	19.02.1981	19:36	44.6	149.5	42	6.1	18.3	32.85
203	30.04.1981	14:41	43.4	150.1	30	7.0	19.6	32.85
204	03.09.1981	05:35	43.6	147.1	45	7.3	20.0	140.12
205	03.09.1982	01:32	44.0	148.4	40	6.7	19.1	24.35
206	30.06.1983	13:39	44.1	147.8	38	6.4	18.8	8.84
207	24.03.1984	09:44	44.0	148.3	42	8.0	21.1	15.72
208	03.12.1984	04:08	44.1	148.3	53	6.6	19.3	41.35
209	17.12.1984	23:30	44.5	149.8	39	6.5	18.8	17.64
210	14.03.1986	08:42	44.0	147.6	78	5.0	16.6	6.55
211	16.04.1986	12:52	44.0	147.5	43	6.8	19.4	26.09
212	21.05.1986	05:47	44.4	148.3	64	6.7	19.1	124.88
213	31.05.1986	03:40	43.8	145.5	80	4.4	15.6	2.38
214	08.06.1986	11:02	43.0	146.5	64	6.3	18.5	17.64
215	13.06.1987	14:00	44.6	150.4	43	6.4	18.7	11.13
216	02.02.1992	17:43	45.4	150.8	44	6.0	18.0	9.92
217	05.02.1992	05:33	45.7	150.6	38	5.3	17.0	8.44
218	03.03.1992	03:11	44.3	149.0	32	6.0	18.0	37.71
219	10.07.1992	09:31	44.8	149.5	33	6.3	18.5	46.50
220	12.07.1992	02:11	44.1	147.2	54	5.9	17.9	16.85
221	12.07.1992	13:14	44.6	149.7	34	6.0	18.0	22.21
222	17.07.1992	04:19	45.0	150.2	40	5.7	17.5	9.47
223	15.01.1993	11:05	43.0	144.3	82	7.6	20.4	20.25
224	04.10.1993	13:22	43.7	147.6	30.35	8.2	21.3	99.20
225	04.10.1993	18:09	43.5	147.6	33	5.5	17.3	4.33
226	04.10.1993	18:22	43.4	148.3	33	5.0	16.5	7.70
227	04.10.1993	19:16	43.7	147.4	33	5.5	17.3	7.35
228	04.10.1993	20:01	43.8	147.7	33	5.8	17.8	15.36
229	04.10.1993	20:06	43.5	147.0	33	4.9	16.2	3.86
230	04.10.1993	21:39	44.4	148.4	30	5.1	16.5	3.95
231	05.10.1993	00:02	43.3	147.8	33	4.6	16.0	2.43
232	05.10.1993	04:00	45.6	147.9	52	6.8	19.2	86.40
233	05.10.1993	07:16	42.9	148.1	29	5.8	17.8	12.20
234	05.10.1993	12:34	43.8	148.3	33	5.0	16.6	4.43
235	06.10.1993	07:38	43.3	148.6	33	5.4	17.1	5.71
236	06.10.1993	23:20	44.3	148.7	33	4.6	16.0	1.76

No.	Date	Hour: min	$\varphi^\circ$	$\lambda^\circ$	$H$ , km	$M_w$	$\lg M_0$ , N·m	$\Delta\sigma$ , MPa
237	07.10.1993	02:36	43.5	147.5	31	4.8	16.2	3.86
238	07.10.1993	07:00	43.2	147.0	33	5.4	17.2	9.92
239	07.10.1993	15:00	42.7	148.0	32	5.6	17.4	7.35
240	08.10.1993	05:28	43.2	146.8	33	5.5	17.3	10.39
241	09.10.1993	07:55	43.8	148.1	35	7.9	21.0	62.59
242	09.10.1993	08:07	43.8	148.2	30	6.2	18.4	14.01
243	09.10.1993	08:49	43.8	148.3	30	5.8	17.7	10.63
244	09.10.1993	12:24	43.8	147.6	30	4.9	16.4	6.12
245	16.10.1993	05:09	45.5	149.5	180	5.9	17.7	10.88
246	18.10.1993	10:42	44.6	148.7	100	4.4	15.6	2.27
247	24.10.1993	19:27	44.0	148.4	52	5.2	16.9	5.21
248	25.10.1993	13:30	43.3	146.7	30	4.9	16.2	2.43
249	09.11.1993	18:21	43.8	147.7	100	5.1	16.7	8.84
250	22.11.1993	11:12	44.1	147.3	90	5.1	16.8	3.95
251	25.11.1993	08:49	43.3	148.9	60	5.2	16.8	3.77
252	27.12.1993	20:43	45.0	149.2	33	6.0	18.0	22.21
253	04.01.1995	23:14	43.3	147.5	33	4.8	16.3	2.86
254	12.01.1995	10:27	43.9	147.2	50	5.6	17.5	10.39
255	13.01.1995	03:13	43.2	147.0	33	5.4	17.1	5.71
256	20.01.1995	03:35	43.4	146.7	55	4.8	16.2	2.43
257	21.01.1995	08:47	43.4	146.9	60	6.3	18.4	17.64
258	02.06.1995	16:33	43.5	147.6	30	4.7	16.1	5.58
259	03.12.1995	18:01	44.7	149.3	33	7.6	20.8	279.58
260	06.01.1996	15:28	45.4	151.0	33	5.3	17.0	8.64
261	31.01.1996	20:30	44.5	149.4	21	5.9	18.0	11.13
262	22.02.1996	14:59	45.1	148.7	140	5.9	18.0	8.84
263	09.03.1996	16:15	43.4	148.0	27	6.4	18.7	38.59
264	17.08.1996	06:29	44.5	148.2	110	5.5	17.2	6.55

## Об авторах

## About the Authors

**Богомолов Леонид Михайлович** (<https://orcid.org/0000-0002-9124-9797>), доктор физико-математических наук, директор, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, [bleom@mail.ru](mailto:bleom@mail.ru)

**Сычев Владимир Николаевич** (<https://orcid.org/0000-0001-7508-9087>), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Центра коллективного пользования, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, [koitash@mail.ru](mailto:koitash@mail.ru)

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

**Bogomolov, Leonid M.** (<https://orcid.org/0000-0002-9124-9797>), Doctor of Physics and Mathematics, Director, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, [bleom@mail.ru](mailto:bleom@mail.ru)

**Sychev, Vladimir N.** (<https://orcid.org/0000-0001-7508-9087>), Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Center for Collective Use, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, [koitash@mail.ru](mailto:koitash@mail.ru)

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

Поступила 11.01.2023

После доработки 20.02.2023

Принята к публикации 26.02.2023

Received 11 January 2023

Revised 20 February 2023

Accepted 26 February 2023



## МОНИТОРИНГ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 550.343(571.642)

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.1.054-064.064-074>  
<https://www.elibrary.ru/kblexp>

## От ретроспективы к системе реального времени – прогноз землетрясений методом LURR на Сахалине (2019–2022 гг.)

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

\*E-mail: [a.zakupin@imgg.ru](mailto:a.zakupin@imgg.ru)

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

<sup>2</sup>Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия

**Резюме.** Представлены результаты эксперимента по реализации оперативного анализа сейсмичности Сахалина методом среднесрочного прогноза землетрясений LURR. Мониторинг начат в 2022 г. на основе расчетов параметра LURR по сейсмическим данным 2019–2021 гг. Территория острова разделена на 36 расчетных областей, которые равномерно его покрывают с шагом 0.5 градуса по широте и долготе. Построены зоны прогноза для этого периода, включающие те расчетные области, в которых выявлялись аномалии параметра LURR. В течение 2022 г. ежеквартально добавлялась информация о новых аномалиях и зонах прогноза. Основная цель эксперимента – апробация работы с данными в режиме квазиреального времени и проверка качества решения процедурных вопросов по ведению прогноза от стадии утверждения до стадии завершения. За 2019–2022 гг. было обнаружено 25 аномалий прогнозного параметра. В ретроспективной базе (с 2019 по 2021 г.) выявлено две зоны прогноза в 2020 г. (состоящие из 9 и 4 расчетных областей соответственно). Еще две зоны прогноза сформировались в 2022 г. (3 и 6 расчетных областей). Для трех зон прогноза на заседаниях Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям (СФ РЭС) были приняты прогнозы с определением времени, места и силы. В течение 2022 г. два прогноза из трех были признаны реализовавшимися. В третьей зоне прогноз реализовался, но землетрясение с требуемыми параметрами произошло вслед за определением зоны в течение одного квартала, т.е. зафиксированы были одновременно и зона прогноза, и его реализация, уже постфактум (обработка данных осуществляется раз в квартал). В таком случае прогноз не признается ни пропущенной целью, ни реализовавшимся в реальном времени (ретроспективно это успешный прогноз), а процедурно определяется как технический пропуск. По состоянию на начало 2023 г. на севере острова есть одна действующая зона прогноза. Эксперимент продолжается.

**Ключевые слова:** сейсмичность, сейсмические события, метод LURR, каталог землетрясений, аномалия, мониторинг

## From retrospective to real-time system – LURR earthquake prediction on Sakhalin (2019–2022)

Aleksander S. Zakupin\*<sup>1</sup>, Natalya V. Kostyleva<sup>1</sup>, Dmitry V. Kostylev<sup>1,2</sup>

\*E-mail: [a.zakupin@imgg.ru](mailto:a.zakupin@imgg.ru)

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

<sup>2</sup>Sakhalin Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

**Abstract.** The results of an experiment on the implementation of operational analysis of Sakhalin seismicity by the LURR method of medium-term earthquake prediction are presented. Monitoring began in 2022 on the basis of the LURR parameter calculations based on 2019–2021 seismic data. The island territory is divided into 36 calculated areas, which evenly cover it in increments of 0.5 degree in latitude and longitude. Prediction zones for this period are constructed, including those calculated areas in which anomalies of the LURR parameter have been detected. During 2022, information about new anomalies and prediction zones was added quarterly. The main objective of the experiment is to test the work with data in quasi-real time mode and to check the quality of solving the procedural issues related to prediction from the approval stage to the completion one. In the period of 2019–2022, 25 anomalies of the prediction parameter were detected. In the retrospective database (from 2019 to 2021), two prediction zones were identified in 2020 (consisting of 9 and 4 calculation areas, respectively). Two more prediction zones were formed in 2022 (3 and 6 calculation areas). Predictions with the definition

of time, place and strength were approved for three prediction zones at the meetings of the Sakhalin Branch of the Russian Expert Council on Emergency Situations (SB REC). During 2022, two out of three predictions were recognized as realized. In the fourth zone, the prediction was realized, but an earthquake with the required parameters has occurred after the definition of the zone within a quarter, i.e. both the prediction zone and its implementation were simultaneously recorded, already after the fact (data processing is carried out once a quarter). In this case, the forecast is not recognized as either a missed goal or realized in real time (retrospectively, this is a successful forecast), but it is procedurally defined as a technical omission. As of the beginning of 2023, there is one active prediction zone in the north of the island. The experiment continues.

**Keywords:** seismicity, seismic events, LURR method, earthquakes catalog, anomaly, monitoring

**Для цитирования:** Закупин А.С., Костылева Н.В., Костылев Д.В. От ретроспективы к системе реального времени – прогноз землетрясений методом LURR на Сахалине (2019–2022 гг.). *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 1, с. 54–74. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.054-064.064-074>; <https://www.elibrary.ru/kblexp>

**For citation:** Zakupin A.S., Kostyleva N.V., Kostylev D.V. From retrospective to real-time system – LURR earthquake prediction on Sakhalin (2019–2022). *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 1, pp. 54–74. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.054-064.064-074>; <https://www.elibrary.ru/kblexp>

## Введение

Начиная с 2015 г. сотрудниками Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) получены интересные результаты в области среднесрочных прогнозов землетрясений на Сахалине методом LURR (load-unload response ratio). Разработаны методики по использованию алгоритма LURR, которые отличаются универсальностью в выборе параметров обработки, что обеспечивает возможность повторения полученных результатов и невозможности их «подгонки». Действительно, в работах китайских ученых [1], которые первыми предложили методику LURR, расчетные параметры менялись для каждого прогноза (что делает невозможным оперативный прогноз). В наших же расчетах эти параметры имеют фиксированные значения. Так, были определены: диапазон магнитуд в рабочей выборке (от 3.3 до 5.0), величины скользящего окна (360 дней) и сдвига (30 дней), вид и размер области для расчета (окружность–эллипс радиусом в  $1^\circ$ ). С применением перечисленных параметров в расчетах по методу LURR для разных частей о. Сахалин были получены весьма убедительные результаты [2, 3]. С помощью разработанного подхода в последнем большом ретроспективном исследовании [4] за период с 1997 по 2019 г. на Сахалине было выявлено 15 прогнозных зон (представляющих собой расчетные области с аномалиями параметра LURR), в 11 из которых затем (в сроки, не превышающие 2 лет) происходили землетрясения с магнитудами  $>5.0$ . Из 19 землетрясений с  $M \geq 5.0$  (а именно столько произошло на Сахалине с 1997 по 2019 г.) 16 попало в установленные прогнозные зоны. Особенно убедительно в плане прогноза выглядит

статистика по сильным землетрясениям (Нефтегорское 1995 г., Углегорское 2000, Невельское 2007, Уангское 2010, Онорское 2016 г.). Примечательно, что часть прогнозов была сделана в реальном времени. По двум землетрясениям (Онорское 2016 г., Крильонское 2017 г.) прогнозы рассматривались на заседаниях Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям (СФ РЭС, протоколы № 3 от 11.05.2016 г. и № 2 от 16.03.2017 г.). Оба прогноза были признаны реализованными.

Полученные результаты показали готовность сейсмологов ИМГиГ ДВО РАН и Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН) перейти к следующему этапу работы – выявление аномалий прогнозного параметра в реальном времени в режиме непрерывного расчета с достаточной дискретизацией. На самом деле, в открытом доступе не так много примеров такого рода экспериментов. Одним из таких в российской практике является продолжительный эксперимент в реальном времени с методами M8 и MSc [5]. Как утверждает автор [5], данные мировой сети обрабатывались каждые 6 мес., а результаты в режиме закрытого доступа публиковались на внутреннем сайте Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН. При этом даже при относительно скромной статистике целевых землетрясений (17 землетрясений с магнитудами  $>8.0$ ) с 1992 по 2010 г. в работе [5] нет данных по всем землетрясениям, приведены лишь примеры. Судя по итоговым результатам данного эксперимента, представленным в журнале «Natural hazards» [6], которые, по суще-

ству, уже два года до этого были опубликованы в России [5], последними в цепочке успешных прогнозов стали землетрясения Чили (2010 г.) и Тохоку (2011 г.). Известно, что эксперимент продолжается в настоящее время.

Эксперимент по прогнозу землетрясений методом LURR в реальном времени для о. Сахалин был начат в 2022 г. Основная цель эксперимента – это апробация работы с данными в режиме квазиреального времени и проверка качества решения процедурных вопросов по ведению прогноза от стадии утверждения до стадии завершения. В данной статье приводятся результаты первого года (статистика по прогнозам) и обсуждаются аспекты, которые позволят улучшить качество работы в последующие периоды исследования.

### Методология эксперимента

Эксперимент предполагает получение и анализ данных в оперативном (обновление раз в квартал, задержка не более месяца от текущего времени) режиме.

Проект изначально ориентирован на среднесрочные оценки, которые метод LURR, собственно говоря, и обеспечивает. По ранее полученным данным [4], более 85 % случаев успешных прогнозов имели период ожидания со времени появления аномалии от 0.5 до 2 лет. Редкие случаи дают меньшие или большие сроки [4], поэтому обновление данных раз в квартал должно быть достаточным для того, чтобы не допустить пропусков.

Для анализа сейсмичности Сахалина методом LURR используется оперативный каталог из базы данных РИОЦ «Южно-Сахалинск». Каждое событие обрабатывается по группе станций для уточнения координат и магнитуд. После дополнительной обработки данных составляется новый каталог, в котором остаются события, соответствующие критериям рабочей выборки. Подготовленный каталог преобразуется в формат, необходимый для выполнения расчетов параметра LURR.

Методика расчетов параметра LURR, включая принципы определения расчетных зон, выявления аномалий и определения зон прогноза, полностью соответствует той, которую тестировали в масштабном исследовании сейсмичности Сахалина в период 1997–2019 гг. [4]. Напомним, что в качестве базового

параметра для расчета LURR используется корень из сейсмической энергии (деформация Бенъоффа). Основные принципы методики: достаточно плотное покрытие территории расчетными областями (это окружности радиусом один градус, которые расположены через 0.5°; остров, таким образом, поделен на 36 областей); фиксированные параметры математической обработки (скользящее окно в 360 дней); рабочая выборка землетрясений в области расчета в диапазоне магнитуд от 3.3 до 5); период ожидания 2 года. Все эти значения прошли апробацию в многочисленных экспериментальных исследованиях и доказали свою состоятельность [2–4]. Также определены и принципы выделения аномалий, в частности один из главных параметров – это порог (равен 3), при превышении которого параметр выходит в область аномальных значений.

Для эксперимента, которому посвящена настоящая работа, ежеквартально каталог пополняется новыми сейсмическими событиями и в каждой из 36 расчетных областей заново производится расчет параметра LURR с началом отсчета в 2019 г.

Выбор 2019 г. как точки начала эксперимента основан на том, что последние расчеты для Сахалина были выполнены до 2019 г. [4], а для того, чтобы иметь задел по данным, достаточно предыстории в 2 или более лет. При обнаружении аномалий информация по ним заносится в базу данных, и фиксируется зона прогноза (геометрически это набор расчетных областей). При наличии одновременной (в продолжение максимум 6 мес.) концентрации аномалий в соседствующих областях формируются укрупненные зоны прогноза.

Полученные данные по 36 расчетным областям аккумулируются на специальном сервисе СФ РЭС в виде демонстрации выявленных аномалий и сформированных по ним опасным зонам на о. Сахалин. При определении таких зон в них производится мониторинг с представлением на заседаниях СФ РЭС отчетов каждые 3 мес. в течение всего установленного периода тревоги (2 года). Если в период тревоги в зоне прогноза происходит сейсмическое событие с магнитудой  $M > 5$ , то прогноз снимается и считается реализовавшимся. Период тревоги заканчивается, и мониторинг зоны прекращается. Эксперимент начался в 2022 г.

и проводится совместно ИМГиГ ДВО РАН и СФ ФИЦ ЕГС РАН в рамках работы Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям (СФ РЭС).

## Результаты

По результатам обработки данных за период с 2019 по 2022 г. на территории о. Сахалин и прилегающих акваторий нами были выявлены 4 зоны со среднесрочными прогнозами землетрясений.

Первая информация после обработки данных каталога с 2019 по 2021 г. была представлена в СФ РЭС с заявкой на среднесрочные прогнозы землетрясения с магнитудой  $M \geq 5.0$  ( $\pm 0.1$ ) для двух зон: в северной (9 расчетных областей) и южной (4 расчетные области) частях о. Сахалин и прилегающих акваторий или территорий (рис. 1 и 2). Геометрически зоны прогноза определялись по границам расчетных областей, составляющих прогнозные зоны: 1)  $51.5\text{--}54^\circ$  с.ш.,  $141\text{--}144^\circ$  в.д.; 2)  $45\text{--}47.5^\circ$  с.ш.,  $141\text{--}144^\circ$  в.д.

С учетом того, что в обеих зонах прогноза аномалии в расчетных областях завершались в 2021 г. (параметр LURR переходил в фоновый режим), тревожный период был установлен до конца 2023 г. (протокол СФ РЭС № 1 от 25.01.2022 г.). Решение совета было следующим:

для северной и южной частей о. Сахалин (в указанных координатах) объявить прогнозы землетрясений с  $M \geq 5.0$  и утвердить их действие с 1 февраля 2022 г. по 31 декабря 2023 г.

*Прогноз № 1.* Первый из прогнозов реализовался 05.02.2022 г. в 21:18:52 UTC (06.02.2022 г. в 08:18:52 сахалинского времени). В 23 км восточнее села Вал и в 48 км северо-восточнее с. Горячие Ключи (Ногликский район) произошло землетрясение с  $M_L = 5.3$ . Координаты эпицентра –  $52.47^\circ$  с.ш. и  $143.53^\circ$  в.д., глубина 22 км. Параметры землетрясения по данным результатов обработки российских и международных сейсмологических центров приводятся в табл. 1.

Расчетная интенсивность по данным акселерометров в Ногликах и Охе составила 4 балла, по данным опросных листов в г. Оха, пгт. Ноглики, с. Тунгор, Некрасовка, Москальво, Вал – также 4 балла (опрос проводился среди работников администраций поселков, в школах, в отделениях связи, магазинах). За последующие двое суток произошло 20 афтершоков с  $M_L$  от 2.1 до 3.6. Информация об эпицентрах землетрясения и его афтершоков представлена на карте (рис. 1).

Землетрясение произошло на восточном шельфе Северного Сахалина. В структурном отношении шельф представляет собой

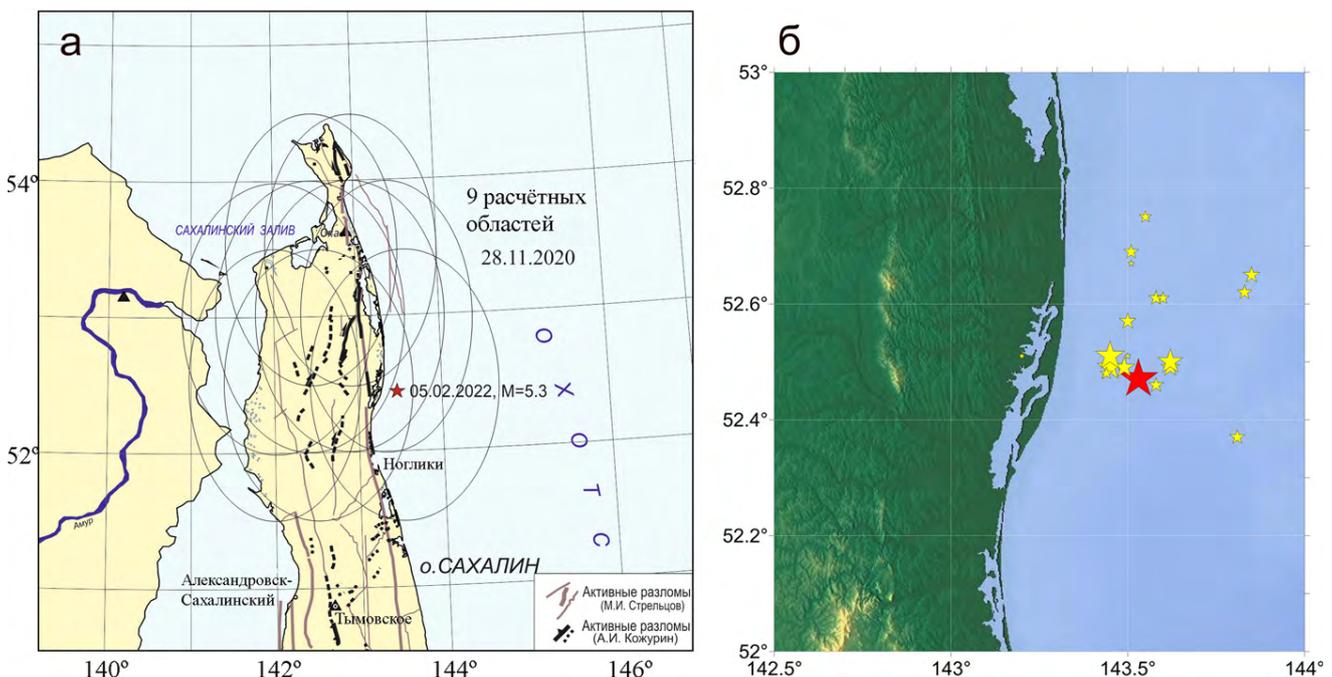


Рис. 1. Карта зоны прогноза № 1 с указанием даты начала тревожного периода, эпицентра (обозначен звездочкой) и даты землетрясения (по сахалинскому времени) – реализации прогноза (а) и карта афтершоков землетрясения 05.02.2022 г. ( $M_L = 5.3$ ) (б).

систему субмеридиональных чередующихся поднятий и впадин. Впадины практически полностью компенсированы осадконакоплением. По материалам сейсмических исследований в направлении с запада на восток выделяются следующие структурные элементы: Пильтунская впадина, Одоптинское и Восточно-Одоптинское поднятия. Мористее располагается Восточно-Сахалинский прогиб и его некомпенсированная осадками часть – замкнутая батинальная впадина Дерюгина [7]. Одоптинское и Восточно-Одоптинское поднятия разделены очень узким прогибом. Обе эти структуры объединяются в одно поднятие. С западной стороны оно ограничено Западно-Одоптинским разломом, к которому примыкает Пильтунская впадина, а с востока – Восточно-Сахалинским разломом, к которому примыкает Восточно-Сахалинский прогиб [7]. Сейсмичность Восточно-Сахалинской системы разломов представлена следующими землетрясения-

ми: на границе впадины Дерюгина (1944 г.  $M = 5.5$ ), Охинско-Пильтунскими 1932, 1939, 1942 и 1953 гг. ( $M = 5.0-5.5$ ) [8], а также Пильтунским 12.06.2005 г. с  $M_w = 5.6$ .

По совокупности признаков прогноз был признан реализовавшимся, а наблюдение за зоной в пределах указанных координат прекращено (протокол № 2 СФ РЭС от 15.04.2022 г.).

*Прогноз № 2.* По второму прогнозу на юге Сахалина (4 расчетные области с аномалиями LURR, рис. 2) в августе 2022 г. были получены данные, свидетельствующие о его реализации на севере о. Хоккайдо.

10 августа 2022 г. в 15:52:59 UTC на северо-западной оконечности о. Хоккайдо (Япония) произошло землетрясение с  $M_L = 5.2$ . Эпицентр располагался в непосредственной близости от пос. Накагава (округ Камикава, губернаторство Хоккайдо). Параметры землетрясения по данным результатов обработки российских и международных сейсмологических центров приведены в табл. 2.

**Таблица 1.** Параметры землетрясения 05.02.2022 г. с эпицентром в Ногликском районе

Источник данных	Время в очаге, $t_0$ , ч:мин:с	Координаты эпицентра		Глубина $h$ , км	Магнитуда		
		$\varphi^\circ$ , N	$\lambda^\circ$ , E		$M_w$	$m_b$	$M_L$
РИОЦ «Южно-Сахалинск»	21:18:52.0	52.47	143.53	22	–	–	5.3
ССД ФИЦ ЕГС РАН	21:18:52.0	52.61	143.36	20	–	5.7	–
EMSC	21:18:51.8	52.57	143.29	17	5.2	–	–
GEOFON	21:18:52.1	52.55	143.34	15	5.3	–	–
USGS	21:18:52.0	52.59	143.28	10	5.2	–	–

*Примечания.*  $M_w$  – магнитуда по Канамори,  $m_b$  – магнитуда объемных волн,  $M_L$  – локальная магнитуда. РИОЦ – региональный информационный обрабатывающий центр «Южно-Сахалинск»; ССД ФИЦ ЕГС РАН – Служба срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН, Обнинск, Россия; EMSC – Европейский сейсмологический центр (<http://www.emsc-csem.org/Earthquake/earthquake.php?id=324605>); GEOFON – Helmholtz Centre Potsdam (<http://geofon.gfz-potsdam.de/eqinfo/form.php>); USGS – United States Geological Survey (<https://earthquake.usgs.gov/>).

**Таблица 2.** Параметры землетрясения 10 августа 2022 г. с эпицентром на северо-западной оконечности о. Хоккайдо (Япония)

Источник данных	Время в очаге, $t_0$ , ч:мин:с	Координаты эпицентра		Глубина $h$ , км	Магнитуда		
		$\varphi^\circ$ , N	$\lambda^\circ$ , E		$M_w$	$m_b$	$M_L$
РИОЦ «Южно-Сахалинск»	15:52:59	44.86	142.04	11	–	–	5.2
ССД ФИЦ ЕГС РАН	15:52:59	45.06	142.04	10	–	5.1	–
EMSC	15:52:59	45.03	142.07	10	5.1	–	–
GEOFON	15:53:04	44.98	141.99	42	–	4.9	–
JMA	15:51:00	44.90	142.06	10	–	–	5.1

*Примечание.* JMA – Japan Meteorological Agency (<https://www.jma.go.jp/jma/en/menu.html>).

Остальные условные обозначения см. в табл. 1.

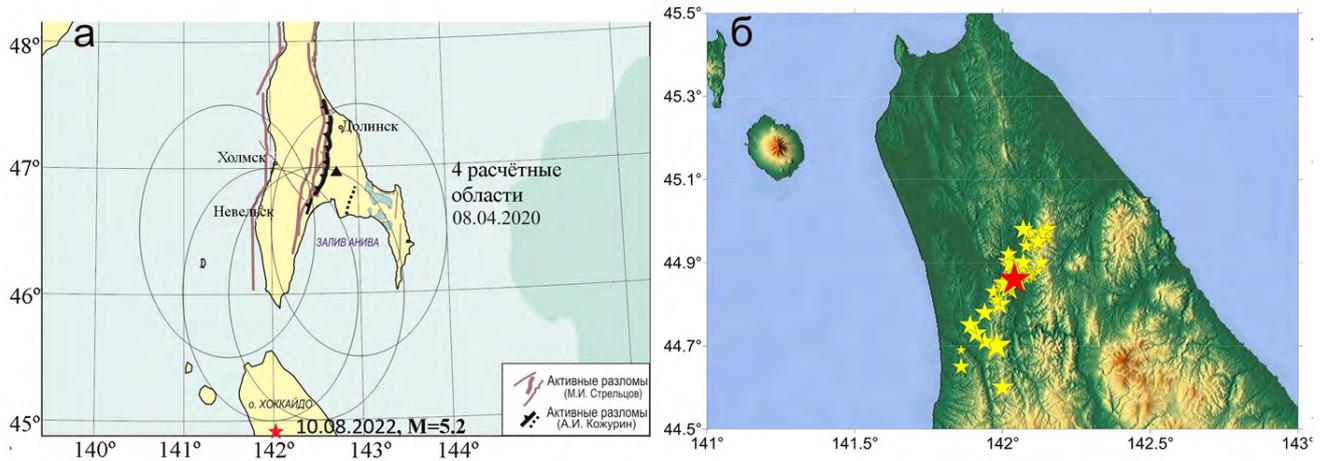


Рис. 2. Карта зоны прогноза № 2 с указанием даты начала тревожного периода, эпицентра (обозначен звездочкой) и даты землетрясения (по сахалинскому времени) – реализации прогноза (а) и карта афтершоков землетрясения 10.08.2022 г. ( $M_L = 5.2$ ) (б).

С помощью различных программных средств обработки установлено, что расхождения разных сейсмологических агентств в определении параметров гипоцентра и энергетических оценок землетрясения 10 августа 2022 г. минимальны. В определении параметров землетрясения были использованы данные региональной сети сейсмических станций Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН, станций Института вулканологии и сейсмологии университета Хоккайдо и станций ДВО РАН. Сетью станций сети на 20 августа 2022 г. было зарегистрировано 43 афтершока с магнитудами от 1.0 до 4.5 (рис. 2).

По определениям эпицентра различными агентствами, землетрясение произошло на границе прогнозной зоны (рис. 2) на широте около  $45^\circ$ . Поскольку по условиям эксперимента не предусмотрено расчетных областей за

пределами Сахалина ниже  $45^\circ$  с.ш., землетрясение 10.08.2022 не попадает в зону прогноза, а его эпицентр удален от ее границы примерно на 13 км. Учитывая, что расчетная зона прогноза может быть продолжена на юг от Сахалина, а отклонение эпицентра от границы зоны по отношению к линейному размеру прогнозной зоны (275 км) меньше 5 %, можно признать прогноз состоявшимся. Но мы решили провести расчеты параметра LURR в пятой, дополнительной к нашим четырем, области с центром в позиции  $44^\circ$  с.ш. и  $142^\circ$  в.д. (рис. 3). Используемый нами каталог не предусматривает покрытие территории ниже  $45^\circ$ , поэтому для расчета использовались данные каталогов Геологической службы США (United States Geological Survey – USGS) (<https://earthquake.usgs.gov/>).

По результатам проверочного расчета, с 2016 по 2022 г. в этой области фиксируется

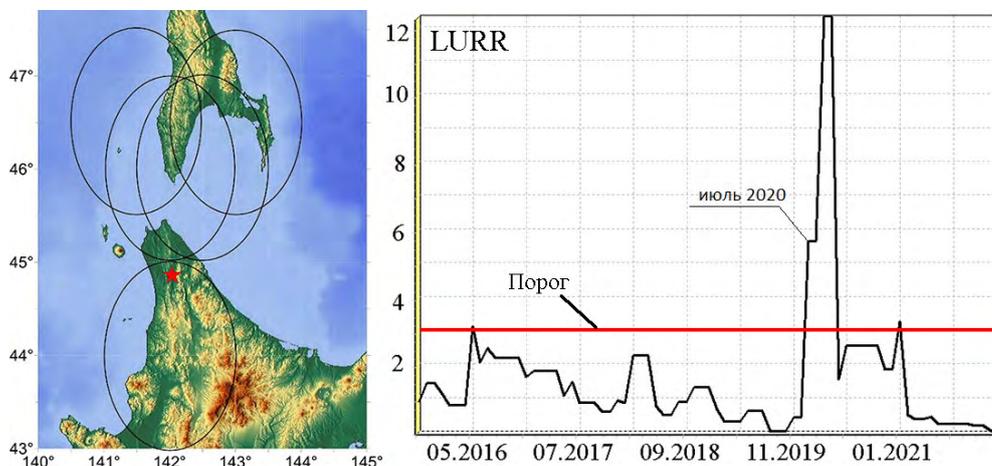


Рис. 3. Дополнительная расчетная область на Хоккайдо (слева) и расчет параметра LURR в ней в период с 2016 по 2022 г. по данным USGS.

аномалия LURR в июле 2020 г. (рис. 3), что говорит о единстве всех 5 областей для сформированной прогнозной зоны (по 4 сахалинским областям аномалии появились в апреле 2020 г.). Таким образом, зона, сформированная изначально в южной части о. Сахалин в апреле 2020 г., затем была расширена дальше на юг, покрыв северную оконечность о. Хоккайдо. Этот расчет носит исключительно проверочный характер, и в будущем увеличение количества расчетных областей для охвата о. Хоккайдо не предусматривается. Причина в том, что использованные каталоги Геологической службы США не являются полностью пригодными для расчетов LURR, так как содержат информацию о землетрясениях начиная с магнитуды равной 4.0, а для наших расчетов используется выборка начиная с  $M = 3.3$ . Но для данного случая расчет имеет доказательную силу.

Землетрясение 10.08.2022 г. произошло, по всей видимости, в месте контакта тектонических структур. С западной стороны от эпицентра расположены Монеронская зона и зона Ребун-Кобато, которые в совокупности протягиваются немногим севернее о. Монерон. Центральная же часть о. Хоккайдо сложена образованиями зоны Камуикотан и смежной с ней Сусунайской, которая является северным ее продолжением [8].

В связи со значительной освоенностью северной части о. Хоккайдо (по сравнению с севером о. Сахалин) это землетрясение имело гораздо более высокий уровень макросейсмических про-

явлений, чем сейсмическое событие 5 февраля 2022 г. Согласно данным Японского метеорологического агентства (JMA) (<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/#20220811005300>), интенсивность землетрясения в пос. Накагава составила 5+ баллов по шкале JMA (JMA. Table explaining the JMA Seismic Intensity Scale, <http://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/inttable.html>), что соответствует [9] 6 баллам по шкале MSK-64 и характеризует сильные землетрясения. В прочих населенных пунктах севера о. Хоккайдо, в частности в округах Соя и Румои, интенсивность составила 3-4 балла по шкале JMA. На территории Сахалинской области, в связи со значительным удалением ближайших населенных пунктов от очага землетрясения, данное сейсмическое событие не ощущалось. Согласно инструментальным данным по записям ближайшей к очагу сейсмической станции в г. Невельск (200 км от эпицентра), интенсивность составила 1 балл по шкале MSK-64.

Таким образом, обе зоны прогноза, с которых стартовал проект, были сняты с мониторинга в 2022 г. с удовлетворительными показателями результативности реализаций.

Однако год не прошел без появления новых аномалий, которые, в итоге, сформировали две новые зоны прогноза (рис. 4, 5).

*Прогноз № 3.* К сожалению, один из прогнозов, по общему счету третий, квалифицируется как «технический пропуск». Как было уже сказано в методическом разделе, обновление данных раз в квартал должно было быть

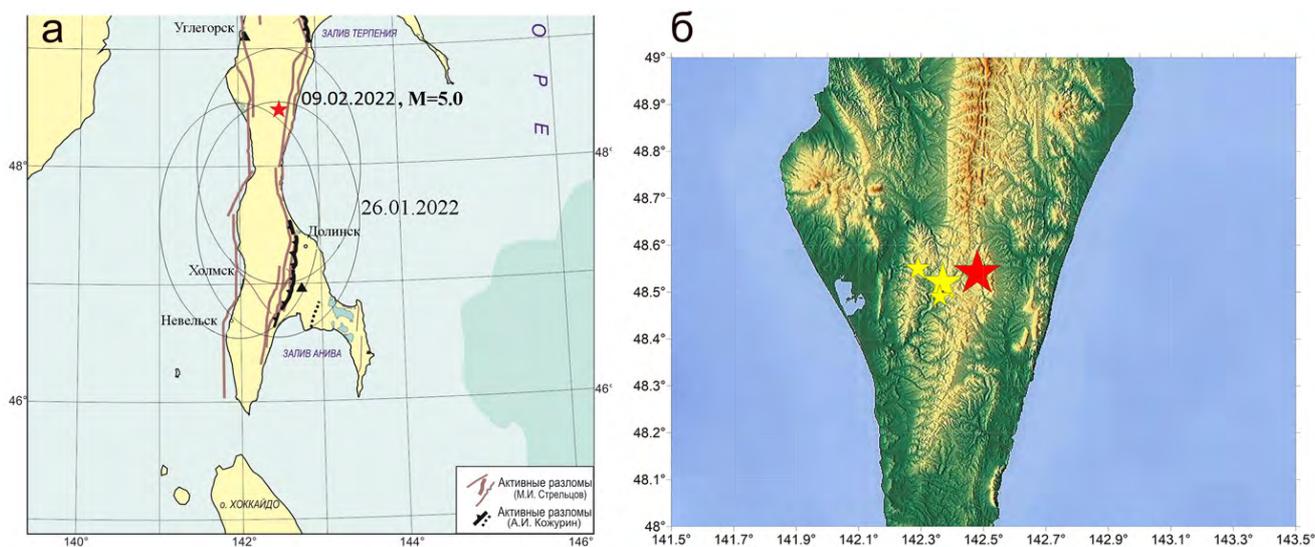


Рис. 4. Карта зоны прогноза № 3 с указанием даты начала тревожного периода, эпицентра (обозначен звездочкой) и даты землетрясения (по сахалинскому времени) – реализации прогноза (а) и карта афтершоков землетрясения 09.02.2022 г. ( $M_L = 5.0$ ) (б).

**Таблица 3.** Параметры землетрясения 8 февраля 2022 г. с эпицентром юго-западнее села Поречье Макаровского района Сахалинской области

Источник данных	Время в очаге, $t_0$ , ч:мин:с	Координаты эпицентра		Глубина $h$ , км	Магнитуда		
		$\varphi^\circ$ , N	$\lambda^\circ$ , E		M <sub>w</sub>	m <sub>b</sub>	M <sub>L</sub>
РИОЦ «Южно-Сахалинск»	22:29:00.7	48.54	142.48	13.7	–	–	5.0
ССД ФИЦ ЕГС РАН	22:29:03.0	48.52	142.42	10	–	5.0	–
EMSC	22:29:02.6	48.52	142.44	10	5.0	–	–
GEOFON	22:29:03.7	48.48	142.47	10	–	4.8	–
USGS	22:29:02.0	48.51	142.37	10	4.9	–	–

Примечание. Условные обозначения см. в табл. 1.

достаточным для того, чтобы не допустить пропусков. Однако уже в первые месяцы эксперимента такой случай произошел. В конце января 2022 г. появились аномалии в трех расчетных областях (рис. 4), которые зафиксированы были после обработки данных в апреле 2022 г. (с обновлением данных за 1 квартал). И тогда же в процессе анализа каталога обнаружилось, что прогнозная зона из этих трех расчетных областей была «отработана» 9 февраля, т.е. через две недели после появления аномалий.

8 февраля 2022 г. в 22:29:00.7 UTC (09.02.2022 г. в 09:29:00.7 сахалинского времени) в 21 км юго-западнее села Поречье Макаровского района и в 32 км северо-восточнее с. Красногорск (Томаринский район) произошло землетрясение с  $M_L = 5.0$ . Координаты эпицентра –  $48.54^\circ$  с.ш. и  $142.48^\circ$  в.д., глубина 13.7 км. Параметры землетрясения приводятся в табл. 3.

По данным опросных листов, интенсивность землетрясения в с. Восточное Макаровского района оценивается в 5 баллов, в с. Красногорск Томаринского района в 4-5 баллов, в г. Макаров 4 балла, в с. Поречье Макаровского района, г. Томари, с. Ильинское Томаринского района, г. Углегорск, с. Краснополюе Углегорского района – 3-4 балла, в п.г.т. Шахтерск Углегорского района – 3 балла. Расчетная интенсивность по данным акселерометров составила в г. Углегорск 2.5 балла, в с. Ильинское 3.3, в г. Долинск

2.6, в г. Холмск 1.5 балла; по данным велосипедометров – в г. Углегорск 2.9 балла, в с. Краснополюе 4.0, на мысе Хокуй Углегорского района 2.3 балла.

Землетрясение 8.02.2022 г. приурочено к районам пересечения Центрально-Сахалинского (Тынь-Поронайского) разлома с диагональными разломами Западно-Сахалинского разлома. И хотя ЦСР уступает в сейсмической активности Западно-Сахалинскому разлому, можно отметить здесь такие землетрясения, как Томаринское 1923 г.  $M = 5.2$  и Леонидовское 1957 г.  $M = 4.9$  [10].

*Прогноз № 4.* Прогноз по четвертой зоне официально утвержден и действует по состоянию на январь 2023 г. Он был составлен

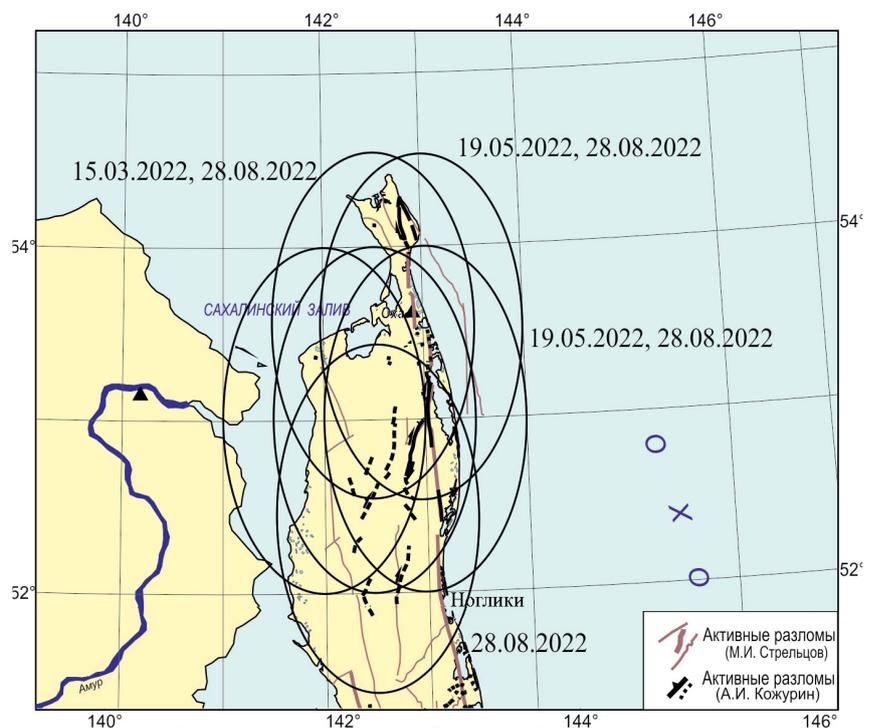


Рис. 5. Карта зоны зарегистрированного прогноза № 4.

по данным 2–4 кварталов 2022 г. На первом этапе, с марта по май 2022 г., в 3 расчетных областях на севере острова было обнаружено по одной аномалии LURR (рис. 5). Затем через 3 мес. в первоначальных 3 областях аномалии повторились, а в 3 новых, соседних, появились впервые. Таким образом, зона прогноза сформировалась с марта по август 2022 г. и представлена девятью аномалиями в шести расчетных областях. Решением СФ РЭС (протокол № 3 от 14.10.2022 г.) до мая 2024 г. объявлен среднесрочный прогноз сейсмического события с магнитудой  $M \geq 5.0$  ( $\pm 0.1$ ) для северной части о. Сахалин в границах от  $52.0$  до  $54.5^\circ$  с.ш., от  $141.5$  до  $144^\circ$  в.д., т.е. практически в тех же границах, что и зона прогноза № 1.

Ситуация, когда в зоне, где всего менее чем 2 года назад фиксировались аномалии, они фиксируются снова, нетривиальна. Технически, если бы землетрясение в феврале 2022 г. (рис. 1) не произошло, прогноз на территории мог быть продлен, и, в общем-то, такая практика не нова для СФ РЭС при работе с другими методами (долгосрочные прогнозы). Но оно произошло, и в таком случае прогноз снимается. Заметим, что параметр периода тревоги в методе LURR самый неопределенный (у нас до двух-трех лет, у китайских ученых еще больше). В данном случае один прогноз был снят, а другой через месяц объявлен.

О последствиях такой частоты проявления аномалий на севере Сахалина мы узнаем через несколько лет, а сейчас интересно обсудить потенциал сейсмогенерирующих зон, которые попадают в зону действующего на текущий период времени прогноза.

Все шесть расчетных областей расположены в пределах Восточно-Сахалинской разломной зоны. Восточно-Сахалинская зона неоднородна по строению. В восточной прибрежной зоне северной части острова она представлена Пильтунским и Гаромайским разломами. Предполагается [11], что для первого разлома характерны преимущественно сдвиговые (правосторонние) смещения, а для второго – взбросовые. Западнее системы Пильтунского и Гаромайского разломов протягивается правосдвиговый Верхне-Пильтунский разлом (Нефтегорский сейсморазрыв 1995 г.) с максимальной подвижкой  $8.1$  м [12]. Возможно, что южнее Нефтегорского аналогичный ему разлом протягивается

в осевой части Дагинского поднятия. Разлом вполне отчетливо выделяется на космических снимках разного разрешения и в топографии. Западнее Верхне-Пильтунского и Дагинского разломов выделены несколько субмеридиональных разрывов, но никаких данных для них, кроме выраженности на космических изображениях среднего разрешения, нет [11]. Одноактные смещения по сдвигам, кроме Нефтегорского разлома, нигде прямо не измерялись. Данные по Пильтунскому разлому, изложенные в статье [11], имеют характер оценочных, основанных на ряде допущений. Самыми северными элементами зоны являются активные правосдвиговые Хейтонский и Лонгрийский (в меньшей мере сдвиговый) разломы п-ова Шмидта. Хейтонский разлом, главный из двух, протягивается на север до линии побережья и, скорее всего, продолжается далее под водой в пределы шельфа. Нет ясности относительно южного продолжения разлома и его возможного соединения с Пильтунским разломом. Представляется, что возможен вариант пространственной независимости этих двух разломов.

Как указано в [7], инструментальные наблюдения говорят нам лишь о трех знаменательных событиях в этом районе (Восточно-Сахалинской зоне). Кроме Нефтегорского землетрясения там произошли землетрясения в 1935 г. Катанглийское,  $M = 5.6$ ; в 1964 г. Ногликское,  $M = 5.8$ , и в 1967 г. Северо-Сахалинское,  $M = 5.5$ . Как отмечается в [12], несоответствие палеоданным говорит лишь о малом периоде наблюдений, конечно, потенциал зоны много выше.

Наиболее правдоподобны оценки на основе максимальной магнитуды  $M_{\max}$ . Отдельные разломы генерируют землетрясения примерно одной (в пределах половины единицы) магнитуды, известные как характеристические землетрясения, близкие к их  $M_{\max}$ . Оценка  $M_{\max}$  проводится по длине разлома или по величине одноактной подвижки (с учетом смещения или без него). В настоящее время можно более или менее достоверно судить о длине только Пильтунского разлома, которая составляет примерно  $50$  км (считая его западную ветвь на севере вдоль западного побережья Торох). Гаромайский, Хейтонский и Лонгрийский разломы могут протягиваться на некоторое неизвестное расстояние под водой, т.е. доступны только

минимальные оценки их длины (~21, 37–40 и ~30 км соответственно). Исходя из вышеприведенных приблизительных оценок, используя зависимости из [13], получаем для  $L \sim 50$  км (Пильгунский разлом) –  $M_{w_{max}} \approx 7.1 (\pm 0.23)$ . В целом можно принять  $M_{max}$  равной 7–7.2 для всей Восточно-Сахалинской зоны. С учетом вышесказанного, прогноз, который на сегодняшний день действует по данной зоне, по величине характеристического уровня может иметь верхнюю планку  $M = 7.2$ .

Кроме оценки магнитуд характеристических землетрясений полезно вспомнить их повторяемость. На основе обобщений А.И. Кожурина по Пильгунскому разлому консервативная оценка колеблется от 700 до 2600 лет, а для Гаромайского около 5000 лет. Но это оценки последних событий по нескольким канавам (траншеям), а в целом при сегментации и объединении сегментов система Пильгун-Гаромайского разлома длиной около 600 км позволяет оценивать периоды повторяемости около 370 лет [12].

## Заключение

Подводя итоги первого года эксперимента по использованию метода LURR для среднесрочного прогноза в реальном времени, сведем информацию в результирующую таблицу (табл. 4). В ней продемонстрировано, что параметры заявленных и реализованных прогнозов в основном совпадают (учитывая ретроспективный прогноз по техническому пропуску).

Целевыми событиями в прогнозах нашего эксперимента являются землетрясения

с  $M \geq 5.0$ . С января 2019 г. по декабрь 2022 г. в зоне эксперимента таких землетрясений произошло три: в северной части о. Сахалин, в 23 км восточнее с. Вал и в 48 км северо-восточнее с. Горячие Ключи (Ногликский район), южнее о. Сахалин, на северо-западной оконечности о. Хоккайдо (Япония) и в центральной части Сахалина, в Макаровском районе.

Эти три землетрясения с  $M \geq 5.0$  стали реализациями для зон прогноза № 1–3: два в оперативном режиме и одно в ретроспективном (технический пропуск).

По расчетам параметра LURR с 2019 по 2022 г. было обнаружено 25 аномалий, которые по времени и пространству были сгруппированы в четыре зоны (из 9, 4, 3 и 6 расчетных областей) прогноза. На заседаниях Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям для трех зон были приняты прогнозы, по которым определены все необходимые атрибуты землетрясений – время, место и энергетический показатель. По двум зарегистрированным зонам, а также зоне, где зафиксирован технический пропуск, имеем успешную реализацию прогнозов. По четвертой зоне прогноз принят в 2022 г. и является действующим на момент публикации статьи, по нему осуществляется мониторинг. О развитии событий в данной зоне сообщим в следующей публикации по итогам непрерывного оперативного анализа сейсмичности Сахалина методом среднесрочного прогноза землетрясений LURR.

**Таблица 4.** Сводная таблица прогнозов за время эксперимента по данным за 2019–2022 гг.

Прогноз, №	Кол-во расчетных областей	Границы зоны		Период или дата начала формирования прогнозной зоны	Официальный статус документа	Дата реализации; магнитуда; координаты	Период тревоги до реализации
		N	E				
1	9	51.5°–54.5°	141.5°–144.5°	28.11.2020	Утвержден, снят	05.02.2022; $M_L = 5.3$ ; 52.47° N, 143.53° E	15 мес.
2	4	45°–47.5°	140.5°–144°	08.04.2020	Утвержден, снят	10.08.2022; $M_L = 5.2$ ; 45.06° N, 142.04° E	26 мес.
3	3	46.5°–49°	141°–143.5°	26.01.2022	Технический пропуск	05.02.2022; $M_L = 5$ ; 48.54° N, 142.48° E	10 дней
4	6	51.5°–54.5°	141°–144°	15.03.2022–28.08.2022	Утвержден, действует	Неприменимо	Неприменимо

## Список литературы

1. Yin X.C., Zhang L.P., Zhang H.H., Yin C., Wang Y., Zhang Y., Peng K., Wang H., Song Z., Yu H., Zhuang J. **2006**. LURR's twenty years and its perspective. *Pure Applied Geophysics*, 163: 2317–2341. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0135-x>
2. Закупин А.С., Левин Ю.Н., Богинская Н.В., Жердева О.А. **2018**. Развитие методов среднесрочного прогноза на примере Онорского землетрясения на Сахалине (Mw = 5.8, 14 августа 2016 года). *Геология и геофизика*, 11: 1904–1911. <https://doi.org/10.15372/gig20181112>
3. Закупин А.С., Богомолов Л.М., Богинская Н.В. **2020**. Последовательное применение методов анализа сейсмических последовательностей LURR и СРП для прогноза землетрясений на Сахалине. *Геофизические процессы и биосфера*, 1: 66–78. <https://doi.org/10.21455/GPB2020.1-4>
4. Закупин А.С., Богинская Н.В. **2021**. Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LURR на Сахалине: обобщение ретроспективных исследований за 1997–2019 гг. и новые подходы. *Геосистемы переходных зон*, 5(1): 27–45. <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.1.027-045>
5. Kossobokov V.G. **2011**. Are mega earthquakes predictable? *Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, 47(8): 951–996. <https://doi.org/10.1134/S0001433811080032>
6. Kossobokov V.G. **2013**. Earthquake prediction: 20 years of global experiment. *Natural Hazards*, 69(2): 1155–1177. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0198-1>
7. Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. **2007**. *Неотектоника и активные разрывы Сахалина*. М.: Наука, 186 с.
8. Жаров А.Э. **2004**. *Геологическое строение и меллеогеновая геодинамика юго-восточного Сахалина*. Южно-Сахалинск: Сах. обл. кн. изд-во, 192 с.
9. Musson R.M.W., Grünthal G., Stucchi M. **2009**. The comparison of macroseismic intensity scales. *Journal of Seismology*, 14(2): 413–428. <https://doi.org/10.1007/s10950-009-9172-0>
10. Оскорбин Л.С., Бобков О.А. **1997**. Сейсмогенные зоны Сахалина и сопредельных областей. Геодинамика зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Т. 6. В кн.: *Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, с. 154–178.
11. Булгаков Р.Ф., Иващенко А.И., Ким Ч.У., Сергеев К.Ф., Стрельцов М.И., Кожурин А.И., Бесстрашнов В.М., Стром А.Л., Судзуки Й., Цуцуми Х., Ватанабе М., Уеки Т., Шимимото Т., Окумура К., Гото Х., Кария Й. **2002**. Активные разломы северо-восточного Сахалина. *Геотектоника*, 3: 66–86.
12. Кожурин А.И., Ким Чун Ун. **2010**. Активные разломы о Сахалина, оценка магнитуды и повторяемости максимально возможных землетрясений. *Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири: докл. науч. симп., 1–4 июня 2010 г., Хабаровск*. Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, с. 138–141. URL: <http://neotec.ginras.ru/comset/kozhurin-a-i-dr-2010-aktivnyie-razlomyy-o-sahalin-ocenka-magnitudy-i-povtoryaemosti-maksimalno-vozmozhnyh-zemletryaseniyy.pdf>
13. Wells D.L., Coppersmith K.J. **1994**. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. of the Seismological Society of America*, 84: 974–1002.

## MONITORING OF GEOLOGICAL HAZARDS

TRANSLATION

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.054-064.064-074>  
<https://www.elibrary.ru/kblexp>

## From retrospective to real-time system – LURR earthquake prediction on Sakhalin (2019–2022)

Aleksander S. Zakupin\*<sup>1</sup>, Natalya V. Kostyleva<sup>1</sup>, Dmitry V. Kostylev<sup>1,2</sup>

\*E-mail: [a.zakupin@imgg.ru](mailto:a.zakupin@imgg.ru)

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

<sup>2</sup>Sakhalin Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

**Abstract.** The results of an experiment on the implementation of operational analysis of Sakhalin seismicity by the LURR method of medium-term earthquake prediction are presented. Monitoring began in 2022 on the basis of the LURR parameter calculations based on 2019–2021 seismic data. The island territory is divided into 36 calculated areas, which evenly cover it in increments of 0.5 degree in latitude and longitude. Prediction zones for this period are constructed, including those calculated areas in which anomalies of the LURR parameter have been detected. During 2022, information about new anomalies and prediction zones was added quarterly. The main objective of the experiment is to test the work with data in quasi-real time mode and to check the quality of solving the procedural issues related to prediction from the approval stage to the completion one. In the period of 2019–2022, 25 anomalies of the prediction parameter were detected. In the retrospective database (from 2019 to 2021), two prediction zones were identified in 2020 (consisting of 9 and 4 calculation areas, respectively). Two more prediction zones were formed in 2022 (3 and 6 calculation areas). Predictions with the definition of time, place and strength were approved for three prediction zones at the meetings of the Sakhalin Branch of the Russian Expert Council on Emergency Situations (SB REC). During 2022, two out of three predictions were recognized as realized. In the fourth zone, the prediction was realized, but an earthquake with the required parameters has occurred after the definition of the zone within a quarter, i.e. both the prediction zone and its implementation were simultaneously recorded, already

after the fact (data processing is carried out once a quarter). In this case, the forecast is not recognized as either a missed goal or realized in real time (retrospectively, this is a successful forecast), but it is procedurally defined as a technical omission. As of the beginning of 2023, there is one active prediction zone in the north of the island. The experiment continues.

**Keywords:** seismicity, seismic events, LURR method, earthquakes catalog, anomaly, monitoring

**For citation:** Zakupin A.S., Kostyleva N.V., Kostylev D.V. From retrospective to real-time system – LURR earthquake prediction on Sakhalin (2019–2022). *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 1, pp. 54–74. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.1.054-064.064-074>; <https://www.elibrary.ru/kblexp>

## Introduction

Since 2015, the employees of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS (IMGG FEB RAS) have obtained interesting results in the field of medium-term earthquake prediction on Sakhalin using the LURR method (load-unload response ratio). Methods for applying the LURR algorithm have been developed, which are characterized by the versatility in the choice of processing parameters, which provides the possibility of repeating the obtained results and impossibility of their «fitting». Indeed, in the works of Chinese scientists [1] who had first proposed the LURR method, the calculation parameters changed for each prediction (this makes an operational prediction impossible). In the case of our calculations, these parameters have fixed values. Thus, the range of magnitudes in the working sample (from 3.3 to 5.0), the size of the sliding window (360 days) and the shift (30 days), the type and size of the calculation area (circle-ellipse with a radius of  $1^\circ$ ) were determined. Very convincing results [2, 3] were obtained for different parts of Sakhalin Island using the above parameters in the LURR calculations. 15 prediction zones (which are the calculated areas with anomalies of the LURR parameter) were identified in Sakhalin for the period from 1997 to 2019 by means of the developed approach in the latest large retrospective study [4], in 11 of which then (within a period not exceeding 2 years) earthquakes occurred with magnitudes  $>5.0$ . 16 earthquakes out of 19 with  $M \geq 5.0$  (as it occurred in Sakhalin from 1997 to 2019) fell into the identified prediction zones. The statistics on strong earthquakes (Neftegorsk 1995, Uglegorsk 2000, Nevelsk 2007, Uanga 2010, Onor 2016) is especially convincing in terms of predictions. It is noteworthy, that some predictions were made in real time. The predictions for two earthquakes (Onor 2016, Krylon 2017) were considered at the meetings of the Sakhalin Branch of the Russian Expert Council on Emergency

Situations (SB REC, protocol no. 3 of 11.05.2016 and protocol no. 2 of 16.03.2017). Both predictions were considered realized.

The obtained results showed the readiness of seismologists of IMGG FEB RAS and Sakhalin Branch of the Federal Research Center «United Geophysical Survey of RAS» (SB FRC UGS RAS) to move on to the next stage of the work – detection of anomalies in prediction parameter in real time in the mode of continuous calculation with sufficient discretization. In fact, there are not many examples of this kind of experiment in the open access. One of these in Russian practice is a long-term experiment in real time with the M8 and MSc methods [5]. According to the author [5], the data of the world network were processed every 6 months. The results were published on the internal website of the Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of the Russian Academy of Sciences. At the same time, even with the relatively modest statistics of target earthquakes (17 earthquakes with magnitudes  $> 8.0$ ) from 1992 to 2010, there are no data on all earthquakes in the work [5], only examples are given. Judging by the final results of this experiment presented in the «Natural hazards» journal [6], which, in fact, had already been published in Russia two years earlier [5], the Chile (2010) and Tohoku (2011) earthquakes were the last in a chain of successful predictions. The experiment is known to be ongoing.

The LURR real-time earthquake prediction experiment for the Island of Sakhalin was started in 2022. The main objective of the experiment is to test the work with data in a quasi-real-time mode and to check the quality of solving the procedural issues related to prediction from the approval stage to the completion one. This article presents the results of the first year (prediction statistics) and discusses the aspects that will improve the quality of work in subsequent periods of the study.

## Experiment methodology

The experiment involves the acquisition and analysis of data in an operational (quarterly update, delay no more than a month from the current time) mode.

The project is primarily focused on the medium-term assessments that the LURR method provides, in fact. According to earlier data [4], more than 85% of cases of successful predictions had a waiting period between 0.5 and 2 years. Rare cases give shorter or longer time frames [4], so quarterly updates should be sufficient to prevent omissions.

The LURR method uses the operational catalog from the database of the «Yuzhno-Sakhalinsk» Regional Data Processing Centre (RDPC) to analyze the seismicity of Sakhalin. Each event is processed by a group of stations to clarify coordinates and magnitudes. After additional data processing, a new catalog is created, which contains the events that meet the criteria of the working sample. The resulting catalog is converted into the format required for calculating the LURR parameter.

The methodology for the LURR parameter calculation, including the principles of calculated areas identifying, detection of anomalies and determination of prediction zones, is fully consistent with those tested in the large-scale seismic survey of Sakhalin in the period of 1997–2019 [4]. Recall that the basis for calculating LURR is the square root of seismic energy (Benioff deformation). The main principles of the methodology are the following: sufficiently dense coverage of the territory by the calculated areas (these are circles with a radius of one degree, which are located at  $0.5^\circ$ ; thus, the island is divided into 36 areas); fixed parameters of mathematical processing (sliding window of 360 days); working sample of earthquakes within the magnitude range from 3.3 to 5); waiting period of 2 years. All these values have been tested by numerous experimental studies and proved to be valid [2–4]. The principles of identifying anomalies have also been determined, in particular, one of the main parameters – is a threshold (equal to 3), when exceeding, the parameter goes into the area of anomalous values.

For the experiment to which this work is devoted, the catalog is updated with new seismic events on a quarterly basis, and the parameter LURR is again calculated in each of the 36 calculated areas with a starting point in 2019.

The choice of 2019 as the starting point of the experiment is based on the fact that the latest calculations for Sakhalin were completed before 2019 [4], and it is a sufficient backstory of 2 years or more in order to have enough accumulated data. If anomalies are detected, they are added into the database and prediction zone is recorded (geometrically it is a set of calculated areas). If there is a simultaneous (with a duration of maximum 6 months) concentration of anomalies in the adjacent areas, the larger prediction zones are formed.

The obtained data for 36 calculated areas are stored on a special service of the SB REC in the form of a demonstration of the identified anomalies and the hazard zones formed by them on Sakhalin Island. When such zones are defined, they are monitored and the reports are submitted to the REC meetings every 3 months during the entire set alarm period (2 years). If a seismic event with a magnitude of  $M > 5$  occurs in the prediction zone during the alarm period, the prediction is removed and considered realized. The alarm period ends and monitoring of the zone stops. The experiment has begun in 2022 and is conducted together by IMGG FEB RAS and SB FRC UGS RAS within the framework of the Sakhalin Branch of the Russian Expert Council on Emergency Situations (SB REC).

## Results

According to the results of data processing for the period from 2019 to 2022 on the territory of Sakhalin Island and adjacent waters, we identified four zones with medium-term earthquake prediction.

The first information after the catalog data processing from 2019 to 2021 was submitted to the SB REC with a request for medium-term prediction of an earthquake with a magnitude of  $M \geq 5.0 (\pm 0.1)$  for two zones: in the northern (9 calculated areas) and the southern (4 calculated areas) parts of Sakhalin Island and adjacent waters or territories (Fig. 1 and 2). Geometrically, prediction zones were determined by the boundaries of the calculated areas that make up the prediction zones: 1)  $51.5\text{--}54^\circ \text{N}$ ,  $141\text{--}144^\circ \text{E}$ ; 2)  $45\text{--}47.5^\circ \text{N}$ ,  $141\text{--}144^\circ \text{E}$ .

Taking into account the fact that anomalies in the calculated regions completed in 2021 in both prediction zones (LURR parameter changed to the background level), the alarm period was set un-

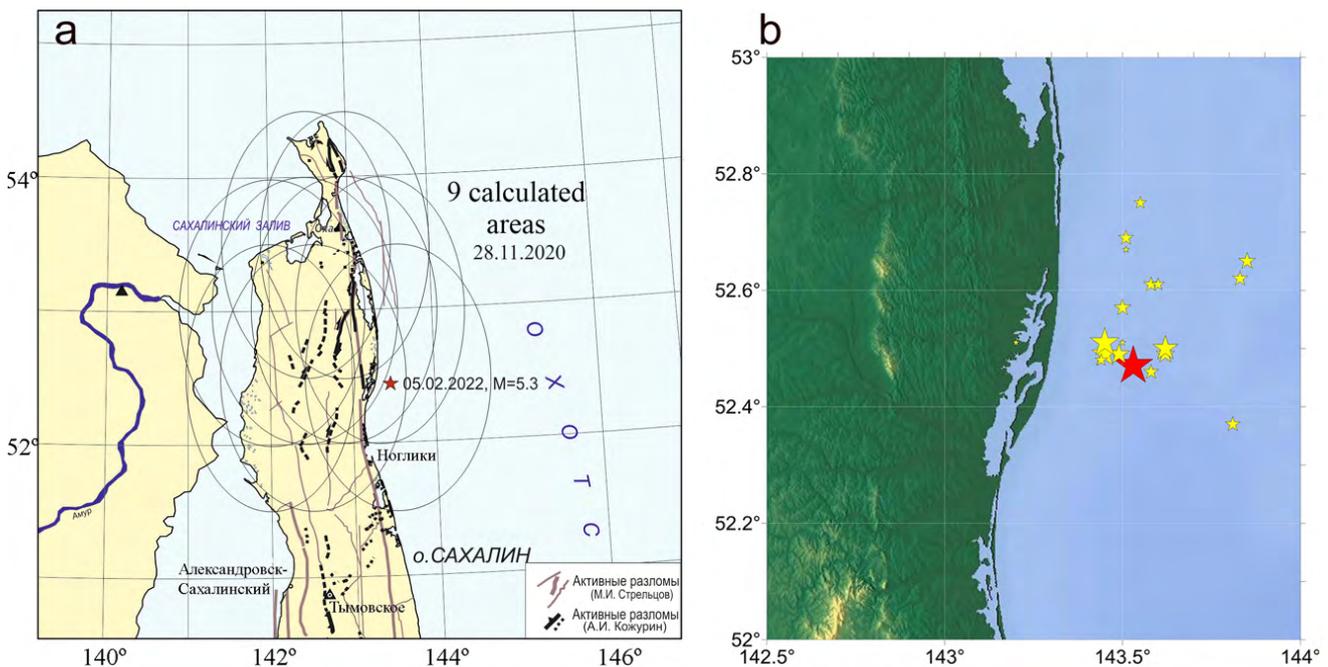
til the end of 2023 (protocol no.1 of the SB REC from 25.01.2022). The decision of the Council was as follows: announce prediction of earthquakes with  $M \geq 5.0$  for the northern and southern parts of Sakhalin Island (in the given coordinates) and approve their action from February 1, 2022, to December 31, 2023.

*Prediction no. 1.* The first of the predictions has realized on 05.02.2022 at 21:18:52 UTC (06.02.2022 at 08:18:52 Sakhalin time). 23 km east of the village of Val and 48 km northeast of the village of Goryachiye Kluchi (Nogliksky District) an earthquake with  $M_L = 5.3$  occurred. The coordinates of the epicenter are  $52.47^\circ$  N and  $143.53^\circ$  E, depth 22 km. Parameters of the earthquake according to the results of processing by Russian and international seismological centers are given in the Table 1.

The predicted intensity according to the accelerometers in Nogliki and Okha was 4 points, and it was also 4 points according to the questionnaires in Okha, the urban-type settlement of Nogliki, the villages of Tungor, Nekrasovka, Moscalvo, and Val (the survey was carried out among employees of the administrations of villages, schools, communication departments, shops). Over the next two days, there were 20 aftershocks with  $M_L$  from 2.1 to 3.6. Information about the epicenter of the earthquake and its aftershocks is presented on the map (Fig. 1).

The earthquake has occurred on the eastern shelf of Northern Sakhalin. Structurally, the shelf is a system of sub-meridional alternating uplifts and depressions. The depressions are almost completely compensated with sedimentation. According to the seismic studies, the following structural elements are identified in the west-east direction: Piltun Depression, Odoptinsk Uplift and East Odoptinsk Uplift. East Sakhalin Trough and its starved part Deryugin Closed Bathyal Depression are located seaward [7]. Odoptinsk and East Odoptinsk uplifts are separated with a very narrow trough. These two structures are combined into a single uplift, which is bounded on the western side by the West Odoptinsk Fault, to which the Piltun Depression adjoins. From the east, this uplift is bounded by the East Sakhalin Fault adjacent to the East Sakhalin Trough [7]. The seismicity of the East Sakhalin fault system is represented by the following earthquakes: at the boundary of the Deryugin Depression ( $M = 5.5$ ) 1944, Okha-Piltun 1932, 1939, 1942 and 1953 ( $M = 5.0-5.5$ ) [8], as well as the June 12, 2005 Mw 5.6 Piltun earthquake.

On the totality of features, the prediction was recognized as realized, and the monitoring of the zone within the specified coordinates was stopped (protocol no. 2 of the SB REC from 15.04.2022).



**Fig. 1.** Map of prediction zone no.1, indicating the date of alarm period beginning, epicenter location (marked with an asterisk) and earthquake date (Sakhalin time) – prediction realization (a) and map of aftershocks of the 05.02.2022 earthquake ( $M_L = 5.3$ ) (b).

*Prediction no. 2.* By the second prediction in the south of Sakhalin (4 calculated areas with the LURR anomalies, Fig. 2) in August 2022, the data testified to its implementation in the north of Hokkaido Island have been obtained.

An earthquake with  $M_L = 5.2$  occurred on August 10, 2022, at 15:52:59 UTC in the northwestmost tip of Hokkaido Island (Japan). The epicenter was located in close proximity to the village of Nakagawa (Kamikawa District, Hokkaido Circuit). The earthquake parameters according to the results of processing of Russian and international seismological centers are given in the Table 2.

By means of various processing software, it was found that the discrepancies in determining the parameters of the hypocenter and energy assessments of the earthquake on August 10, 2022, by different seismological agencies are minimal. The data from the regional network of seismic stations of the Sakhalin Branch of FRC UGS RAS, stations of the Institute of Volcanology and Seismology of Hokkaido University and stations of the FEB RAS were used in determin-

ing the earthquake parameters. As of August 20, 2022, 43 aftershocks with magnitudes from 1.0 to 4.5 were registered by the network of stations (Fig. 2).

According to the identification of the epicenter by various agencies, the earthquake has occurred at the boundary of the prediction zone (Fig. 2) at a latitude of about  $45^\circ$  N. Since there are no calculated areas outside Sakhalin Island below  $45^\circ$  N according to the terms of the experiment, the 10.08.2022 earthquake does not reach the prediction zone and its epicenter is about 13 km away from the zone boundary. Taking into account the fact, that the calculated prediction zone can be continued south of Sakhalin, and the deviation of the epicenter from the zone boundary relative to the linear size of the prediction zone (275 km) is less than 5%, the prediction can be considered realized. But we decided to calculate the parameter LURR in the fifth area, additional to our four, with a center located in  $44^\circ$  N and  $142^\circ$  E (Fig. 3). The catalog we use does not cover the area below  $45^\circ$  N, so the data from the

**Table 1.** Parameters of the earthquake on February 5, 2022, with the epicenter in the Nogliksky District

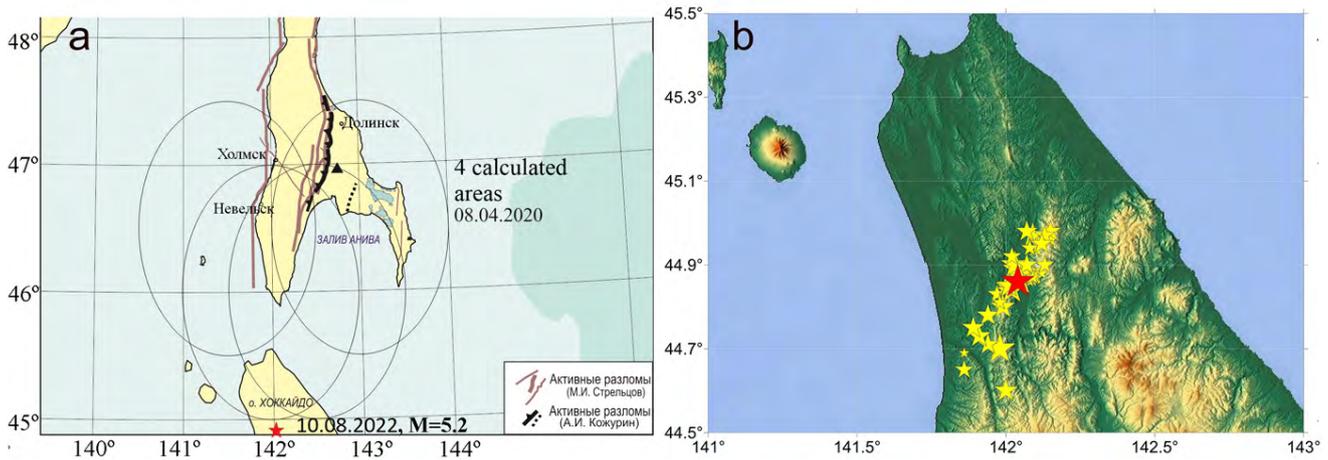
Data source	Time in the source, $t_0$ , h:min:s	Epicenter coordinates		Depth $h$ , km	Magnitude		
		$\varphi^\circ$ , N	$\lambda^\circ$ , E		Mw	mb	$M_L$
“Yuzhno-Sakhalinsk” RDPC	21:18:52.0	52.47	143.53	22	–	–	5.3
AS SB FRC UGS RAS	21:18:52.0	52.61	143.36	20	–	5.7	–
EMSC	21:18:51.8	52.57	143.29	17	5.2	–	–
GEOFON	21:18:52.1	52.55	143.34	15	5.3	–	–
USGS	21:18:52.0	52.59	143.28	10	5.2	–	–

*Note.* Mw – Kanamori magnitude, mb – body wave magnitude,  $M_L$  – local magnitude. “Yuzhno-Sakhalinsk” RDPC – “Yuzhno-Sakhalinsk” Regional Data Processing Centre; AS SB FRC UGS RAS – Alert Service SB FRC, Obninsk, Russia; EMSC – European seismological centre (<http://www.emsc-csem.org/Earthquake/earthquake.php?id=324605>); GEOFON – Helmholtz Centre Potsdam (<http://geofon.gfz-potsdam.de/eqinfo/form.php>); USGS – United States Geological Survey (<https://earthquake.usgs.gov/>).

**Table 2.** Parameters of the earthquake on August 10, 2022, with the epicenter at the northwestmost tip of Hokkaido Island (Japan)

Data source	Time in the source, $t_0$ , h:min:s	Epicenter coordinates		Depth $h$ , km	Magnitude		
		$\varphi^\circ$ , N	$\lambda^\circ$ , E		Mw	mb	$M_L$
“Yuzhno-Sakhalinsk” RDPC	15:52:59	44.86	142.04	11	–	–	5.2
AS SB FRC UGS RAS	15:52:59	45.06	142.04	10	–	5.1	–
EMSC	15:52:59	45.03	142.07	10	5.1	–	–
GEOFON	15:53:04	44.98	141.99	42	–	4.9	–
JMA	15:51:00	44.90	142.06	10	–	–	5.1

*Note.* JMA – Japan Meteorological Agency (<https://www.jma.go.jp/jma/en/menu.html/>). See the Table 1 for other acronyms.



**Fig. 2.** Map of the zone of the prediction no. 2 with indication of date of the alarm period beginning, epicenter (shown with an asterisk) and the earthquake date (Sakhalin time) – the prediction realization (a) and the map of the aftershocks of the August 10, 2022 ( $M_L = 5.2$ ) earthquake (b).

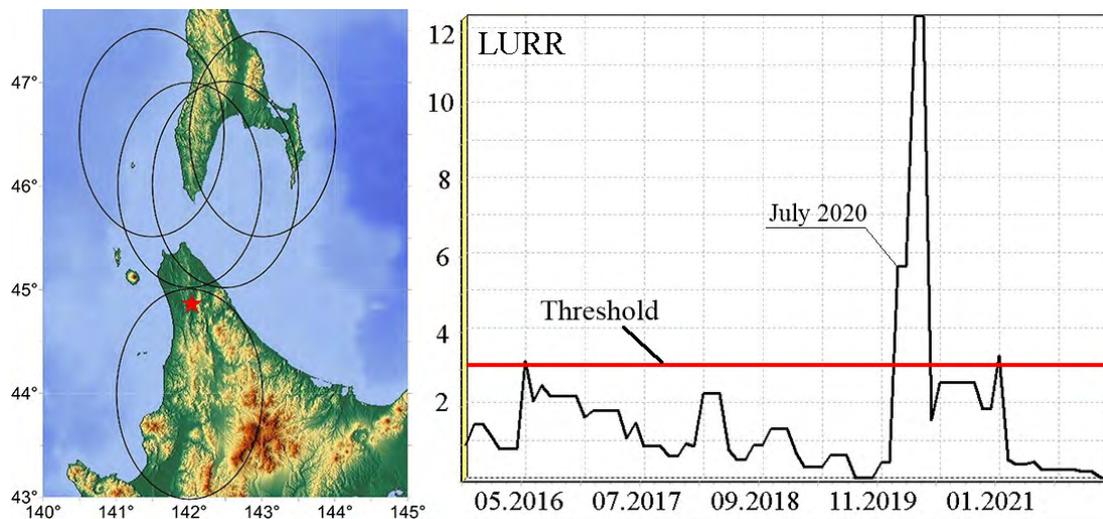
catalogs of the United States Geological Survey (USGS) (<https://earthquakeusgs.gov/>) have been used for the calculation.

According to the results of the checking calculation from 2016 to 2022, the LURR anomaly is detected in this region in July 2020 (Fig. 3). This indicates the unity of all 5 areas for the formed prediction zone (by 4 Sakhalin areas the anomalies have appeared in April 2020). Thus, the zone initially formed in the southern part of Sakhalin Island in April 2020, then was expanded farther south and covered the northernmost tip of Hokkaido Island. This calculation is a pure check-up, and there will be no increase in the number of calculated areas in the future to cover Hokkaido Island. The reason for this is that the US Geological

Survey catalogs used are not fully applicable for LURR calculations because they contain earthquake information starting at a magnitude of 4.0, but we use a sample starting at  $M = 3.3$ . But just in this case, the calculation has probative value.

The 10.08.2022 earthquake has probably occurred at the joint of the tectonic structures. On the western side of the epicenter there are the Moneron and the Rebut-Kobato zones, which together extend a little north of Moneron Island. The central part of Hokkaido Island is formed by the formations of the Kamuikotan zone and the adjacent Susunay one, which is its northern continuation [8].

This earthquake had a much higher level of macroseismic manifestations than the seismic



**Fig. 3.** Additional calculation area on Hokkaido Island (left) and calculation of the LURR parameter here in the period from 2016 to 2022 according to the USGS data.

event of February 5, 2022, due to the significant development of the northern part of Hokkaido Island (compared to the north of Sakhalin Island). According to the Japanese Meteorological Agency (JMA) (<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/#20220811005300>), earthquake intensity in the village of Nakagawa scored 5+ on the JMA scale (JMA. Tables explaining the JMA Seismic Intensity Scale, <http://ww.j.jma.go.jp/jma/en/Activities/inttable.html>), which corresponds to 6 [9] on the MSK-64 scale and characterizes strong earthquakes. In other localities of the northern Hokkaido, particularly in Sōya and Rumoi districts, the intensity was 3-4 scores on the JMA scale. On the territory of the Sakhalin Region, due to the significant distance of the nearest settlements from the earthquake source, this seismic event was not felt. According to the instrumental data from the records of the seismic station in Nevelsk closest to the source (200 km from the epicenter), the intensity was 1 point on the MSK-64 scale.

Thus, both prediction zones, from which the project started, were removed from monitoring in 2022 with satisfactory realization performance indicators.

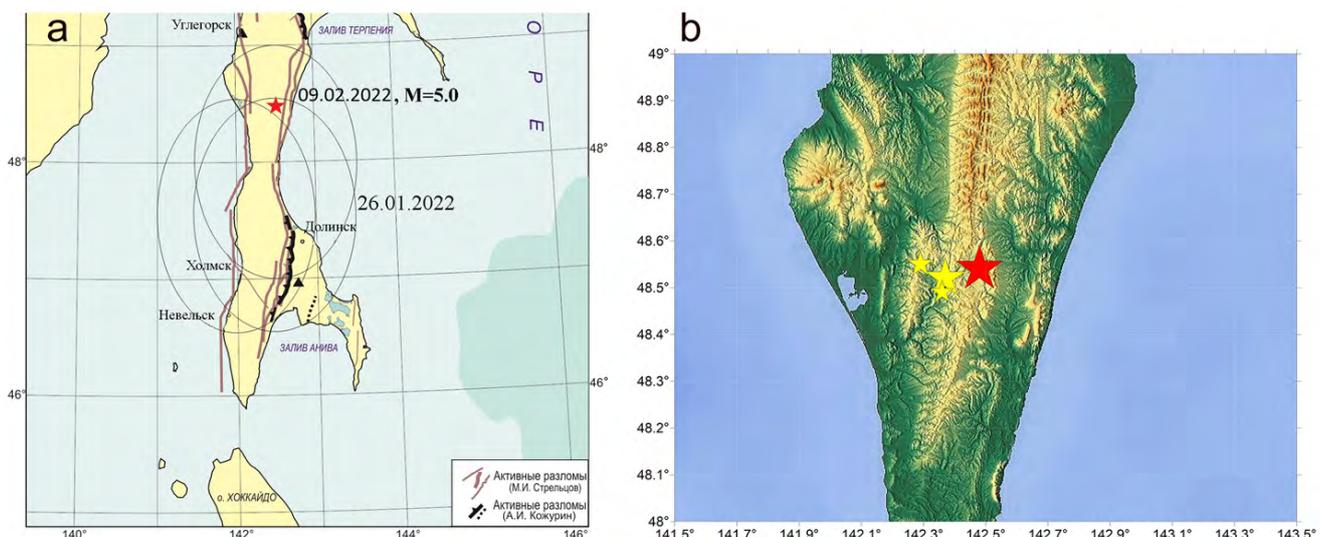
However, the year did not pass without the appearance of new anomalies, which, as a result, formed two new prediction zones (Fig. 4, 5).

*Prediction no. 3.* Unfortunately, one of the predictions, the third in succession, is qualified

as «technical omission». As already mentioned in the methodological section, quarterly updates should have been sufficient to prevent omissions. However, in the first months of the experiment, such a case has occurred. At the end of January 2022, the anomalies have appeared in three calculated zones (Fig. 4), which were recorded after data processing in April 2022 (with the update of data for the first quarter). Then it was found out that the prediction zone formed of these three calculated areas was «worked out» on February 9, i.e. two weeks after the appearance of anomalies.

The earthquake with  $M_L = 5.0$  has occurred on February 8, 2022, at 22:29:00.7 UTC (09.02.2022, 09:29:00.7 Sakhalin time) 21 km southwest of the village of Porechye, Makarovsky District and 32 km northeast of the village of Krasnogorsk (Tomarinsky District). The coordinates of the epicenter are 48.54° N and 142.48° E, depth 13.7 km. Earthquake parameters are given in Table 3.

Earthquake intensity in the Vostochnoye village, Makarovsky District is estimated at 5 points, in the village of Krasnogorsk, Tomarinsky District at 4-5 points, in the city of Makarov at 4 points, in the village of Porechye, Makarovsky District, in the city of Tomari, the Ilyinskoye village, Tomarinsky District, the city of Ulegorsk, the village of Krasnopolye, Ulegorsky District – at 3-4 points, in the urban-type settlement of Shakhtyorsk, Ulegorsky District – at 3 points according to the questionnaires. The calculated



**Fig. 4.** Map of the zone of the prediction no. 3 with indication of date of the alarm period beginning, epicenter (shown with an asterisk) and the earthquake date (Sakhalin time) – the prediction realization (a) and the map of the aftershocks of the February 9, 2022 ( $M_L = 5.0$ ) earthquake (b).

**Table 3.** Parameters of the February 8, 2022 earthquake with an epicenter southwest of the village of Porechye, Makarovsky District, Sakhalin Region

Data source	Time in the source, $t_0$ , h:min:s	Epicenter coordinates		Depth $h$ , km	Magnitude		
		$\varphi^\circ$ , N	$\lambda^\circ$ , E		M <sub>w</sub>	m <sub>b</sub>	M <sub>L</sub>
“Yuzhno-Sakhalinsk” RDPC	22:29:00.7	48.54	142.48	13.7	–	–	5.0
AS SB FRC UGS RAS	22:29:03.0	48.52	142.42	10	–	5.0	–
EMSC	22:29:02.6	48.52	142.44	10	5.0	–	–
GEOFON	22:29:03.7	48.48	142.47	10	–	4.8	–
USGS	22:29:02.0	48.51	142.37	10	4.9	–	–

Note. See Table 1 for the acronyms.

intensity according to the data of accelerometers was 2.5 points in the city of Uglegorsk, the village of Ilyinskoye – 3.3 points, in the city of Dolinsk – 2.6 points, in the city of Holmsk – 1.5 points; and by the data of velocimeters it was 2.9 points in the city of Uglegorsk, in the village of Krasnopolye – 4.0 points, at the Cape of Hokui, Uglegorsky District – 2.3 points.

The February 8, 2022 earthquake is confined to the areas of intersection of the Central Sakhalin (Tym-Poronai) Fault with diagonal faults of the West Sakhalin one. And although the Central Sakhalin Fault is inferior in seismic activity to the West Sakhalin Fault, such earthquakes as the 1923 M = 5.2 Tomarinskoye and the 1957 M = 4.9 Leonidovskoye can be noted [10].

*Prediction no. 4.* The prediction for the fourth zone has been officially approved and is actual as of January 2023. It has been compiled according to the data of 2–4 quarters of 2022. In the first stage, from March to May 2022, the LURR anomaly was singly found in 3 calculated areas in the north of the island (Fig. 5). Then, three months later, the anomalies have recurred in the original three areas, the new ones have first appeared in the neighbouring three new areas. Thus, the prediction zone has been formed from March to August 2022 and is represented by 6 anomalies in 6 calculated areas. SB REC announced the mid-term pre-

dition of a seismic event with a magnitude of  $M \geq 5.0 (\pm 0.1)$  (protocol no. 3 from 14.10.2022) till the May 2024 for the northern part of Sakhalin Island within the boundaries of 52.0 to 54.5 N, 141.5 to 144° E, i.e. practically within the same boundaries that the prediction zone no. 1.

The situation when anomalies are detected again in the area, where only less than 2 years ago they have been already detected, is non-trivial. Technically, if the earthquake in February 2022 did not occur (Fig. 1), the prediction in the territory could be prolonged, and, in general, this practice is not new for SB REC when working with other methods (long-term predictions). But it has occurred, and then the prediction is

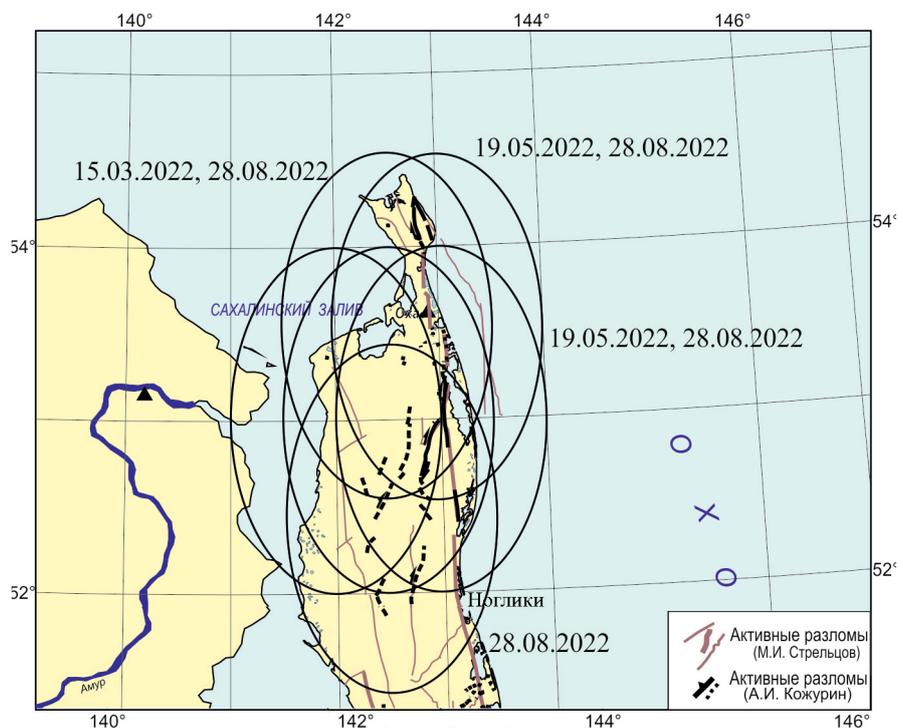


Fig. 5. Map of the zone of the registered prediction no. 4.

removed. Note that the alarm period parameter in the LURR methodology is the most uncertain (we have up to two or three years, and the Chinese scientists have even more). In this case, one prediction was removed, and the other was announced a month later.

We will learn about the consequences of such frequency of anomaly occurrence in the north of Sakhalin in a few years, but now it is interesting to discuss the potential of seismic generating zones that fall in the zone of the current prediction period.

All six calculated areas are located within the East Sakhalin fault zone. The East Sakhalin zone is not homogeneous in structure. In the eastern coastal zone of the northern part of the island, it is represented by the Piltun and Garomai faults. It is assumed [11], that the first fault is characterized primarily by dextral strike-slip displacements and the second fault is characterized by thrust ones. To the west of the Piltun and Garomai faults, the dextral strike-slip Upper Piltun Fault (1995 Neftegorsk seismic rupture) extends with a maximum movement of 8.1 m [12]. It is possible that a similar fault extends south of Neftegorsk in the axial part of the Darginsky Uplift. The fault is quite distinctly distinguished in space images of different resolutions and in topography. Several sub-meridional breaks have been identified to the west of the Upper Piltun and Darginsky faults, but there is no data for them except for the clearness on the space images of medium resolution [11]. The nonrecurrent displacements on the strike-slips, except for the Neftegorsk Fault, were not directly measured anywhere. Data on the Piltun Fault presented in the article [11], are estimative and based on a number of assumptions. The northernmost elements of the zone are the active dextral Kheyton and Longri (less strike-slip) faults of Schmidt Peninsula. The Kheyton Fault, the main of these two, extends north to the coastline and most likely continues underwater into the shelf. The southern continuation of the fault and its possible connection to the Piltun Fault are unclear. It seems that the spatial independence of these two faults is possible.

As it is indicated in [7], instrumental observations tell us only about three significant events in this area (East Sakhalin zone). In addition to the Neftegorsk earthquake, the following events

occurred there: the 1935  $M = 5.6$  Katangli earthquake; the 1964  $M = 5.8$  Nogliki earthquake, and the 1967  $M = 5.5$  North Sakhalin one. As noted in [12], the mismatch with the palaeodata indicates only a small period of observation, and the potential of the zone is much higher, of course.

The most reliable estimates are based on the  $M_{\max}$  maximum magnitude. Individual faults generate earthquakes of approximately the same (within half a unit) magnitude close to their  $M_{\max}$  known as characteristic earthquakes. The  $M_{\max}$  is estimated by the length of the fault or the size of the nonrecurrent movement (with or without displacement). At present, only the length of the Piltun Fault, which is approximately 50 km (including its western branch in the north along the west coast of Torokh), is more or less reliable. The Garomai, Kheyton, and Longri faults can extend over some unknown distance under water, i.e. only minimal estimates of their length are available (~21, 37–40 and ~30 km respectively). Based on the above approximate estimates, and using the dependencies from [13], we obtain  $M_{w_{\max}} \approx 7.1 (\pm 0.23)$  for  $L \sim 50$  km (Piltun Fault). In general, it is possible to accept  $M_{\max}$  equal to 7–7.2 for the entire East Sakhalin zone. In view of the above, the prediction, which is currently actual for this zone, can have an upper threshold  $M = 7.2$  by the size of the characteristic level.

It is useful to recall the recurrence of characteristic earthquakes in addition to assessing their magnitudes. On the basis of the generalizations by A.I. Kozhurin on the Piltun Fault, the conservative estimate ranges from 700 to 2 600 years, and it is about 5 000 years for the Garomai one. But these are estimates of recent events by several trenches, and, in general, with segmentation and consolidation of segments, the Piltun-Garomai fault system with a length of about 600 km allows estimating the recurrence intervals of about 370 years [12].

## Conclusion

Summing up the results of the first year of the experiment on the use of the LURR method for medium-term real-time prediction, we tabulate the information into the final table (Table 4). It demonstrates that the parameters of the declared and realized predictions are mainly the same (including the retrospective prediction on a technical omission).

**Table 4.** Summary table of predictions for the period of the experiment according to the data of 2019–2022

Prediction, no.	Number of calculated areas	Zone boundaries		Period or date of the prediction zone formation	Document official status	Realization date; magnitude; coordinates	Alarm period prior the realization
		N	E				
1	9	51.5°–54.5°	141.5°–144.5°	28.11.2020	Approved, removed	05.02.2022; $M_L = 5.3$ ; 52.47° N, 143.53° E	15 mos.
2	4	45°–47.5°	140.5°–144°	08.04.2020	Approved, removed	10.08.2022; $M_L = 5.2$ ; 45.06° N, 142.04° E	26 mos.
3	3	46.5°–49°	141°–143.5°	26.01.2022	Technical omission	05.02.2022; $M_L = 5$ ; 48.54° N, 142.48° E	10 days
4	6	51.5°–54.5°	141°–144°	15.03.2022– 28.08.2022	Approved, actual	Not applicable	Not applicable

The target events in our experimental predictions are earthquakes with  $M \geq 5.0$ . Three such earthquakes have occurred in the experimental zone from January 2019 to December 2022: in the northern part of Sakhalin Island, 23 km east of the village of Val and 48 km northeast of the village of Goryachiye Kluchi (Nogliksky District), south of Sakhalin Island, on the northwestmost tip of Hokkaido Island (Japan) and in the Central Sakhalin, in Makarovskiy District.

These three earthquakes with  $M \geq 5.0$  became the realizations for the prediction zones no. 1–3: two in on-line mode and one retrospectively (technical omission).

25 anomalies were detected from 2019 to 2022 by the LURR parameter calculation, which were grouped by time and space into four prediction zones (from 9, 4, 3 and 6 calculated areas). At the meetings of the Sakhalin Branch of the Russian Expert Council on Emergency Situations, the predictions were approved for three zones, for which all the necessary attributes of earthquakes – time, place and energy indicator – were identified. For two registered zones, as well as the zone, where the technical omission is registered, we have a successful prediction realization. The prediction for the fourth zone has been approved in 2022, and it is valid at the time of article publication, the monitoring is going on. We will report on the development of events in this zone in the next publication based on the results of continuous operational analysis of seismicity of Sakhalin Island using the LURR medium-term earthquake prediction method.

## References

1. Yin X.C., Zhang L.P., Zhang H.H., Yin C., Wang Y., Zhang Y., Peng K., Wang H., Song Z., Yu H., Zhuang J. **2006**. LURR's twenty years and its perspective. *Pure Applied Geophysics*, 163: 2317–2341. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0135-x>
2. Zakupin A.S., Levin Yu.N., Boginskaya N.V., Zherdeva O.A. **2018**. Development of medium-term prediction methods: A case study of the August 14, 2016 Onor ( $M=5.8$ ) earthquake on Sakhalin. *Russian Geology and Geophysics*, 59(11): 1526–1532. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.10.012>
3. Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Boginskaya N.V. **2020**. Using the load/unload response ratio and self-developing processes methods of analyzing seismic sequences to predict earthquakes in Sakhalin. *Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, 56(7): 693–705. <https://doi.org/10.1134/S0001433820070105>
4. Zakupin A.S., Boginskaia N.V. **2021**. Mid-term earthquake prediction using the LURR method on Sakhalin Island: A summary of retrospective studies for 1997–2019 and new approaches. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 5(1): 27–45. <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.1.027-045> (In Russ.).
5. Kossobokov V.G. **2011**. Are mega earthquakes predictable? *Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, 47(8): 951–961. <https://doi.org/10.1134/S0001433811080032>
6. Kossobokov V.G. **2013**. Earthquake prediction: 20 years of global experiment. *Natural Hazards*, 69(2): 1155–1177. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0198-1>
7. Voeykova O.A., Nesmeyanov S.A., Serebryakova L.I. **2007**. [*Neotectonics and active faults of Sakhalin*]. Moscow: Nauka, 186 p. (In Russ.).
8. Zharov A.E. **2004**. [*Geological structure and Cretaceous-Paleogene geodynamics of Southeastern Sakhalin*]. Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalin. obl. kn. izd-vo, 192 p. (In Russ.).
9. Musson R.M.W., Grünthal G., Stucchi M. **2009**. The comparison of macroseismic intensity scales. *Journal of Seismology*, 14(2): 413–428. <https://doi.org/10.1007/s10950-009-9172-0>

10. Oskorbin L.S., Bobkov O.A. **1997**. [Seismogenic zones of Sakhalin and the adjacent areas. Geodynamics of the suture zone of the Pacific Ocean and Eurasia]. In: [*Problems of seismic hazard of the Far Eastern region*]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, vol. 6: 154–178. (In Russ.).
11. Bulgakov R.F., Ivashchenko A.I., Kim Ch.U., Sergeev K.F., Strel'cov M.I., Kozhurin A.I., Besstrashnov V.M., Strom A.L., Sudzuki J., Cucumi H., Vatanabe M., Ueki T., Shimimoto T., Okumura K., Goto H., Kariya J. **2002**. Active faults in North-eastern Sakhalin. *Geotektonika*, 36(3): 227–246.
12. Kozhurin A.I., Kim Chun Un. **2010**. [Active faults of Sakhalin Island, assessment of the magnitude and recurrence of the maximum possible earthquakes]. In: *Problemy seysmichnosti i sovremennoy geodinamiki Dal'nego Vostoka i Vostochnoy Sibiri: dokl. nauch. simp.*, 1–4 iyunya 2010 g., Khabarovsk [*Problems of seismicity and recent geodynamics of the Far East and Eastern Siberia: reports of scientific symposium, June 1–4, 2010, Khabarovsk*]. Khabarovsk: ITiG im. Yu.A. Kosygina DVO RAN, p. 138–141. (In Russ.). URL: [http://neotec.ginras.ru/comset/\\_kozhurin-a-i-i-dr-2010-aktivnye-razlomy-o-sahalin-ocenka-magnitudy-i-povtoryaemosti-maksimalno-vozmozhnyh-zemletryaseniy.pdf](http://neotec.ginras.ru/comset/_kozhurin-a-i-i-dr-2010-aktivnye-razlomy-o-sahalin-ocenka-magnitudy-i-povtoryaemosti-maksimalno-vozmozhnyh-zemletryaseniy.pdf)
13. Wells D.L., Coppersmith K.J. **1994**. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. of the Seismological Society of America*, 84: 974–1002.

#### Об авторах

**Закупин Александр Сергеевич** (<https://orcid.org/0000-0003-0593-6417>), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, [a.zakupin@imgg.ru](mailto:a.zakupin@imgg.ru)

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

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

Поступила 15.01.2023

После доработки 21.02.2023

Принята к публикации 25.02.2023

#### About the Authors

**Zakupin, Alexander S.** (<https://orcid.org/0000-0003-0593-6417>), Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Leading Researcher at the Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, [a.zakupin@imgg.ru](mailto:a.zakupin@imgg.ru)

**Kostyleva, Natalya V.** (<https://orcid.org/0000-0002-3126-5138>), Researcher, Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, [n.kostyleva@imgg.ru](mailto:n.kostyleva@imgg.ru)

**Kostylev, Dmitry V.** (<https://orcid.org/0000-0002-8150-9575>), Head of the Seismic Station Department, Sakhalin Branch of the Federal Research Center of Geophysical Survey of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk; Researcher, Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, [d.kostylev@imgg.ru](mailto:d.kostylev@imgg.ru)

Received 15 January 2023

Revised 21 February 2023

Accepted 25 February 2023

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



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

УДК 550.837.3;550.8.014;504.064.3

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.075-085>  
<https://www.elibrary.ru/gytyub>

## Применение RGB-синтеза для комплексной интерпретации данных геофизических методов при изучении территорий, загрязненных нефтепродуктами

Т. А. Мингалева\*<sup>1</sup>, С. В. Шакуро<sup>2</sup>, Н. П. Сенчина<sup>1</sup>, А. С. Егоров<sup>1</sup>

\*E-mail: [tatiana.mingaleva@bk.ru](mailto:tatiana.mingaleva@bk.ru)

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ООО «ФРОНТ Геология», Нижний Новгород, Россия

**Резюме.** На загрязненных нефтепродуктами участках сведения о геологическом строении, а также о степени загрязнения и геометрических параметрах поллютанта необходимы для оценки рисков, планирования работ по извлечению нефтепродуктов и рекультивации территории. Для решения подобных задач активно используются геофизические методы. В работе рассматривается участок с загрязненными нефтепродуктами грунтами, расположенный на берегу р. Волга. Целью работ является оконтуривание площади распространения нефтепродуктов. Для достижения поставленной цели выполнен комплекс методов малоглубинной геофизики (электроразведка, сейсморазведка) и газогеохимия. В качестве одного из способов интерпретации данных продемонстрированы результаты нового подхода к характеристике загрязненных участков путем RGB-синтеза данных. Способ основан на обобщении имеющихся материалов путем оптического смешивания данных трех пространственно распределенных характеристик, представленных в виде трех каналов – красный, зеленый, синий – с целью локализации линз гравитационно-подвижных и иммобилизованных нефтепродуктов. По результатам качественной интерпретации геофизической информации авторами построена схема с предполагаемым контуром распространения нефтепродуктов на изучаемой территории. Предложенный метод может использоваться для задач оконтуривания разливов нефтепродуктов при достаточном количестве информации, полученной геофизическим или другими методами (не менее 3), на этапе определения площади распространения загрязнения для участков. Этот подход может ускорить процесс интерпретации, так как такое наложение карт задает цветовым распределением различные петрофизические характеристики грунтов для выбранного глубинного уровня, а также облегчает задачу определения координат при соотнесении различных аномалий, выявленных разными методами.

**Ключевые слова:** RGB-синтез, малоглубинная геофизика, нефтепродукты, многопризнаковая классификация, комплексная интерпретация

## Application of RGB-synthesis for complex interpretation of geophysical data in the study of areas contaminated by oil products

Tatiana A. Mingaleva\*<sup>1</sup>, Sergey V. Shakuro<sup>2</sup>, Natalia P. Senchina<sup>1</sup>, Alexey S. Egorov<sup>1</sup>

\*E-mail: [tatiana.mingaleva@bk.ru](mailto:tatiana.mingaleva@bk.ru)

<sup>1</sup>Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>FRONT Geology LLC, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** The information on geological structure as well as on the degree of contamination and geometrical parameters of a pollutant in oil-contaminated areas is necessary for risk assessment, planning of oil products recovery and territory remediation. Geophysical methods are actively used for solving such problems. The work considers the site on the Volga River bank, where soils are contaminated with petroleum products. The aim of the work is to delineate the distribution area of petroleum products. In order to achieve the goal, the set of near-surface geophysical methods (vertical electric sounding, seismic survey) and gas geochemistry were implemented. The results of a new approach to characterization of contaminated sites by RGB-data synthesis have been demonstrated as one of the ways of data interpretation. The method is based on the generalization of the available materials by optically mixing of the data of three spatially

distributed characteristics presented in the form of three channels – red, green, and blue – for the purpose of localizing the lenses of gravity-mobile and immobilized oil products. According to the results of the qualitative interpretation of geophysical information, the authors have built a scheme with the proposed contour of oil products distribution in the studied territory. The proposed method can be used for the delineation of oil spills along with the sufficient information obtained by geophysical or other methods (at least three) at the stage of determining the spread of contamination for the sites. This approach can speed up the interpretation process, as such maps overlaying sets the color distribution of different petrophysical characteristics of the soils for the selected depth level, and also eases the task of determination of coordinates when correlating various anomalies, identified by different methods.

**Keywords:** RGB-synthesis, near-surface geophysics, oil products, multi-attribute classification, complex interpretation

**Для цитирования:** Мингалева Т.А., Шакуро С.В., Сенчина Н.П., Егоров А.С. Применение RGB-синтеза для комплексной интерпретации данных геофизических методов при изучении территорий, загрязненных нефтепродуктами. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 1, с. 75–85. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.1.075-085>. <https://www.elibrary.ru/gytyub>

**For citation:** Mingaleva T.A., Shakuro S.V., Senchina N.P., Egorov A.S. Application of RGB-synthesis for complex interpretation of geophysical data in the study of areas contaminated by oil products. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 1, pp. 75–85. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.1.075-085>. <https://www.elibrary.ru/gytyub>

### Благодарности

Авторы благодарны уважаемым рецензентам за конструктивные замечания, способствующие улучшению данной публикации.

### Acknowledgments

Authors would like to thank the respected Reviewers for the constructive comments that contribute to improving this publication.

### Введение

Геофизические методы, в качестве косвенных методов, являются эффективным способом экспресс-оценки загрязненных территорий. Они играют большую роль при решении экологических задач – таких как, например, определение геометрических параметров зон разлива нефтепродуктов. Можно выделить ряд преимуществ косвенных методов, среди которых объемное изучение строения геологического объекта, дешевизна по сравнению с использованием прямых методов (бурения и геохимии).

Грунты, загрязненные в ходе транспортировки или хранения нефтепродуктов, приобретают сложное распределение физических свойств, которые варьируют не только вследствие изменения литологического состава и степени загрязненности, но и под воздействием различных последующих процессов – таких как, например, химическое выветривание. В большинстве случаев изменения связывают с биохимической деятельностью микроорганизмов, в результате чего меняется текстура грунтов и химический состав флюида [1–4]. Особенно актуальна данная тема для территорий нефтебаз, где углеводородные загрязнения существуют длительное время. Здесь грунты и нефтепродукты успели изменить свои свойства в ходе трансформационных изменений, что также будет влиять на результаты геофизических/геохимических исследований.

В большинстве случаев затруднительно выделить конкретную литологическую разность при рассмотрении только одного физического свойства или связанных с ним геофизических данных. Надежно идентифицировать различные группы грунтов возможно в результате анализа распределения нескольких физических признаков. Комплексный интегральный подход к построению моделей имеет существенные преимущества при решении многих исследовательских задач [5]. Существует достаточно много методик комплексной интерпретации данных: от простого визуального анализа различных карт, построенных для одной площади, до алгоритмов совместной инверсии. Каждый специалист решает сам, какой из методов ему лучше использовать при интерпретации.

При решении задач поиска и оконтуривания нефтепродуктов в грунтах обычно требуется информация по многим показателям для понимания гидрогеологической ситуации района, литологического расчленения грунтов и т.п. Для ускорения процесса интерпретации авторами предлагается подход, основанный на синтезировании изображений трех параметров на одной схеме. Цель работы – базируясь на результатах полевых геофизических исследований, оценить возможности совместного анализа данных малоглубинной геофизики посредством их RGB-синтеза для площадного оконтуривания загрязненных нефтепродуктами участков в грунтах на исследуемой территории. Задачами исследования являются: получение

полевых материалов в результате выполнения геофизических работ (электроразведки и сейсморазведки) и газогеохимии; изучение моделей миграции нефтепродуктов в грунтах и физических характеристик таких грунтов; ознакомление с возможными вариантами комплексной интерпретации данных; опробование подхода по совместной интерпретации данных на основе построения RGB-схемы.

### Обобщенная модель миграции нефтепродуктов в грунтах

Общая модель распределения нефтепродуктов в геологической среде включает три зоны (рис. 1):

- донорская, в которой происходит изливание нефтепродуктов в грунты;
- транзитная, в которой происходит горизонтальное перемещение легких нефтепродуктов;
- зона вторичного накопления, которая обычно образуется в прибрежной зоне водоемов под воздействием геохимического барьера.

Помимо вышеописанных зон модель включает различные фазы распределения легких нефтепродуктов (по [6]):

- газообразная фаза (образуется в областях, где происходит улетучивание углеводородов и продуктов их биодеструкции);
- остаточная фаза (нефтепродукты находятся в зоне аэрации в состоянии остаточного насыщения и не перемещаются под действием силы тяжести);
- свободная фаза (распространение идет в области капиллярной каймы, флюид смешивается с воздухом и водой и имеет 30–50%-ное насыщение углеводородами [7]);
- растворенная фаза в водоносных горизонтах; по сравнению со свободной фазой концентрация углеводородов нефти здесь намного ниже.

Согласно модели, показанной на рис. 1, основные трансформации происходят в остаточ-

ной и свободной фазах. Авторы [6] утверждают, что максимальные изменения геофизических признаков происходят в переходной, капиллярной и верхней части зон насыщения. Именно в этих зонах встречаются самые высокие популяции микроорганизмов-нефтедеструкторов и наблюдаются максимальные изменения физических свойств. Здесь изменяется минерализация воды, поровое пространство вмещающих грунтов, образуются биоминералы, биопленки, частично растворяются вмещающие породы и т.д. В результате возникает множество изменений свойств грунтов, которые получают отражение в геофизических полях [8–10].

Физические свойства интервалов разреза, загрязненных нефтепродуктами, достаточно динамичны и имеют сложный характер распределения во временной и пространственной областях.

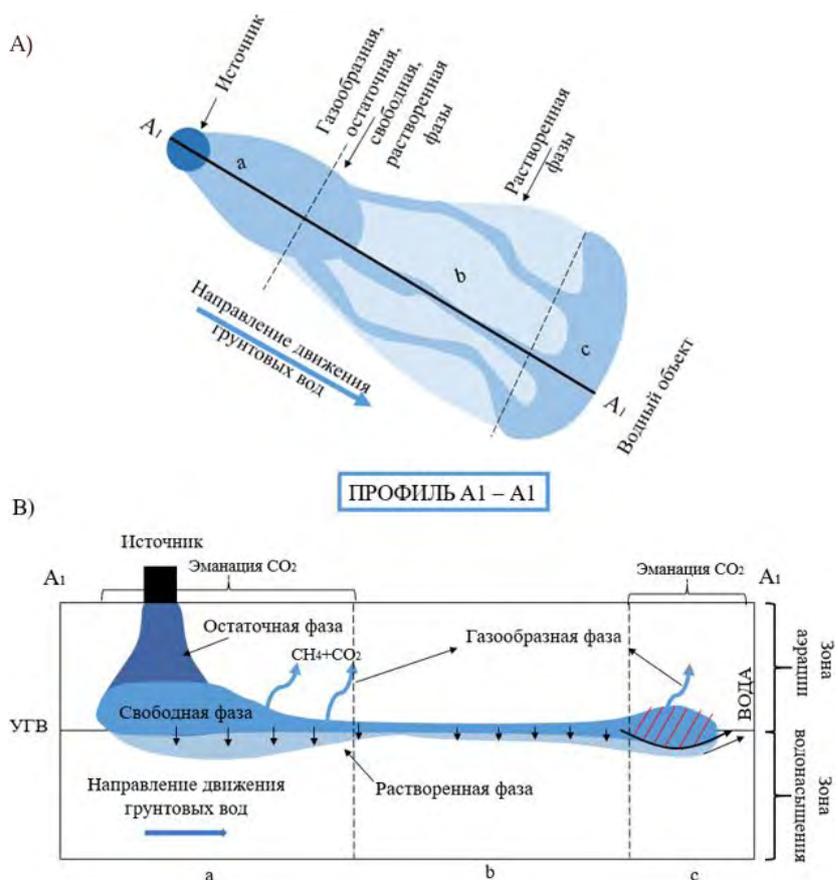


Рис. 1. Модель распространения нефтепродуктов в грунтах вблизи водного объекта: А – площадное распределение, В – разрез по линии А<sub>1</sub>-А<sub>1</sub>. а – донорская зона, б – транзитная зона, с – зона вторичного накопления; красными штрихами выделен геохимический барьер (рисунок адаптирован из [6, 8]).

Fig. 1. Model of oil product distribution in soils near a water body: А – areal distribution, В – A<sub>1</sub>-A<sub>1</sub> section. а – donor zone, б – transit zone, с – zone of secondary accumulation; geochemical barrier is marked with red dashes (figure is adapted from [6, 8]).

Так, например, удельное электрическое сопротивление ( $УЭС$ ), получаемое по результатам электроразведки, по-разному отражает две формы нахождения нефтепродуктов в среде: «свежие», которые имеют высокие значения  $УЭС$ , и «старые», которые подверглись биодegradации [11]. Однако низкие значения  $УЭС$  могут наблюдаться и на участках с высокой глинистостью грунта, не имеющих отношения к процессам биодegradации в состарившихся углеводородных линзах, в то время как высокие значения удельного сопротивления могут указывать на снижение насыщенности, контакт с уплотненными породами или свежие разливы [11, 12].

На участках, интенсивно загрязненных нефтепродуктами, наблюдается снижение скорости распространения сдвиговых волн ( $V_s$ ). Этот параметр не зависит от степени насыщения породы жидкостью, состава жидкости и контролируется в основном прочностными и деформационными характеристиками грунтов. Так как прочностные характеристики некоторых дисперсных грунтов (особенно грунтов, подстилающих нефтебазу, о которой говорится в этой работе) под воздействием нефтепродуктов снижаются [7], это приводит к снижению значений  $V_s$ .

В статье [6] отмечается, что «свежие» разливы легких нефтепродуктов проявляют свойства изоляторов ( $*0.001$  мСм/м) по отношению к пластовым флюидам ( $*0.1-1$  мСм/м для пресной воды) и имеют низкую относительную диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon = 2-3$ ) по сравнению с водой ( $\epsilon = 80$ ) и водонасыщенными песками ( $\epsilon = 7-15$ ). Замена поровой воды и воздуха в загрязненной зоне компонентами легких нефтепродуктов может приводить к увеличению амплитуд отраженного сигнала на радарограммах (например, 10) за счет изолирующих свойств поллютанта. В то же время процесс биодegradации вызывает изменения химических и физических свойств загрязненной среды, что приводит к увеличению объемной электропроводности, а присутствие проводящих минеральных фаз может вызвать затухание зондирующего импульса [6].

Кроме того, в результате дegradации углеводородов происходит выделение газов (метана и двуокиси углерода) как продуктов жизнедеятельности микроорганизмов, что фиксируется в результатах газогеохимических работ.

### **Основные алгоритмы классификация геофизических полей**

Комплексный подход к решению вопросов интерпретации геофизических данных в ряде работ описывается как наиболее приемлемый [13–15]. Разрабатываются новые методические решения по комплексированию геофизических методов в полевых условиях [16–18], создаются новые алгоритмы совместной интерпретации данных нескольких методов [19, 20]. Проблема заключается в том, что интерпретация геофизических данных в значительной мере основывается на визуальном сравнении результатов, что вносит большую долю субъективизма. Поэтому особенно актуальны методические подходы, благодаря которым удается наиболее адекватно и достоверно передать возможную геологическую обстановку и гидрогеологические особенности изучаемого района [5, 21], влияющие на распространение нефтепродуктов в среде.

Алгоритмы комплексной интерпретации можно разделить на несколько категорий:

- алгоритмы совместной инверсии данных (одновременная совместная инверсия и последовательная совместная инверсия) [22, 23];
- алгоритмы, основанные на классификации геофизических данных [9, 24, 25].

Суть алгоритмов, объединенных в первую группу, заключается в нахождении петрофизической или геометрической связи между различными физическими свойствами целевых объектов. Для них характерны проблемы с разрешающей способностью, пространственным и временным масштабами, а также с тем, что различные методы могут получить отклики от принципиально разных геологических объектов, которые усложняют условия количественной интерпретации (определение условий залегания и других параметров целевых геологических объектов и отражающих горизонтов) [15, 24, 26].

Вторая группа методов основана в первую очередь на статистическом анализе набора геофизических моделей [27, 28]. Здесь важно то, что между физическими параметрами, получаемыми в ходе инверсии геофизических полей, не существует фундаментальных связей как таковых, а есть только эмпирические зависимости, по которым можно построить правдопо-

добные модели только локально для какого-то одного участка с однородным литологическим строением [29]. Соответственно, методически верно будет проводить совместную интерпретацию после независимой инверсии каждого отдельного метода [24]. Дальнейшая совместная статистическая интерпретация геофизических данных может описать корреляцию между физическими параметрами без наложения «нереалистичных» эмпирических ограничений. Такой подход относится к задачам распознавания образов, использующимся в различных отраслях (см., например, [30]). Результатом работ является разделение объектов или, в случае геофизических исследований, физических признаков различной природы на классы с целью дальнейшей идентификации принадлежности полученных классов к геологическим объектам [31]. В частности, комплексный анализ данных позволяет проводить геологическое картирование территории с конечным построением карт, на которых отображены целевые области распространения поллютантов, области с иммобилизованными нефтепродуктами, а также возможные пути миграции загрязнения.

Распознавание образов может осуществляться «с учителем» и «без учителя». Первый вариант осуществим в том случае, когда имеется априорная геологическая информация о местонахождении объекта исследований. Комплексный анализ заключается в разделении всей рассматриваемой территории на «перспективную», т.е. содержащую искомые объекты, и «пустую», включающую только вмещающие породы, области.

В свою очередь, комплексный анализ на основе обучения «без учителя» – классификация или кластеризация [31] – основывается только на статистическом разделении тех данных, которые были получены в ходе инструментальных измерений. Эталонных образцов здесь не предусматривается, поэтому основной принцип алгоритмов основывается на самообучении. Из-за отсутствия эталонных образцов при использовании подходов на основе распределения кластеров не выделяются отдельные литологические единицы. Впоследствии этот недостаток может быть исправлен путем «ручного» определения [32]. В целом, основным преимуществом кла-

стеризации является объективность и минимальная зависимость от субъективного мнения интерпретатора.

Любые проектные решения по рекультивации загрязненных территорий и извлечению нефтепродуктов предусматривают изыскательские работы. На первом этапе изучения площадей, загрязненных нефтепродуктами, для которых не имеется достаточной информации о вещественном составе грунтов, для выбора оптимальной сети бурения можно провести безэталонную классификацию по данным опережающих геофизических исследований. Далее, по выделенным объектам на схеме распределения классов намечается расположение скважин для верификации геологического строения. Одним из методических подходов, способным на качественном уровне определить грунты с различными петрофизическими характеристиками, является RGB-синтез [33].

RGB-синтез позволяет провести классификацию геофизических данных по трем различным параметрам. Каждому параметру соответствует свой цветовой индикатор (красный, R; зеленый, G; синий, B), нормированный от 0 до 255. Минимумы значений соответствуют черному (отсутствие цвета), максимумы – наиболее яркому выбранному цвету. На выходе алгоритма формируется изображение, на котором наглядно выделяются области с различными входными параметрами путем оптического смешивания красного, зеленого и синего цветов, где минимум по каждому из параметров отмечается черным цветом (0, 0, 0), максимум по каждому из параметров – белым цветом (255, 255, 255), а все промежуточные сочетания формируют полную цветовую гамму, которая легко интерпретируется с опорой на правила смешивания цветов. Например, синий цвет определяется как (0, 0, 255), красный как (255, 0, 0), фиолетовый – (255, 0, 255) и т.д. Основное отличие от безэталонной классификации, выполненной в специализированном ПО, заключается в том, что количество классов при синтезе ограничено очень большой величиной ( $256 \cdot 256 \cdot 256 = 16\,777\,216$ ), поэтому схема с классами выглядит более гладкой, а к результату не привязываются искусственные четкие границы классов, которых нет в реальных полях и входных данных.

## Материалы и методы

Объектом исследования является территория, прилегающая к нефтебазе, расположенной на р. Волга, которая на протяжении десятков лет подвергалась воздействию нефтепродуктового загрязнения. Рельеф территории имеет слабый уклон в сторону водного объекта.

Первые слабые выходы нефтепродуктов вдоль береговой линии были зафиксированы в 1995 г. В 1996 г. на территории нефтебазы были пробурены скважины, позволяющие наблюдать за степенью загрязнения подземных вод. В 1997 г. на нефтебазе были смонтированы установки по очистке подземных вод, однако из-за низкого процентного содержания нефтепродуктов в подземных водах работа установки оказалась неэффективной и была прекращена. Продолжающиеся наблюдения свидетельствовали о снижении загрязненности подземных вод под нефтебазой. Однако в июле 1999 г. произошел новый, более мощный сброс нефтепродуктов в реку. С этого времени началось планомерное изучение всей прилегающей к нефтебазе территории, включающее, в том числе, работы по откачке нефтепродуктов по линии скважин, проходящей вдоль берега на удалении 100–130 м.

Согласно имеющимся сведениям, территория расположена в пределах первой и второй надпойменных террас, сложена песками с линзами и прослоями суглинков, в основании разреза отмечаются галька и гравий [34].

Геологическое строение изучаемой площади в целом простое, выдержанное в плане и разрезе. Зона аэрации и верхняя часть первого от поверхности водоносного горизонта представлена песками. В пределах зоны аэрации повсеместно развит слой суглинка. Минимальная мощность суглинка наблюдается в районе нефтебазы – 1–1.5 м. В направлении берега мощность слоя закономерно возрастает до 3–5, а на юго-востоке территории – до 8 м.

Помимо грунтовых вод, уровень которых приурочен к уровню реки, режимными скважинами в ближайшей окрестности нефтебазы на глубине 3–6 м вскрывается верховодка, которая приурочена к кровле слоя суглинков и выклинивается в восточном направлении.

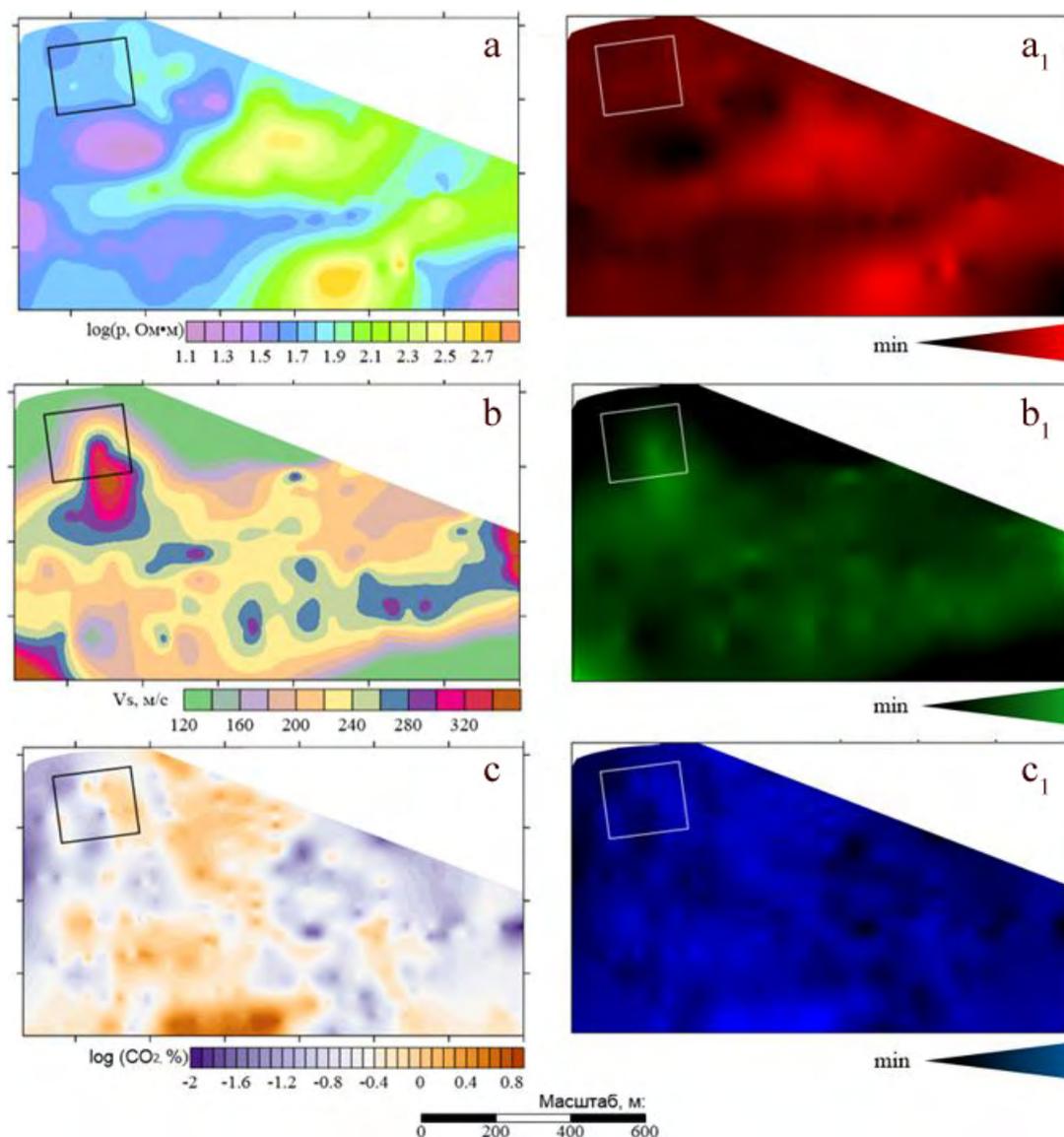
Полевой геофизический материал был получен в ходе проведения полевых работ геофизическим отрядом компании ООО «ФРОНТ

Геология» под руководством С.В. Шакуро. Результаты представлены данными электроразведки (ВЭЗ), сейсморазведки (MASW) и газогеохимии ( $\Sigma\text{СН}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ). Сопоставление выполняется по трем параметрам: удельное электрическое сопротивление, скорость поперечных волн и концентрация углекислого газа в почвенном воздухе (рис. 2). Для дальнейшего анализа построены карты распределения скорости сдвиговых волн и удельного электрического сопротивления в районе урвневой поверхности грунтовых вод.

На рис. 2 а, б, с показаны модели распределения свойств и параметров: удельное электрическое сопротивление грунта, скорость распространения сдвиговых волн, концентрация углекислого газа в почвенном воздухе. Карты распределения УЭС и  $V_s$  были построены при помощи статистического анализа, выполненного в ПО «ВЭЗ Мастер» (С.В. Шакуро). На карте распределения удельного электрического сопротивления пониженные значения УЭС, характерные для областей углеводородного загрязнения, находятся в западной части. На карте распределения скоростей сдвиговых волн пониженные значения, маркирующие на данной территории загрязненные грунты, неоднородно распределены по площади. Четче всего оконтурить аномалию возможно по результатам газогеохимических исследований. Здесь концентрации углекислого газа закономерно возрастают по направлению к южной части, где достигают высоких значений, так как нефтепродукты встречают на своем пути геохимические барьеры, способствующие их накоплению.

Схемы с распределением параметров были загружены в программу RGB-синтеза. С помощью программы распределение свойств задавалось в новом варианте, удобном для дальнейшей совместной инверсии: красный, синий или зеленый. При этом минимальная интенсивность цвета соотносится с минимумами значений, наиболее яркий оттенок – с максимумами (рис. 2 а<sub>1</sub>, б<sub>1</sub>, с<sub>1</sub>).

Предполагается, что для грунтов, содержащих нефтепродукты, длительное время находящиеся в подповерхностном пространстве, характерны пониженные значения удельного электрического сопротивления и скоростей сдвиговых волн, повышенные концентрации углекислого газа.



**Рис. 2.** Исходные данные для RGB-синтеза, полученные после обработки полевых материалов и в цветовой раскраске: а–а<sub>1</sub> – карта логарифма удельного электрического сопротивления, б–b<sub>1</sub> – карта скорости сдвиговых волн, с–с<sub>1</sub> – карта логарифма концентрации углекислого газа. Квадрат – контур нефтебазы.

**Fig. 2.** Initial data for RGB-synthesis obtained after field material processing and in colour-coding: а–а<sub>1</sub> – map of the logarithm of electrical resistivity, б–b<sub>1</sub> – map of shear-wave velocity, с–с<sub>1</sub> – map of the logarithm of carbon dioxide concentration. The square is the contour of the oil depot.

## Результаты и обсуждение

Предлагаемый способ интерпретации данных на качественном уровне может помочь определить грунты с различными петрофизическими характеристиками, так как в процессе синтезирования происходит наложение различных свойств на одну основу. Поэтому цветовые оттенки соответствуют различным классам с различными петрофизическими свойствами (рис. 3). Предполагается, что здесь области, загрязненные нефтепродуктами, должны иметь темно-синий оттенок, так как

распределение углекислого газа задано в синем цвете, а значения УЭС и  $V_s$  в пределах загрязненных областей понижены и в цветовой шкале должны приближаться к черному. Предполагаемый контур загрязнения показан на рис. 3. Отмечается яркая газогеохимическая аномалия в южной части, что может быть связано с зоной вторичного накопления в прибрежной части исследуемого участка. Также отдельно выделяется аномалия в юго-восточной части, интерпретируемая авторами как аномалия загрязнения грунтовых вод нефте-

продуктами, что, вероятно, связано со сложным расположением путей миграции углеводородов с грунтовыми водами.

До проведения RGB-анализа была выполнена раздельная интерпретация данных сейсморазведочных, электроразведочных работ и газогеохимии, результаты которых были обобщены в единую модель распределения загрязнения. Для сравнения полученных данных по результатам качественной интерпретации по данным RGB-синтеза и по результатам раздельной интерпретации проведено наложение контуров загрязнения в грунтовых водах, представленное на рис. 3 (справа). Отмечается, что предполагаемые контуры распространения нефтепродуктов имеют практически идентичные очертания. RGB-синтез частично детализирует расположение целевых областей.

Таким образом, на основе синтезирования многопризнаковых данных, включающих в себя геоэлектрические, сейсмоскоростные свойства грунтов и концентрацию углекислого газа в почвенном воздухе, удалось построить схему, по которой легко очертить предполагаемые контуры распространения загрязнения.

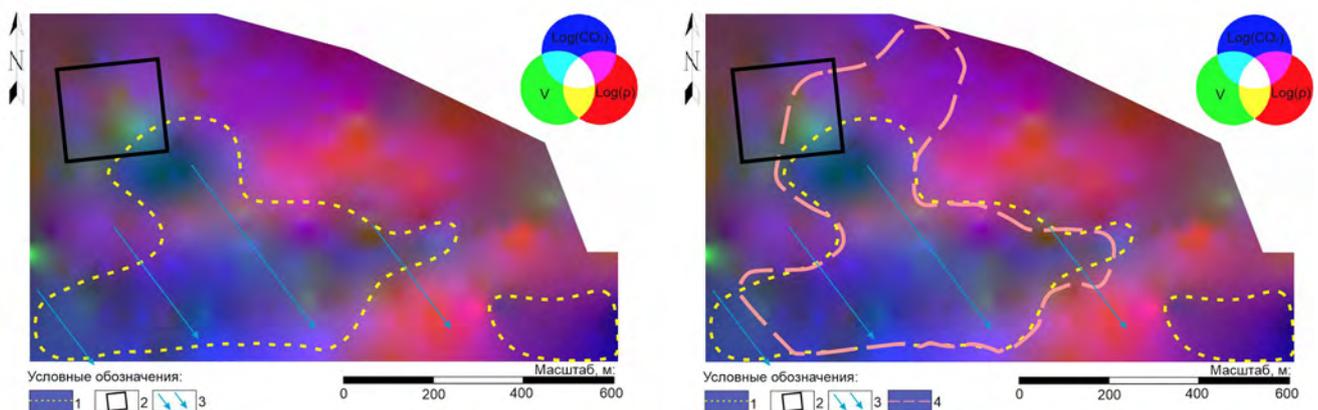
Использование такого экспресс-варианта комплексирования – в виде RGB-наложения данных различных геофизических и геохимических методов с интерпретацией единой схемы, отражающей все интересующие параметры, дает возможность оперативно локали-

зовать зону загрязнения, а с учетом направления движения подземных вод спрогнозировать ее перемещение со временем. Это позволит организовать точную и относительно быструю очистку и рекультивацию территории, сократив при этом объемы бурения и отбора проб, так как они будут требоваться не для оконтуривания зоны загрязнения, а лишь для заверки выделенных аномалий.

## Заключение

В представленной работе рассмотрен алгоритм комплексной многопризнаковой классификации геофизических данных при помощи RGB-синтеза для территории, загрязненной нефтепродуктами. Проанализирована область, примыкающая к нефтебазе, которая долгое время подвергалась воздействию поллютантов. По результатам качественной интерпретации геофизической информации авторами построена схема с предполагаемым контуром распространения нефтепродуктов на изучаемой территории.

Разработанный алгоритм может использоваться для задач оконтуривания разливов нефтепродуктов при достаточном количестве информации по геофизическим или другим информативным методам (не менее 3) на этапе определения площади распространения загрязнения для участков, где нефтепродукты находятся в грунтах длительное время.



**Рис. 3.** Результаты RGB-синтеза (слева) и сравнение результатов RGB-синтеза и раздельной интерпретации данных (справа). 1 – область распространения нефтепродуктов по результатам синтеза геофизических данных, 2 – территория нефтебазы, 3 – направление движение грунтовых вод, 4 – область распространения нефтепродуктов по результатам раздельной интерпретации геофизических данных. Цветовая шкала:  $\text{Log}(p)$  – логарифм удельного электрического сопротивления, Ом·м;  $\text{Log}(\text{CO}_2)$  – логарифм концентрации углекислого газа;  $V$  – скорость поперечных волн, м/с.

**Fig. 3.** RGB-synthesis results (left) and comparison of RGB-synthesis and separate data interpretation results (right). 1 – area of oil products distribution according to the results of geophysical data synthesis; 2 – area of oil depot; 3 – groundwater flow direction, 4 – area of oil products distribution according to the results of separate interpretation of geophysical data. Colour scale:  $\text{Log}(p)$  – logarithm of electrical resistivity, Ohm·m;  $\text{Log}(\text{CO}_2)$  – logarithm of carbon dioxide concentration;  $V$  – S-wave velocity, m/s.

Также в дальнейшем для объектов, на которых отсутствует или минимальна априорная геологическая информация, на RGB-схеме по различным цветам могут быть выделены отдельные петрофизические классы пород. В каждом выбранном месте можно провести прямые наблюдения и определить свойства грунтов, например коэффициент фильтрации, а результаты интерполировать для каждого класса отдельно.

### Список литературы

1. Титов К.В., Ильин Ю.Т., Коносовский П.К., Муслимов А.В., Рыбальченко О.В., Орлова О.Г., Мено А. **2012**. Изменение физических свойств загрязненного нефтепродуктами песка при бактериальном воздействии. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, 5: 455–469.
2. Abdel Aal G.Z., Slater L.D., Atekwana E.A. **2006**. Induced-polarization measurements on unconsolidated sediments from a site of active hydrocarbon biodegradation. *Geophysics*, 71: H13–H24. <https://doi.org/10.1190/1.2187760>
3. Atekwana E.A., Atekwana Eliot A., Werkema D.D., Allen J.P., Smart L.A., Duris J.W., Cassidy D.P., Sauck W.A., Rossbach S. **2004**. Evidence for microbial enhanced electrical conductivity in hydrocarbon-contaminated sediments. *Geophysical Research Letters*, 31: L23501.1–L23501.4. <https://doi.org/10.1029/2004gl021359>
4. Personna Yv.R., Ntarlagiannis D., Slater L., Yee N., O'Brien M., Hubbard S. **2008**. Spectral induced polarization and electrodic potential monitoring of microbially mediated iron sulfide transformations. *J. of Geophysical Research*, 113(2): C02020.1–C02020.13. <https://doi.org/10.1029/2007jg000614>
5. Lelièvre P.G., Farquharson C.G. **2016**. Integrated imaging for mineral exploration. In: *Integrated imaging of the Earth: Theory and applications*, p. 61–95. (Wiley Online Library, Geophysical Monograph Series). <https://doi.org/10.1002/9781118929063.ch8>
6. Atekwana E.A., Atekwana Eliot A. **2010**. Geophysical signatures of microbial activity at hydrocarbon contaminated sites: A review. *Surveys in Geophysics*, 31: 247–283. <https://doi.org/10.1007/s10712-009-9089-8>
7. Sauck W.A. **2000**. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *J. of Applied Geophysics*, 44(2–3): 151–165. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00021-X)
8. Garg S., Newell C.J., Kulkarni P.R., King D.C., Adamson D.T., Renno M.I., Sale T. **2017**. Overview of natural source zone depletion: Processes, controlling factors, and composition change. *Groundwater Monitoring and Remediation*, 37(3). <https://doi.org/10.1111/gwmmr.12219>
9. Спичак В.В., Безрук И.А., Гойдина А.Г. **2015**. Построение трехмерных кластерных петрофизических моделей геологической среды по совокупности геофизических данных, измеренных на опорных профилях. *Разведка и охрана земных недр*, 4: 41–45.
10. Castro D., Branco R.M.G. **2003**. 4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: A case history. *J. of Applied Geophysics*, 54(1): 127–144. <https://doi.org/10.1016/j.japrgo.2003.08.021>
11. Orozco A.F., Ciampi P., Katona T., Censini M., Papini M.P., Deidda G.P., Cassiani G. **2021**. Delineation of hydrocarbon contaminants with multi-frequency complex conductivity imaging. *Science of the Total Environment*, 768: 144997. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144997>
12. Orozco A.F., Micić V., Bückner M., Gallistl J., Hofmann Th., Nguyen F. **2019**. Complex-conductivity monitoring to delineate aquifer pore clogging during nanoparticles injection. *Geophysical Journal International*, 218(3): 1838–1852. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz255>
13. Golizdra G.Y. **1980**. Statement of the problem of comprehensive interpretation of gravity fields and seismic observations. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 16: 535–539.
14. Haber E., Oldenburg D. **1997**. Joint inversion: a structural approach. *Inverse Problems*, 13(1): 63–77. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/13/1/006>
15. Hu W., Abubakar A., Habashy T.M. **2009**. Joint electromagnetic and seismic inversion using structural constraints. *Geophysics*, 74(6): R99–R109. <https://doi.org/10.1190/1.3246586>
16. Данильев С.М., Данильева Н.А., Исакова Е.П., Ашкар Г.Х. **2020**. Исследование трещиноватости на месторождении облицовочного камня с привлечением метода георадиолокации. *Известия ТИУ*, 9: 140–145.
17. Glazunov V.V., Shtengel V.G., Nedyalkov V.S., Efimova N.N., Danilev S.M. **2018**. Combined investigation by thermal imaging and georadar scanning for voids detection under reinforced concrete slabs of fastening soil slopes of hydraulic structures. In: *Engineering and Mining Geophysics*, 2018: 1–11. (European Association of Geoscientists & Engineers: Conf. paper). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800474>
18. Miller A.A., Gorelik G.D., Budanov L.M. **2019**. Substantiation of the optimal GIS complex for the allocation of water-containing reservoirs on the example of the analysis of well logging results in the Leningrad region. In: *Engineering and Mining Geophysics*, 2019: 1–8. (European Association of Geoscientists & Engineers: Conf. paper). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201901693>
19. Danileva N., Danilev S., Bolshakova N. **2020**. Isolation of brine aquifers in carbonate rocks of above-salt sediments by a limited set of geophysical studies of wells. In: *Engineering and Mining Geophysics, Saint Petersburg*, 2020: 1–5. (European Association of Geoscientists & Engineers: Conf. paper). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202053066>
20. Мовчан И.Б., Шайгаллямова З.И., Яковлева А.А. **2022**. Выявление факторов структурного контроля коренных золоторудных проявлений методом беспилотной аэромагниторазведки на примере Нерюнгринского района Якутии. *Записки Горного института*, 254: 217–233. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.23>
21. Abubakar A., Gao G., Habashy T.M., Liu J. **2012**. Joint inversion approaches for geophysical electromagnetic and elastic full-waveform data. *Inverse Problems*, 28(5): 055016. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/28/5/055016>
22. Colombo D., De Stefano M. **2007**. Geophysical modeling via simultaneous joint inversion of seismic, gravity, and electromagnetic data: Application to prestack depth imaging. *The Leading Edge*, 26: 326–331. <https://doi.org/10.1190/1.2715057>
23. Moorkamp M., Jones A.G., Fishwick S. **2010**. Joint inversion of receiver functions, surface wave dispersion, and magnetotelluric data. *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B4). <https://doi.org/10.1029/2009jb006369>
24. Спичак В.В. **2009**. Современные подходы к комплексной инверсии геофизических данных. *Геофизика*, 5: 10–19.

25. Спичак В.В., Безрук И.А., Попова И.В. **2008**. Построение глубинных кластерных петрофизических разрезов по геофизическим данным и прогноз нефтегазоносности территорий. *Геофизика*, 5: 43–45.
  26. Agostinetti N.P., Bodin Th. **2018**. Flexible coupling in joint inversions: A Bayesian structure decoupling algorithm. *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 123: 8798–8826. <https://doi.org/10.1029/2018JB016079>
  27. Di Giuseppe M.G., Troiano A., Patella D., Piochi M., Carlino S. **2018**. A geophysical k-means cluster analysis of the Solfatara-Pisciarelli volcano-geothermal system, Campi Flegrei (Naples, Italy). *J. of Applied Geophysics*, 156: 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.06.001>
  28. Yu Siwei, Ma Jianwei. **2020**. Data-driven geophysics: from dictionary learning to deep learning. *ArXiv abs/2007.06183*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.06183>
  29. Bedrosian P.A., Maercklin N., Weckmann U., Bartov Y., Ryberg T., Ritter O. **2007**. Lithology-derived structure classification from the joint interpretation of magnetotelluric and seismic models. *Geophysical Journal International*, 170(2): 737–748. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03440.x>
  30. Akhmetshin E.M., Kolpak E.P., Sulimova E.A., Kireev V.S., Samarina E.A., Solodilova N.Z. **2017**. Clustering as a criterion for the success of modern industrial enterprises. *International Journal of Applied Business and Economic Research*, 15(23): 221–231.
  31. Никитин А.А., Булычев А.А. **2015**. *Комплексный анализ и комплексная интерпретация геофизических полей: учеб. пособие*. М.: ВНИИГеосистем, 94 с.
  32. Kothyra B., Schmidt V. **2014**. Combination of seismic and resistivity tomography for the detection of abandoned mine workings in Münster/Westfalen, Germany: Improved data interpretation by cluster analysis. *Near Surface Geophysics*, 12(3): 415–426. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013056>
  33. *RGB-синтез для комплексной интерпретации данных сейсмических методов: Свид-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616804 РФ*. **2021**. Авт.: Григорьев Г.К., Мингалева Т.А., Сенчина Н.П. Заявл. 23.04.2021; № 2021615994; опублик. 27.04.2021, Бюл. № 5.
  34. *Цифровые каталоги геологических карт*. СПб., Всерос. науч.-исслед. геол. ин-т им. А.П. Карпинского. URL: [https://vsegei.ru/ru/info/catalog\\_ggk/](https://vsegei.ru/ru/info/catalog_ggk/) (дата обращения 21.09.2022).
- References**
1. Titov K.V., Il'in Yu.T., Konosavskii P.K., Muslimov A.V., Rybal'chenko O.V., Orlova O.G., Meno A. **2012**. Transformation of physical properties of sand contaminated with oil products upon bacterial impact. *Geoekologiya*, 5: 455–469 (In Russ.). EDN: PFJIDJ
  2. Abdel Aal G.Z., Slater L.D., Atekwana E.A. **2006**. Induced-polarization measurements on unconsolidated sediments from a site of active hydrocarbon biodegradation. *Geophysics*, 71: H13–H24. <https://doi.org/10.1190/1.2187760>
  3. Atekwana E.A., Atekwana Eliot A., Werkema D.D., Allen J.P., Smart L.A., Duris J.W., Cassidy D.P., Sauck W.A., Rossbach S. **2004**. Evidence for microbial enhanced electrical conductivity in hydrocarbon-contaminated sediments. *Geophysical Research Letters*, 31: L23501.1–L23501.4. <https://doi.org/10.1029/2004gl021359>
  4. Personna Y.R., Ntarlagiannis D., Slater L., Yee N., O'Brien M., Hubbard S. **2008**. Spectral induced polarization and electrodic potential monitoring of microbially mediated iron sulfide transformations. *J. of Geophysical Research*, 113(2): C02020.1–C02020.13. <https://doi.org/10.1029/2007jg000614>
  5. Lelièvre P.G., Farquharson C.G. **2016**. Integrated imaging for mineral exploration. In: *Integrated imaging of the Earth: Theory and applications*, p. 61–95. (Wiley Online Library, Geophysical Monograph Series). <https://doi.org/10.1002/9781118929063.ch8>
  6. Atekwana E.A., Atekwana Eliot A. **2010**. Geophysical signatures of microbial activity at hydrocarbon contaminated sites: A review. *Surveys in Geophysics*, 31: 247–283. <https://doi.org/10.1007/s10712-009-9089-8>
  7. Sauck W.A. **2000**. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *J. of Applied Geophysics*, 44(2–3): 151–165. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00021-X)
  8. Garg S., Newell C.J., Kulkarni P.R., King D.C., Adamson D.T., Renno M.I., Sale T. **2017**. Overview of natural source zone depletion: Processes, controlling factors, and composition change. *Groundwater Monitoring and Remediation*, 37(3). <https://doi.org/10.1111/gwmr.12219>
  9. Spichak V.V., Bezruk I.A., Goydina A.G. **2015**. Construction of the three-dimensional cluster petrophysical models of geological medium based on the geophysical data collected along reference profiles. *Prospect and protection of mineral resources*, 4: 41–45. (In Russ.). EDN: TOVFLJ
  10. Castro D., Branco R.M.G. **2003**. 4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: A case history. *J. of Applied Geophysics*, 54(1): 127–144. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2003.08.021>
  11. Orozco A.F., Ciampi P., Katona T., Censini M., Papini M.P., Deidda G.P., Cassiani G. **2021**. Delineation of hydrocarbon contaminants with multi-frequency complex conductivity imaging. *Science of the Total Environment*, 768: 144997. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144997>
  12. Orozco A.F., Micić V., Bücken M., Gallistl J., Hofmann Th., Nguyen F. **2019**. Complex-conductivity monitoring to delineate aquifer pore clogging during nanoparticles injection. *Geophysical Journal International*, 218(3): 1838–1852. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz255>
  13. Golizdra G.Y. **1980**. Statement of the problem of comprehensive interpretation of gravity fields and seismic observations. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 16: 535–539.
  14. Haber E., Oldenburg D. **1997**. Joint inversion: a structural approach. *Inverse Problems*, 13(1): 63–77. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/13/1/006>
  15. Hu W., Abubakar A., Habashy T.M. **2009**. Joint electromagnetic and seismic inversion using structural constraints. *Geophysics*, 74(6): R99–R109. <https://doi.org/10.1190/1.3246586>
  16. Daniliev S.M., Danilieva N.A., Isakova E.P., Ashkar G.K. **2020**. Research of cracking at facing stone deposit using the georadar method. *Izvestiya TPU = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 331(9): 140–145. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/9/2816>
  17. Glazunov V.V., Shtengel V.G., Nedyalkov V.S., Efimova N.N., Danilev S.M. **2018**. Combined investigation by thermal imaging and georadar scanning for voids detection under reinforced concrete slabs of fastening soil slopes of hydraulic structures. In: *Engineering and Mining Geophysics*, 2018: 1–11. (European Association of Geoscientists & Engineers: Conf. paper). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800474>
  18. Miller A.A., Gorelik G.D., Budanov L.M. **2019**. Substantiation of the optimal GIS complex for the allocation of water-

- containing reservoirs on the example of the analysis of well logging results in the Leningrad region. In: *Engineering and Mining Geophysics*, 2019: 1–8. (European Association of Geoscientists & Engineers: Conf. paper).  
<https://doi.org/10.3997/2214-4609.201901693>
19. Danileva N., Danilev S., Bolshakova N. **2020**. Isolation of brine aquifers in carbonate rocks of above-salt sediments by a limited set of geophysical studies of wells. In: *Engineering and Mining Geophysics, Saint Petersburg*, 2020: 1–5. (European Association of Geoscientists & Engineers: Conf. paper).  
<https://doi.org/10.3997/2214-4609.202053066>
  20. Movchan I.B., Shaygallyamova Z.I., Yakovleva A.A. **2022**. Identification of structural control factors of primary gold ore occurrences by method of unmanned aeromagnetic survey by the example of the Neryungri district of Yakutia. *J. of Mining Institute*, 254: 217–233. (In Russ.&Engl.).  
<https://doi.org/10.31897/PMI.2022.23>
  21. Abubakar A., Gao G., Habashy T.M., Liu J. **2012**. Joint inversion approaches for geophysical electromagnetic and elastic full-waveform data. *Inverse Problems*, 28(5): 055016.  
<https://doi.org/10.1088/0266-5611/28/5/055016>
  22. Colombo D., De Stefano M. **2007**. Geophysical modeling via simultaneous joint inversion of seismic, gravity, and electromagnetic data: Application to prestack depth imaging. *The Leading Edge*, 26: 326–331.  
<https://doi.org/10.1190/1.2715057>
  23. Moorkamp M., Jones A.G., Fishwick S. **2010**. Joint inversion of receiver functions, surface wave dispersion, and magnetotelluric data. *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B4).  
<https://doi.org/10.1029/2009jb006369>
  24. Spichak V.V. **2009**. Modern approaches to integrated geophysical data inversion. *Geophysics*, 5: 10–19. (In Russ.). EDN: SAVPXR
  25. Spichak B.V., Bezruk I.A., Popova I.V. **2008**. Deep cluster petrophysical sections construction using geophysical data for assessment of hydrocarbon potential. *Geophysics*, 5: 43–45. (In Russ.). EDN: SBKPNR
  26. Agostinetti N.P., Bodin Th. **2018**. Flexible coupling in joint inversions: A Bayesian structure decoupling algorithm. *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 123: 8798–8826.  
<https://doi.org/10.1029/2018JB016079>
  27. Di Giuseppe M.G., Troiano A., Patella D., Piochi M., Carlino S. **2018**. A geophysical k-means cluster analysis of the Solfatara-Pisciarelli volcano-geothermal system, Campi Flegrei (Naples, Italy). *J. of Applied Geophysics*, 156: 44–54.  
<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.06.001>
  28. Yu Siwei, Ma Jianwei. 2020. Data-driven geophysics: from dictionary learning to deep learning. *ArXiv abs/2007.06183*.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.06183>
  29. Bedrosian P.A., Maercklin N., Weckmann U., Bartov Y., Ryberg T., Ritter O. **2007**. Lithology-derived structure classification from the joint interpretation of magnetotelluric and seismic models. *Geophysical Journal International*, 170(2): 737–748. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03440.x>
  30. Akhmetshin E.M., Kolpak E.P., Sulimova E.A., Kireev V.S., Samarina E.A., Solodilova N.Z. **2017**. Clustering as a criterion for the success of modern industrial enterprises. *International Journal of Applied Business and Economic Research*, 15(23): 221–231.
  31. Nikitin A.A., Bulychev A.A. **2015**. [*Complex analysis and complex interpretation of geophysical fields: textbook*]. Moscow: VNIIGeosystem, 94 p. (In Russ.).
  32. Kotyrba B., Schmidt V. **2014**. Combination of seismic and resistivity tomography for the detection of abandoned mine workings in Münster/Westfalen, Germany: Improved data interpretation by cluster analysis. *Near Surface Geophysics*, 12(3): 415–426. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013056>
  33. *RGB-sintez dlya kompleksnoj interpretacii dannyh nesejsmicheskikh metodov [RGB synthesis for the complex interpretation of data of non-seismic methods]*: State registration certificate of the computer program No. 2021616804 RF. **2021**. Authors: Grigoriev G.K., Mingaleva T.A., Senchina N.P. Appl. 23.04.2021; No. 2021615994; publ. 27.04.2021, Bull. No. 5. (In Russ.).
  34. *Digital catalogs of geological maps*. Russian Geological Research Institute (VSEGEI). (In Russ.). URL: [https://vsegei.ru/ru/info/catalog\\_ggk/](https://vsegei.ru/ru/info/catalog_ggk/) (accessed 21.09.2022).

## Об авторах

**Мингалева Татьяна Андреевна** (<https://orcid.org/0000-0002-6867-1981>), аспирант кафедры геофизики, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, [tatiana.mingaleva@bk.ru](mailto:tatiana.mingaleva@bk.ru)

**Шакуро Сергей Владимирович**, генеральный директор ООО «ФРОНТ Геология», ООО «ФРОНТ Геология», Нижний Новгород, Россия, [s.shakuro@gmail.com](mailto:s.shakuro@gmail.com)

**Сенчина Наталия Петровна** (<https://orcid.org/0000-0001-5458-648X>), кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, [n\\_senchina@inbox.ru](mailto:n_senchina@inbox.ru)

**Егоров Алексей Сергеевич** (<https://orcid.org/0000-0002-3501-9145>), доктор геолого-минералогических наук, профессор, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, [egorov\\_as@pers.spmi.ru](mailto:egorov_as@pers.spmi.ru)

Поступила 14.02.2023

После доработки 26.02.2023

Принята к публикации 01.03.2023

## About the Authors

**Mingaleva, Tatiana A.** (<https://orcid.org/0000-0002-6867-1981>), Postgraduate Student, Department of Geophysics, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia, [tatiana.mingaleva@bk.ru](mailto:tatiana.mingaleva@bk.ru)

**Shakuro, Sergey V.**, General Director, FRONT Geologiya LLC, Nizhny Novgorod, Russia, [s.shakuro@gmail.com](mailto:s.shakuro@gmail.com)

**Senchina, Natalia P.** (<https://orcid.org/0000-0001-5458-648X>), Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia, [n\\_senchina@inbox.ru](mailto:n_senchina@inbox.ru)

**Egorov, Alexey S.** (<https://orcid.org/0000-0002-3501-9145>), Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia, [egorov\\_as@pers.spmi.ru](mailto:egorov_as@pers.spmi.ru)

Received 14 February 2023

Revised 26 February 2023

Accepted 1 March 2023



## НАУЧНАЯ СМЕНА

### Русинович Виктор Викторович

В 2019 г. окончил Российской государственной университет нефти и газа им. И.М. Губкина по специальности «Прикладная геология». Работал специалистом отдела геологии международного проекта «Сахалин-1». Решаемые Виктором научные и производственные задачи включали анализ и интерпретацию особенностей геологического строения месторождений нефти и газа, принципов подсчета исходных и остаточных запасов, оценку геологических рисков. Его исследования служили основой планирования и оптимизации траекторий скважин, играли ключевую роль в принятии инвестиционных решений по программам бурения и напрямую влияли на финансовые результаты проекта.

В 2020 г. поступил на очную форму обучения в аспирантуру Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, в котором успешно освоил методы ведения научно-исследовательской деятельности и получил новые знания в области промышленной геофизики. Эти знания помогли Виктору в разработке нейронной сети, автоматизирующей процесс трассировки дизъюнктивных нарушений. Помимо этого он сделал существенный вклад в исследование нефтегазонасного потенциала юго-восточной части Присахалинского шельфа, создав модель, воспроизводящую процессы геологической эволюции и катагенетических преобразований материнских пород, миграции и аккумуляции углеводородов осадочного бассейна центральной части Южно-Сахалинской нефтегазонасной области.

В настоящее время продолжает научную деятельность в ИМГиГ ДВО РАН под руководством д.ф.-м.н. Л.М. Богомолова и активном участии к.ф.-м.н. А.С. Закупина, разрабатывая программы, автоматизирующие процессы нефтегазовой отрасли. В результате его работы была создана программа для расчета прогноза добычи нефти и газа, учитывающая ограничения наземного оборудования и требования по эксплуатации добывающих скважин. Программа уже внедрена в производство на проекте «Сахалин-1» и в компании «Транс Нафта Газдобыча». Она в десятки раз сокращает время подготовки прогнозов добычи углеводородов и снижает риск совершения ошибок в расчетах.

Имеет 9 публикаций, в том числе 6 статей в реферируемых российских изданиях. Результаты научной работы апробированы на 10 конференциях, в том числе на 5 международных.



### Русинович Лариса Эдуардовна

Окончила Российской государственной университет нефти и газа им. И.М. Губкина по специальности «Прикладная геология» в 2019 г.

С 2020 г. является аспиранткой Института морской геологии и геофизики ДВО РАН по направлению «Геология», ведет научно-исследовательскую деятельность под руководством к.ф.-м.н. А.С. Закупина в сфере оценки перспектив нефтегазонасности Макаровской синклинальной зоны. Эффективно сочетает детерминистические и статистические методы для корректной оценки степени влияния геологических неопределенностей на прогноз нефтегазонасности.

Регулярно принимает участие в конференциях всероссийского и международного уровня.



## Автоматизация трассировки поверхностей разломов с помощью алгоритмов компьютерного зрения

В. В. Русинович\*, Л. Э. Русинович

\*E-mail: [victor.rusinovich@gmail.com](mailto:victor.rusinovich@gmail.com)

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

**Резюме.** Представлены результаты адаптации сверточной нейросети U-net к решению задачи трассировки поверхностей разломов на трехмерных кубах сейсмоки. Картирование разломов является одним из этапов интерпретации результатов применения сейсмических методов полевых геофизических работ. Результаты интерпретации используются для построения структурных каркасов геологических моделей, планирования стратегии разработки месторождений, оценки гидродинамической связи объектов разработки, планирования точек заложения скважин, их количества и т.д. Разработанный алгоритм нейронной сети, применяющей алгоритмы компьютерного зрения, позволяет существенно увеличить скорость выделения разломов и снижает риски пропуска разломов в процессе интерпретации. Также рассмотрены проблемы применения нейросети, обученной на синтетическом наборе данных, для решения практических задач. Предложены методы повышения достоверности интерпретации данных, полученных в результате проведения полевых геофизических работ. В частности, при помощи расчета и обработки нейросетью дополнительного куба атрибута когерентности. Дана положительная оценка применимости сверточных нейросетей для решения задач трассировки поверхностей разломов.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, машинное обучение, компьютерное зрение, сверточная нейросеть, автоматизация, выделение разломов, интерпретация сейсмоки

## Fault surface tracing automation using computer vision algorithms

Viktor V. Rusinovich\*, Larisa E. Rusinovich

\*E-mail: [victor.rusinovich@gmail.com](mailto:victor.rusinovich@gmail.com)

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

**Abstract.** This article presents the results of adapting the U-net convolutional neural network to solving the problem of tracing fault surfaces on 3D seismic cubes. Fault mapping is one of the stages of interpretation of the results of using the seismic methods of field geophysical work. The interpretation results are used to build structural frameworks of geological models, plan field development strategies, assess the hydrodynamic connectivity of reservoirs, plan well locations, their number, etc. The developed neural network algorithm, which uses computer vision algorithms, can significantly increase the speed of faults detection and reduce risk of skipping faults in interpretation process. The problems of using a neural network trained on a synthetic data set for solving practical problems are also considered. Methods for increasing reliability of seismic interpretation are proposed. In particular, by calculating and subsequent processing with neural network an additional volume of the coherence attribute. As a result of the study, a positive conclusion on the applicability of convolutional neural networks for solving problems of tracing fault surfaces is given.

**Keywords:** neural network, machine learning, computer vision, convolution neural network, automation, fault mapping, seismic interpretation

**Для цитирования:** Русинович В.В., Русинович Л.Э. Автоматизация трассировки поверхностей разломов с помощью алгоритмов компьютерного зрения. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 1, с. 86–94. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.086-094>; <https://www.elibrary.ru/zzuzky>

**For citation:** Rusinovich V.V., Rusinovich L.E. Fault surface tracing automation using computer vision algorithms. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 1, pp. 86–94. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.086-094>; <https://www.elibrary.ru/zzuzky>

### Благодарности

Авторы благодарны А.С. Закупину и уважаемым рецензентам за обсуждение результатов исследования и полезные замечания по улучшению статьи.

### Acknowledgments

Authors are grateful to Aleksander S. Zakupin and the respected Reviewers for discussing the results of the research and useful comments on improving the article.

## Введение

Выделение и трассировка разломов выполняется различными методами, в частности разломы со смещением более 10 м могут быть выделены по результатам интерпретации сейсмических данных среднечастотной (10–100 Гц) сейсморазведки. Это трудоемкий процесс, на который, по опыту авторов, может уходить несколько недель и более, в зависимости от качества сейсмической съемки, размера области исследования, сложности геологического строения и многих других факторов. В связи с этим автоматизация трассировки разломов является актуальной задачей, способной существенно сократить время, которое требуется для выполнения работы.

Традиционно трассировка разломов по данным сейсмической съемки выполняется интерпретатором вручную в специализированном программном обеспечении. Авторы предлагают автоматизировать процесс интерпретации с помощью применения сверточных нейронных сетей, которые уже доказали свою эффективность в сегментации изображений в медицине, промышленности, управлении транспортными средствами, сельском хозяйстве и других сферах. Попытки автоматизировать процесс выделения разломов предпринимались ранее, в частности для этих целей компанией Schlumberger Stavanger Research был разработан алгоритм Ant Tracking [1], позволяющий в некоторых случаях сократить общее время интерпретации разломов в 3 раза и более. Так, при интерпретации разломов с применением алгоритмов Ant Tracking на месторождении Марлим Южное удалось сократить время с десяти дней до трех [2]. Предлагаемая авторами нейронная сеть позволяет сократить срок выполнения работ до нескольких десятков минут.

## Методика, результаты и обсуждение

Сверточная нейронная сеть один из популярных видов нейронных сетей глубокого обучения, общая идея работы которых заключается в воспроизведении механизмов работы биологических зрительных систем. Распознавание и классификация объектов нейронами происходит при помощи создания карт при-

знаков, при этом детектируемые признаки на каждом последующем слое становятся все более сложными.

Задача выделения разломов в терминологии алгоритмов компьютерного зрения является задачей бинарной классификации объектов, в рамках которой, после тренировки на обучающем наборе размеченных данных, нейросеть должна будет по набору признаков выделить объекты, относящиеся к разломам. При этом формирование набора признаков, по которым объекты определяются как разломы, нейросеть выполнит самостоятельно в процессе обучения на выборке тренировочных данных, содержащих маски размеченных разломов.

Для решения задачи выбрана архитектура U-net [3], которая была разработана для решения схожей задачи бинарной классификации и создания масок, отображающих положение искомого объектов. В качестве инструментов моделирования архитектуры U-net в роли модели нейронной сети применяются открытые библиотеки OpenCV и Keras совместно с TensorFlow на базе языка программирования Python.

Расчеты выполнялись в среде Google Colaboratory, предоставляющей открытый доступ к ограниченному объему облачных вычислительных мощностей графических и тензорных процессоров, которые необходимы для быстрого выполнения расчетов алгоритмами нейронных сетей.

Адаптированная схема архитектуры U-net представлена на рис. 1. Данная архитектура относится к классу сверточных нейронных из-за применяемых в ней методов. В классической нейронной сети, называемой полносвязной или регрессивной, имеются входной, выходной и скрытые слои, которые представляют собой набор нейронов, связанных друг с другом. Архитектура U-net не содержит полносвязных слоев, а имеет только карты признаков между входным и выходным слоями, а также ядра свертки для получения и укрепления признаков искомого объектов, в данном случае разломов.

Данная архитектура получила свое название из-за характерной формы: в ее левой части происходят поэтапная свертка трехмерного куба сеймики и поиск признаков, соответствующих разломам. В правой части, в случае

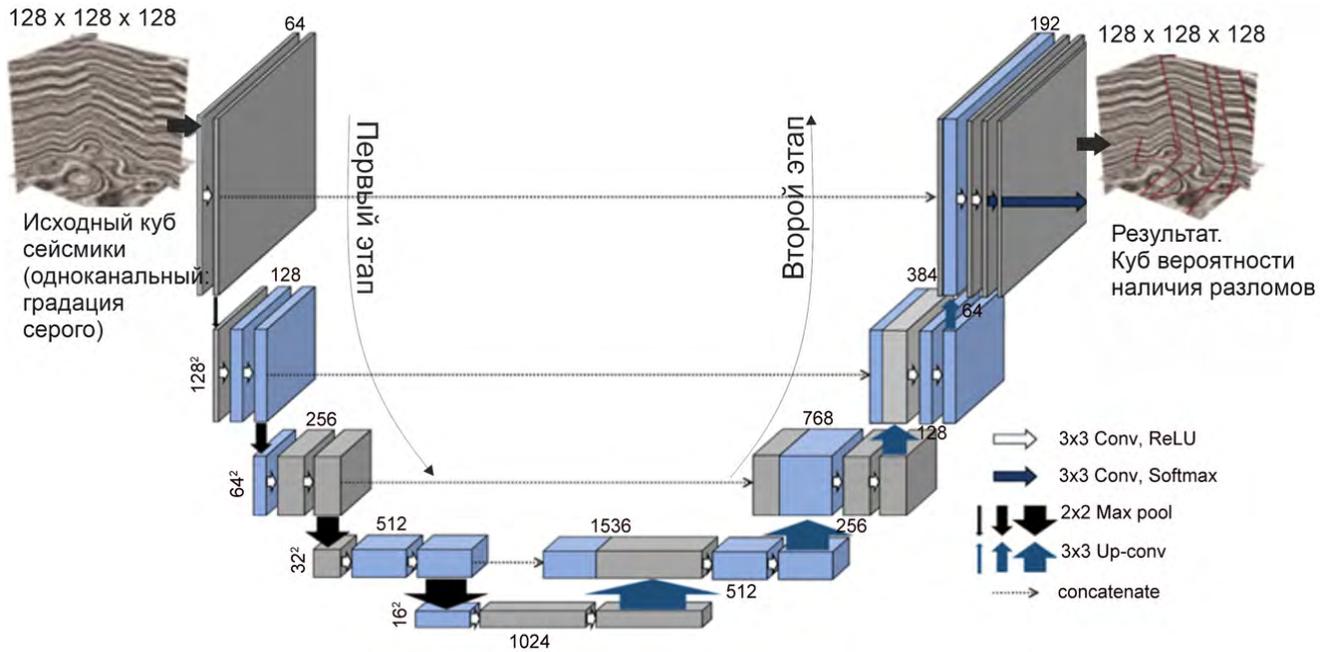


Рис. 1. Архитектура нейронной сети.

Fig. 1. Neural network architecture.

обнаружения разломов, происходит развертка с отображением в соответствующих ячейках вероятности (от 0 до 1) наличия разлома.

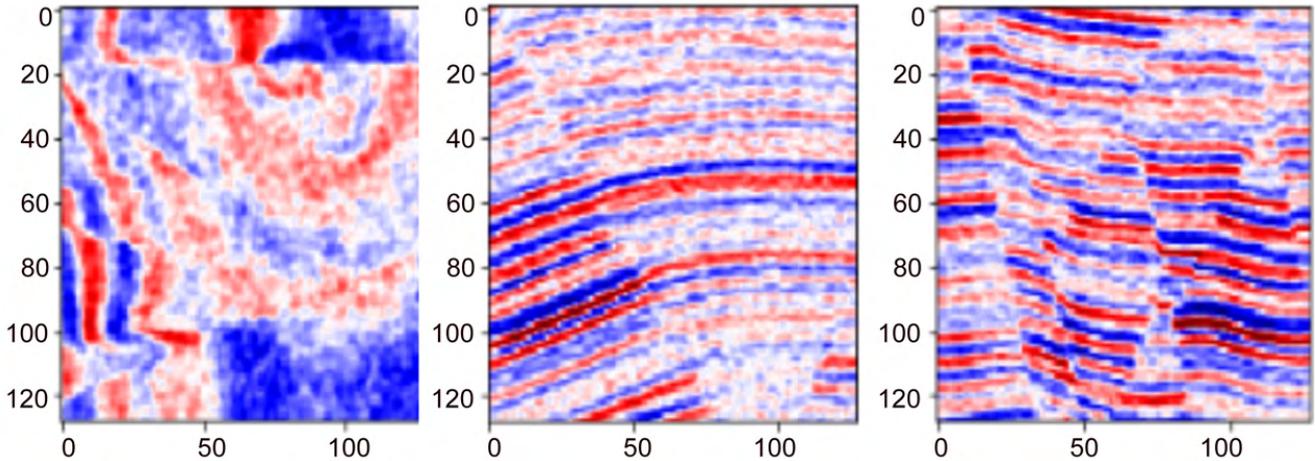
Первый этап – понижение дискретизации. Архитектура U-net получает на вход одноканальное трехмерное изображение фиксированного размера, которое является степенью двойки по ширине и высоте, с целью сохранения каждого пиксела при применении к изображению или картам признаков метода понижающей дискретизации (downsampling, иначе pooling). На данном этапе формируются ядра свертки, заполняясь случайными значениями из заранее указанного диапазона. Над поступившим кубом применяются последовательно методы двух сверток и понижения дискретизации. Смысл первого этапа заключается в формировании карт признаков искомым объектов, собранных на разных уровнях сворачивания, благодаря чему данная архитектура способна собирать на изображении признаки искомым объектов, представляющие собой совокупность различных геометрических форм и размеров.

Второй этап – повышение дискретизации, на котором происходит восстановление собранных на первом этапе признаков искомым объектов на изображении. Применяется последовательно метод транспонированной свертки

и конкатенации карт признаков с первого этапа на соответствующем уровне второго этапа. Благодаря этому происходит сбор восстановленных на втором этапе особенностей искомым объектов на изображении (после транспонированной свертки на втором этапе метода), а также особенностей искомым объектов на изображении с первого этапа.

Одним из существенных достоинств данной сети является ее высокая эффективность при обучении на небольшой выборке тренировочных данных, что подтверждено ее использованием в биомедицинских целях, для которых характерна проблема нехватки примеров для обучения моделей [3]. Для обучения нейросети, автоматизирующей трассировку поверхностей разломов, авторы использовали набор из 200 синтетически сгенерированных кубов сеймики (рис. 2) размерами  $128 \times 128 \times 128$  пикселей, в связке с размеченными кубами разломов. Еще 20 кубов использовались для валидации результатов. Набор данных был взят из открытых источников [4].

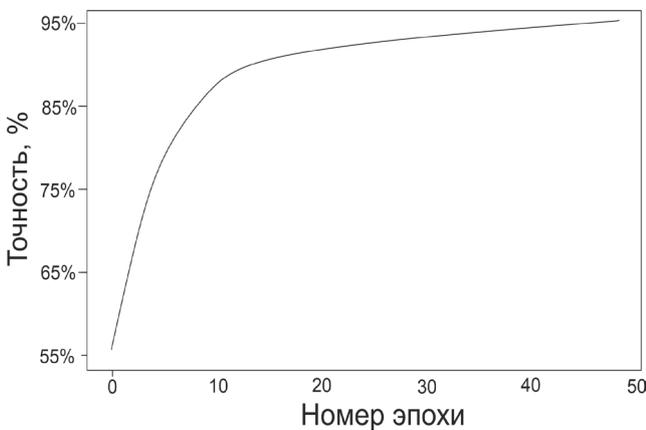
Обучение нейросети проводилось в течение 50 эпох (рис. 3), в процессе поэтапной обработки кубов тренировочных данных, которые последовательно загружались в модель с целью формирования карт признаков для распознавания разломов. Обучение происхо-



**Рис. 2.** Пример синтетически сгенерированных кубов сейсмичности.  
**Fig. 2.** Examples of synthetic seismic cubes.

дидо путем применения метода обратного распространения ошибки классификации объектов [5], что позволило настроить веса параметров для корректного распознавания разломов. В результате была достигнута точность в 95 % на тренировочных и 93 % на валидационных кубах. Точность считалась как обратная величина ошибки – процент пикселей, соответствующих разломам, которые не были корректно распознаны моделью.

Первичная проверка работоспособности проводилась на тестовых массивах сейсмических данных, которые не использовались для ее тренировки, и сеть успешно выделила разломы (рис. 4). Результирующий куб представляет собой трехмерное пространство, внутри которого отображена вероятность наличия разлома в каждой точке куба. Вероятность представлена диапазоном значений от 0 до 1,

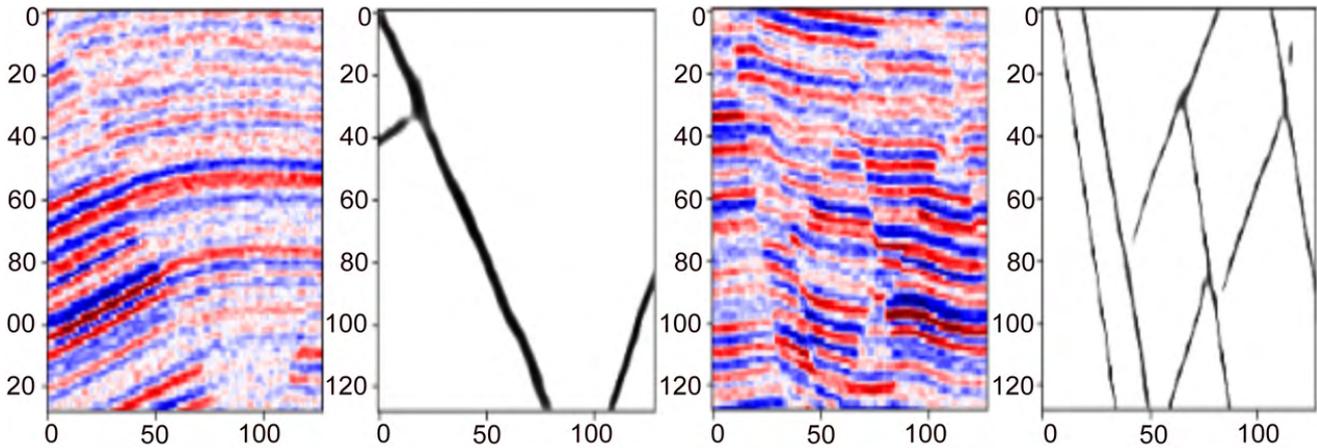


**Рис. 3.** График зависимости точности модели от количества эпох.  
**Fig. 3.** Graph of model accuracy versus the number of epochs.

отображающим степень достоверности выделения разлома в конкретной точке.

Для тестирования способности нейросети выделять разломы на полевых данных использовались кубы сейсмических данных, взятых из открытых источников: сейсмические данные блока F3 на шельфе Нидерландов [6] и Байкальского месторождения (на суше) [7]. Различия условий геофизических исследований позволяют в полной мере оценить применимость нейросетей, обученных на синтетических данных, трассировать разломы на сейсмических кубах, полученных в результате полевых исследований. Их существенным отличием является подверженность большому количеству как естественных – природных, так и техногенных помех, которые не всегда в полной мере удастся удалить в процессе последующей обработки.

Нейросеть, использующая алгоритмы компьютерного зрения, успешно справилась с задачей бинарной классификации объектов на кубе сейсмических данных блока F3 (рис. 5) размерами 512×312×128 пикселей (исходный куб был обрезан для сокращения времени расчета). Время расчета составило 27 мин. Однако нейросеть классифицировала как разломы отдельные линейные объекты, которые на самом деле являются шумами. В дальнейшем такие объекты можно удалить, добавив дополнительную фильтрацию выходных данных, к примеру, по минимальной длине разрывного нарушения, в результате чего будут удалены все линейные объекты, длина которых меньше заданного значения. Следует отметить

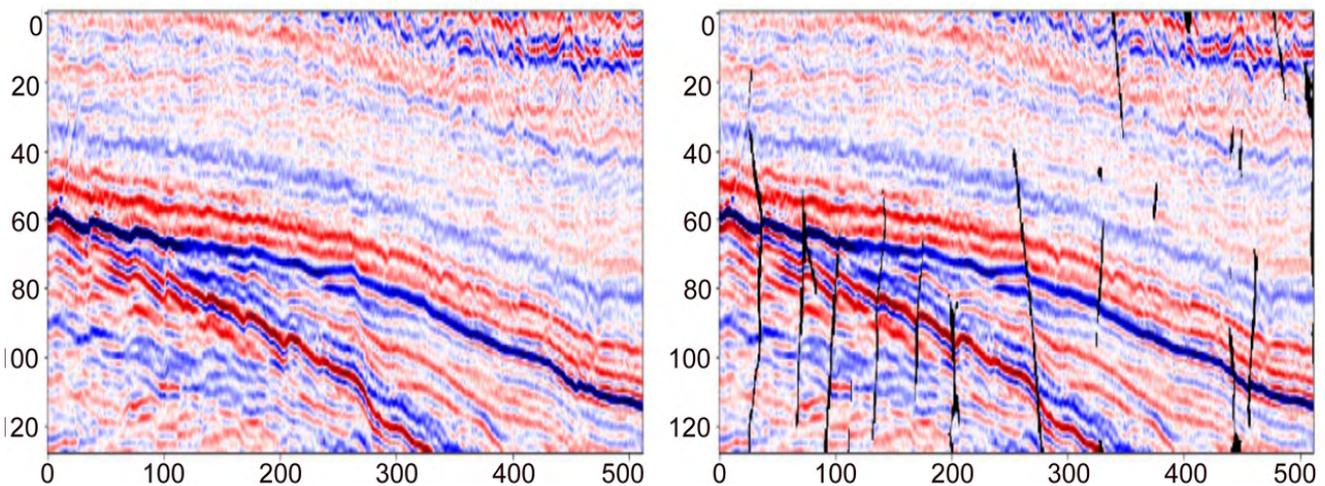


**Рис. 4.** Пример выделения разломов на кубе синтетической сейсмике (из валидационной выборки).  
**Fig. 4.** Example of faults mapping on synthetic seismic cube (from validation dataset).

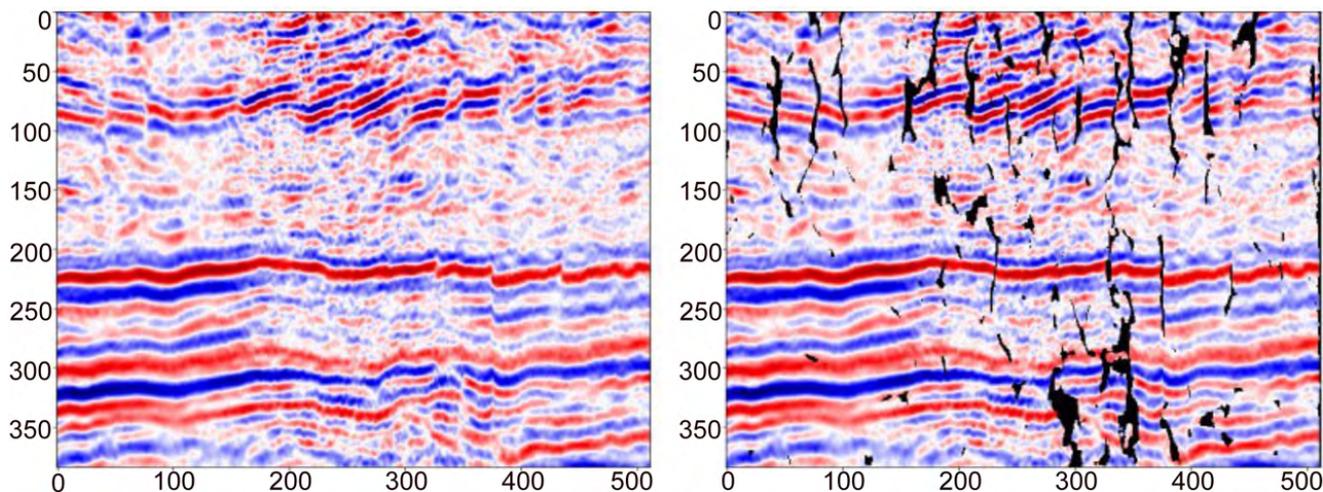
высокое качество сейсмике блока F3, что характерно для геофизических исследований, проведенных на шельфе и подверженных меньшему количеству помех по сравнению с наземными исследованиями.

Первая попытка выделения разломов нейросетью на кубе сейсмике Байкальского месторождения (также уменьшенного до размеров 512×384×384 пикселей) не увенчалась успехом из-за значительного количества шумов, которые не были в полной мере удалены в процессе обработки и интерпретировались алгоритмом как разломы (рис. 6). Попытка снизить количество ошибочно интерпретированных разломов за счет удаления всех ячеек с вероятностью наличия разлома менее 0.9 % не привела к значительному улучшению конечных результатов.

Для решения проблемы выделения разломов на Байкальском месторождении были предприняты следующие шаги: 1) был уменьшен диапазон значений амплитуд отражающих горизонтов: с (-15000) – (+15000) до (-6000) – (+6000), с последующим пропорциональным пересчетом всех значений в исходном кубе сейсмике, что повысило контрастность изображения; 2) был рассчитан дополнительный куб когерентности [8], который позволяет выделить несоответствие сигнала по латерали и указывает на неоднородности сейсмического поля, обусловленные влиянием зон разломов [9]. В результате появилась возможность использовать нейросеть для трассировки разломов в массиве данных атрибута когерентности и после применять математические операции для повышения достоверности их распознавания.



**Рис. 5.** Пример выделения разломов на кубе сейсмике блока F3 на шельфе Нидерландов.  
**Fig. 5.** Example of fault mapping on the F3 seismic cube on Netherlands shelf.



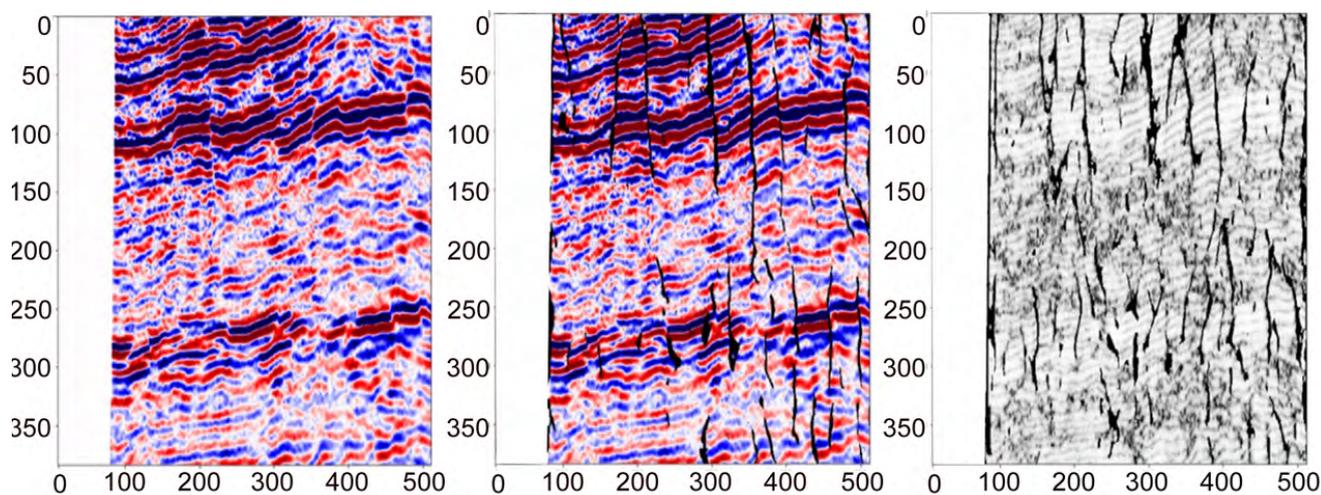
**Рис. 6.** Пример выделения разломов на кубе сеймики Байкальского месторождения.  
**Fig. 6.** Example of fault mapping on the seismic cube of Baykalskoye field.

После обработки полученных кубов (рис. 7) отмечено повышение качества выделения разломов и уменьшение ошибочно интерпретированных объектов на кубе сеймики. На кубе когерентности результаты распознавания разломов значительно хуже, что объясняется тренировкой модели для трассировки разрывных нарушений на сейсмических кубах.

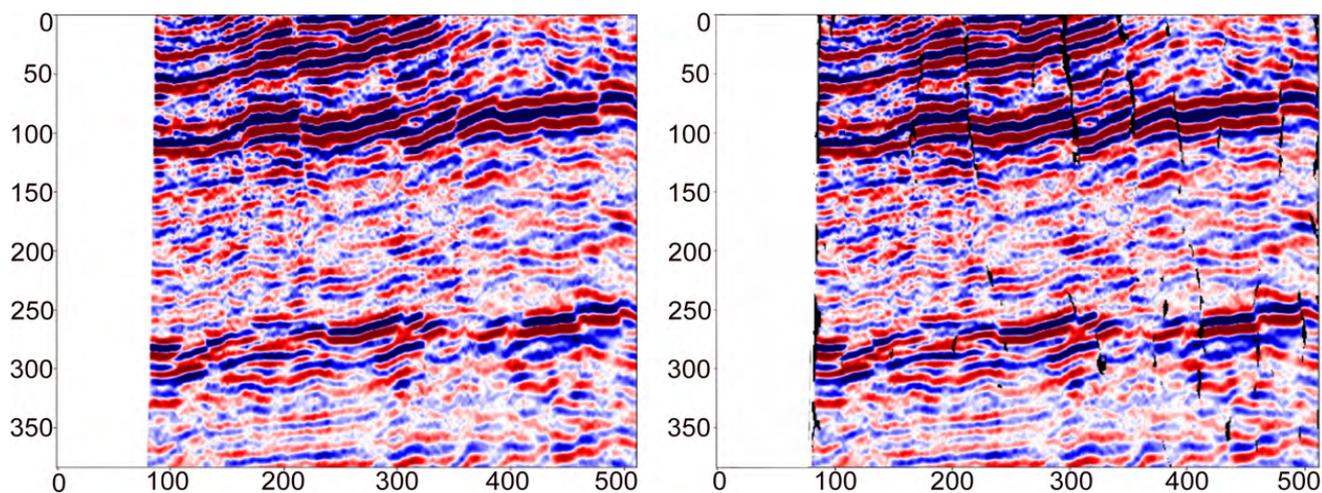
Наличие дополнительного куба разломов добавляет вариативности дальнейшим преобразованиям. В частности, мы сложили кубы разломов, интерпретированных на кубах сеймики и когерентности, поделили результирующую матрицу на два и удалили все точки с вероятностью наличия разлома менее 0.9 (рис. 8). Таким образом удалось повысить достоверность выявления разрывных нарушений. Недостатком

такого подхода является увеличение времени расчетов в два раза из-за необходимости обработки дополнительного куба.

Обработка нейронной сетью дополнительного куба атрибута когерентности позволяет повысить качество интерпретации разломной тектоники на сейсмических данных низкого качества. Даже увеличенное в два раза (с 27 до 54 мин) время обработки в десятки раз меньше по сравнению с традиционными методами ручной трассировки разломов интерпретаторами, а результат значительно детальней. Традиционно при трассировке разломов интерпретаторы отмечают их на каждом 5-10-15-м сейсмическом изображении, нейронная сеть обрабатывает каждое изображение и точно следует геометрии



**Рис. 7.** Пример выделения разломов на пересчитанном кубе сеймики Байкальского месторождения и кубе когерентности.  
**Fig. 7.** Fault mapping on the recalculated seismic cube of the Baykalskoye field and coherence cube.



**Рис. 8.** Результат трассировки разломов после математического преобразования кубов разрывных нарушений, выявленных на кубах сейсмичности и когерентности.

**Fig. 8.** Result of fault tracing after mathematical transformation of the discontinuity cubes identified on the seismic and coherence cubes.

каждого разлома. Повышение скорости обработки нейронной сетью кубов сейсмических данных может быть достигнуто путем использования более мощных вычислительных процессоров с большим объемом графической памяти. Авторам удалось добиться сокращения времени расчета с 54 до 9 мин путем использования премиумных графических процессоров вместо стандартных.

## Выводы

В результате адаптации архитектуры сети U-net к решению задач трассировки поверхностей разломов на кубах сейсмических данных доказана способность нейросетей распознавать разломы. Несмотря на использование синтетических кубов для тренировки нейронной сети, она успешно справилась с задачей распознавания разломов на различных по качеству и условиям проведения геофизических исследований на кубах сейсмических данных.

Авторами выявлена проблема трассировки разломов нейросетью на сейсмических данных, полученных в результате геофизических работ на суше. Такие работы являются более сложными для проведения, чем на шельфе, из-за геоморфологии, транспортной доступности, исходные данные подвержены большому количеству техногенных и естественных помех, которые не всегда в полной мере удается удалить в результате последующей обработки.

Предложены пути решения проблемы: уменьшение диапазона амплитуд для повышения контраста изображения и использование кубов атрибутов, с последующими математическими преобразованиями кубов разломов.

Наличие дополнительных кубов расширяет диапазон возможностей интерпретатора, который может выбрать куб разломов, наиболее точно отражающий существующие дизъюнктивные нарушения, или провести дальнейшие преобразования, в зависимости от целей исследования.

## Список литературы

1. Pedersen S.I., Skov T., Randen T., Sønneland L. **2005.** Automatic fault extraction using artificial ants. In: Iske A., Randen T. (eds) *Mathematical methods and modelling in hydrocarbon exploration and production*. Springer, Berlin, Heidelberg, 107–116. (Mathematics in Industry, vol. 7). [https://doi.org/10.1007/3-540-26493-0\\_5](https://doi.org/10.1007/3-540-26493-0_5)
2. Celina C. Silva, Marcolino C.S., Lima F.D. **2005.** Automatic fault extraction using ant tracking algorithm in the Marlim South Field, Campos Basin. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, p. 857–860. <https://doi.org/10.1190/1.2148294>
3. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. **2015.** U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In: *International Conference on medical image computing and computer-assisted intervention*, p. 17–24. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1505.04597>
4. Wu X., Liang L., Shi Yu., Fomel S. **2019.** FaultSeg3D: Using synthetic data sets to train an end-to-end convolutional neural network for 3D seismic fault segmentation. *Geophysics*, 84(3): IM35–IM45 <https://doi.org/10.1190/geo2018-0646.1>
5. Ioffe S., Szegedy Ch. **2015.** Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. In: *Proceedings of the 32nd International Conference*

on *International Conference on Machine Learning*, 37: 448–456. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1502.03167>

*Kerry-3D*. URL: [https://wiki.seg.org/wiki/Open\\_data#F3\\_Netherlands](https://wiki.seg.org/wiki/Open_data#F3_Netherlands) (дата обращения 04.11.2022).

7. Кирилова А.С., Закревский К.Е. **2014**. *Практикум по сейсмической интерпретации в Petrel*. М.: МАИ-ПРИНТ, 288 с. URL: <http://www.petroportal.ru/biblioteka> (дата обращения 04.11.2022).
8. Gersztenkorn A., Marfurt K.J. **1999**. Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping. *Geophysics*, 64(5): 1468–1479. <https://doi.org/10.1190/1.1444651>
9. Дружинин В.С., Начапкин Н.И., Осипов В.Ю. **2018**. Выделение и картирование глубинных разломов по сейсмическим данным и их проявление в геофизических полях. *Известия УГГУ*, 3(51): 47–53. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-3-47-53>

## References

1. Pedersen S.I., Skov T., Randen T., Sønneland L. **2005**. Automatic fault extraction using artificial ants. In: Iske A., Randen T. (eds) *Mathematical methods and modelling in hydrocarbon exploration and production*. Springer, Berlin, Heidelberg, 107–116. (Mathematics in Industry, vol. 7). [https://doi.org/10.1007/3-540-26493-0\\_5](https://doi.org/10.1007/3-540-26493-0_5)
2. Celina C. Silva, Marcolino C.S., Lima F.D. **2005**. Automatic fault extraction using ant tracking algorithm in the Marlim South Field, Campos Basin. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, p. 857–860. <https://doi.org/10.1190/1.2148294>

## Об авторах

**Русинович Виктор Викторович** (<https://orcid.org/0000-0001-5927-6501>), аспирант, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, [victor.rusinovich@gmail.com](mailto:victor.rusinovich@gmail.com)

**Русинович Лариса Эдуардовна** (<https://orcid.org/0000-0003-4146-8868>), аспирантка, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, [larisarusinovich@gmail.com](mailto:larisarusinovich@gmail.com)

Поступила 13.01.2023

После доработки 22.02.2023

Принята к публикации 01.03.2023

3. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. **2015**. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In: *International Conference on medical image computing and computer-assisted intervention*, p. 17–24. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1505.04597>
4. Wu X., Liang L., Shi Yu., Fomel S. **2019**. FaultSeg3D: Using synthetic data sets to train an end-to-end convolutional neural network for 3D seismic fault segmentation. *Geophysics*, 84(3): IM35–IM45 <https://doi.org/10.1190/geo2018-0646.1>
5. Ioffe S., Szegedy Ch. **2015**. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. In: *Proceedings of the 32nd International Conference on International Conference on Machine Learning*, 37: 448–456. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1502.03167>
6. *Kerry-3D*. URL: [https://wiki.seg.org/wiki/Open\\_data#F3\\_Netherlands](https://wiki.seg.org/wiki/Open_data#F3_Netherlands) (дата обращения 04.11.2022).
7. Kirilova A.S., Zakrevskiy K.E. **2014**. *Workshop of seismic interpretation in Petrel*. Moscow: MAI-PRINT, 288 p. (In Russ). URL: <http://www.petroportal.ru/biblioteka> (accessed 04.11.2022).
8. Gersztenkorn A., Marfurt K.J. **1999**. Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping. *Geophysics*, 64(5): 1468–1479. <https://doi.org/10.1190/1.1444651>
9. Druzhinin V.S., Nachapkin N.I., Osipov V.Yu. **2018**. Identification and mapping of deep faults based on seismic data and their display in geophysical fields. *Izvestiya UGGU = News of the Ural State Mining University*, 3(51): 47–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-3-47-53>

## About the Authors

**Rusinovich, Viktor V.** (<https://orcid.org/0000-0001-5927-6501>), Postgraduate Student, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, [victor.rusinovich@gmail.com](mailto:victor.rusinovich@gmail.com)

**Rusinovich, Larisa E.** (<https://orcid.org/0000-0003-4146-8868>), Postgraduate Student, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, [larisarusinovich@gmail.com](mailto:larisarusinovich@gmail.com)

Received 13 January 2023

Revised 22 February 2023

Accepted 1 March 2023

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



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

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 577.118:543.421:597.2/5:639.518(265.53)

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.1.095-102>  
<https://www.elibrary.ru/zldbka>

## Содержание микроэлементов в мышечной ткани некоторых видов гидробионтов из охотоморских вод северо-восточного Сахалина

Ю. Н. Полтев\*, Т. Г. Коренева, В. Е. Марыжихин, И. В. Сырбу

\*E-mail: [y.poltev@sakhniro.ru](mailto:y.poltev@sakhniro.ru)

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

**Резюме.** Проведена оценка содержания Fe, As, Cu, Mn, Cr, Ni, Pb и Cd в мышцах некоторых видов гидробионтов из охотоморских вод северо-восточного Сахалина: минтая (*Gadus chalcogrammus* Pallas, 1814), камбалы хоботной (*Limanda proboscidea* Gilbert, 1896) и камбалы северной палтусовидной (*Hippoglossoides robustus* Gill & Townsend, 1897), краба-стригуна опилио (*Chionoecetes opilio* (O.Fabricius, 1788)). У краба-стригуна, в отличие от рыб, достоверно выше концентрации Fe и Cu, а у рыб относительно краба-стригуна – Pb. С камбалами у краба-стригуна по содержанию микроэлементов различий не выявлено, а по отношению к минтаю у него достоверно выше концентрации Fe, Cu и Hg и ниже – Pb. У камбал же по сравнению с минтаем выше содержание Fe. Концентрации Pb, Cd, As и Hg являются безопасными по гигиеническим требованиям к пищевым продуктам и могут косвенно указывать на благоприятную экологическую обстановку по содержанию нормируемых токсичных элементов в водах северо-восточного Сахалина.

**Ключевые слова:** микроэлементы, атомная абсорбция, гидробионты, мышцы, Охотское море

## The content of trace elements in the muscle tissue of some species of aquatic organisms from the Sea of Okhotsk waters of Northeastern Sakhalin

Yury N. Poltev\*, Tatyana G. Koreneva, Vsevolod E. Maryzhikhin, Irina V. Syrbu

\*E-mail: [y.poltev@sakhniro.ru](mailto:y.poltev@sakhniro.ru)

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

**Abstract.** The content of Fe, As, Cu, Mn, Cr, Ni, Pb and Cd in the muscles of some aquatic organism species from the Sea of Okhotsk waters of Northeastern Sakhalin was estimated: walleye pollack (*Gadus chalcogrammus* Pallas, 1814), longhead dab (*Limanda proboscidea* Gilbert, 1896) and Bering flounder (*Hippoglossoides robustus* Gill & Townsend, 1897), snow crab (*Chionoecetes opilio* (O.Fabricius, 1788)). The concentrations of Fe and Cu are reliably higher in the snow crab, in contrast to fish, and Pb concentration is higher in fish relative to the snow crab. There was no difference in the content of trace elements between the flounders and snow crab, and in relation to the walleye pollock, the snow crab has reliably higher concentrations of Fe, Cu, and Hg and lower ones of Pb. The content of Fe is higher in the flounders compared to the walleye pollack. The concentrations of Pb, Cd, As and Hg are safe according to the hygienic requirements for food products and may indirectly indicate a favorable environmental situation in terms of the content of regulated toxic elements in the waters of northeastern Sakhalin

**Keywords:** trace elements, atomic absorption, aquatic organisms, muscles, Sea of Okhotsk

**Для цитирования:** Полтев Ю.Н., Коренева Т.Г., Марыжихин В.Е., Сырбу И.В. Содержание микроэлементов в мышечной ткани некоторых видов гидробионтов из охотоморских вод северо-восточного Сахалина. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 1, с. 95–102. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.1.095-102>; <https://www.elibrary.ru/zldbka>

**For citation:** Poltev Yu.N., Koreneva T.G., Maryzhikhin V.E., Syrbu I.V. The content of trace elements in the muscle tissue of some species of aquatic organisms from the Sea of Okhotsk waters of Northeastern Sakhalin. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 1, pp. 95–102. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.1.095-102>; <https://www.elibrary.ru/zldbka>

## Благодарности

Авторы благодарят уважаемых рецензентов за конструктивные замечания, способствующие улучшению данной публикации и полезные для дальнейшей работы.

## Введение

Северо-восточный шельф о. Сахалин – традиционный район промысла целого ряда объектов, таких как минтай *Gadus chalcogrammus*, брюхоногие моллюски Gastropoda, гренландская креветка *Lebbeus groenlandicus*, колючий краб *Paralithodes brevipes* и краб-стригун опилио *Chionoecetes opilio*. Кроме них объектами промышленного и любительского лова являются и другие виды, пользующиеся на рынке спросом. Вопросы безопасности гидробионтов, используемых человеком в пищу, в частности относительно содержания токсичных элементов, являются актуальными, так как имеющиеся данные по этому району ограничиваются сведениями по южной дальневосточной широколобке *Megalocottus platycephalus taeniopterus*, дальневосточной наваге *Eleginus gracilis* и звездчатой камбале *Platichthys stellatus* Ныйского залива [1, 2, 3]. Впервые полученные нами данные по содержанию микроэлементов в отдельных видах можно использовать в дальнейших мониторинговых исследованиях.

Цель представленной работы – определить уровни содержания микроэлементов в мышечной ткани исследованных промысловых гидробионтов, а также дать санитарно-гигиеническую оценку их качества относительно содержания нормируемых токсичных элементов.

## Материалы и методы

Материалом для настоящего исследования служила мышечная ткань гидробионтов, отловленных в ходе научной съемки на НИС «Дмитрий Песков» в июне 2020 г. в охотоморских водах северо-восточного Сахалина (см. рисунок). Орудием лова был донный трал. У камбалы хоботной *Limanda proboscidea* Gilbert, 1896 отобрали две пробы мышечной ткани (1 от одной особи, самца, и объединенную по трем самкам), камбалы северной палтусовидной *Hippoglossoides robustus* Gill &

## Acknowledgments

Authors thanks the respected Reviewers for the constructive comments allowed to improve the text of this article.

Townsend, 1897 – одну пробу (объединенную по четырем особям, самкам), минтая *Gadus chalcogrammus* Pallas, 1814 – четыре пробы (1 от одной особи, 1 объединенную от трех самок, 2 объединенные от четырех особей (4 самцов и 4 самок), краба-стригуна опилио *Chionoecetes opilio* (O.Fabricius, 1788) – две (по одной особи из двух разных уловов в данном районе, самцы). Длину рыб, *FL*, измеряли по Смиту (от вершины рыла до конца средних лучей хвостового плавника). У краба-стригуна опилио мышечную ткань отбирали из фаланг ходильных ног, у рыб – из участка, расположенного у основания спинного плавника. Ткани отбирали и измельчали при помощи керамического ножа. В случае объединенных проб равные доли измельченных тканей от отдельных особей гомогенизировали с использованием фарфоровых ступки и пестика до однородной массы. До отбора тканей гидробионты хранили в морозильной камере при температуре –20 °C.

Для минерализации из проб отбирали навеску массой 1 г с точностью до 0.01 г. Для определения Hg в тканях использовали «закрытый» способ разложения навесок смесью кислот (серной и азотной) и перманганата калия\*. Для определения Fe, Pb, Cd, Cu, Cr, Mn, Ni и As применяли способ «мокрой» минерализации навесок в микроволновой печи [4]. Концентрации Pb, Cd, Cu, Cr, Mn, Ni и As измеряли атомно-абсорбционным методом в режиме электротермической атомизации (GFAA) на спектрофотометре Shimadzu AA-6800 с графитовой печью и коррекцией фона на основе эффекта Зеемана. Концентрации Fe измеряли этим же методом, но в пламенном режиме с дейтериевой коррекцией фона (FLAA). Содержание Hg определяли методом «холодного пара» (CVAA) с использованием приставки MVU-1A к спектрофотометру AA-6800. Точность измерений составила для Fe и Hg 20 %, Pb и Cu 25 %, Cd 26 %, As и Mn 32 %, Cr 34 %, Ni 36 %. Для градуировки спектрофотометра

\* МУК 4.1.1472-03. Атомно-абсорбционное определение массовой концентрации ртути в биоматериалах животного и растительного происхождения (пищевых продуктах, кормах и др.). 2003. Доступ из ИИС «Техэксперт». <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293830/4293830517.htm> (дата обращения 04.06.2022). [МУК 4.1.1472-03. Atomic absorption determination of mass concentration of mercury in animal and plant origin biomaterials (alimentary products, feed, etc.). Available from IRS Techexpert. <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293830/4293830517.htm> (accessed 04.06.2022). (In Russ.)]

и контроля точности результатов измерений применяли стандартные образцы утвержденного типа – ГСО 7330-96 состава раствора ионов металлов (Fe, Cd, Mn, Cu, Ni и Pb), ГСО 7264-96 состава раствора ионов As(III), ГСО 7781-2000 состава раствора ионов Cr(VI), ГСО 8004-93 состава водного раствора ионов Hg. Оперативный контроль результатов измерений проводили для каждой партии проб, сравнивая результаты измерений разделенной на две части контрольной пробы гидробионтов с нормативом промежуточной прецизионности. Контроль правильности измерений осуществляли с использованием рабочих проб,

в которые введены известные добавки элементов, при внедрении методик и оценивании характеристик погрешности и их составляющих. Пробоподготовку и анализ контрольных проб проводили параллельно с пробоподготовкой и анализом реальных проб.

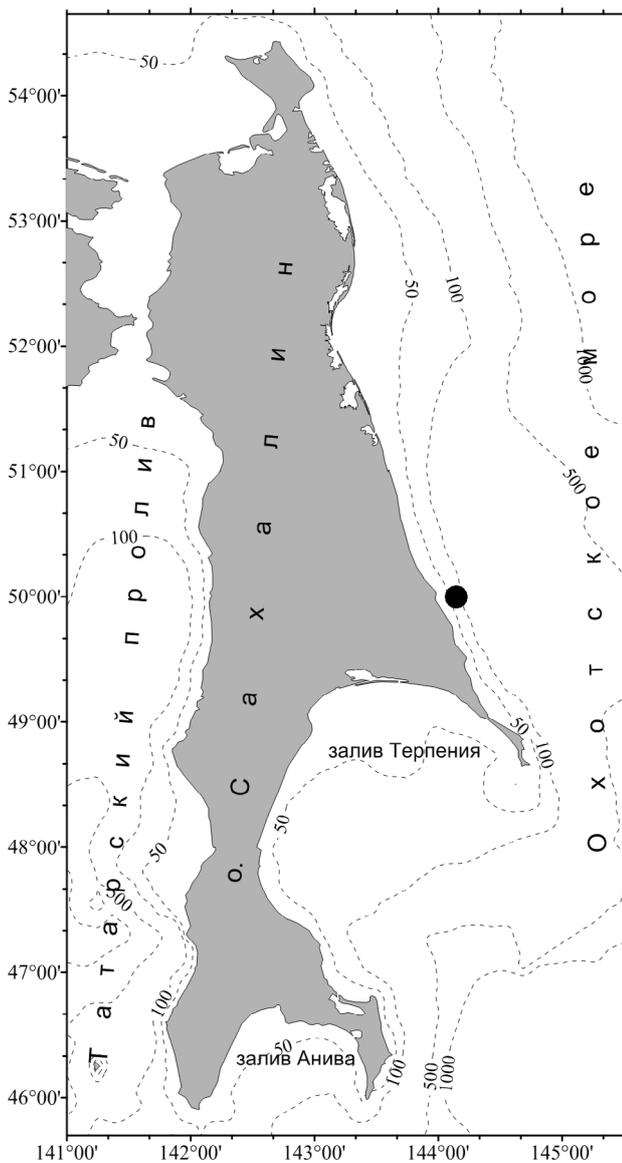
Достоверность сравниваемых различий оценивали по t-критерию Стьюдента ( $P < 0.05$ ) с использованием пакета прикладных программ Excel.

## Результаты и обсуждение

**Камбала хоботная.** Нами исследованы самец  $FL = 17.4$  см и массой 189 г и самки  $FL = 22.7–27.3$  см ( $25.3 \pm 1.4$  см) и массой 134–203 г ( $175 \pm 21$  г). Все рыбы были отнерстившиеся. Возраст рыб не определяли. Согласно литературным источникам [5], массовое созревание вида наблюдается у самцов с  $FL = 18.7–19.7$  см, в возрасте 3.4–4.6 лет, а у самок с  $FL = 23.5–26.8$  см, в возрасте 4.8–6.9 лет. Концентрации микроэлементов в мышечной ткани самца и самок были сопоставимы. Их максимальные значения приходятся на Fe (6.5 и 5.8 мг/кг сыр. массы у самца и самок соответственно), минимальные – на Pb (по 0.1 мг/кг сыр. массы) (табл. 1). Ранее содержание микроэлементов в данном виде камбал не исследовалось.

**Камбала северная палтусовидная.** Массовое созревание вида происходит у самцов с  $FL = 15.5–20$  см, в возрасте 3.4 года, у самок с  $FL = 20–24.4$  см, в возрасте 6.3 года [5].  $FL$  исследованных нами 4 неполовозрелых самок варьировала в пределах 21.5–27.0 см ( $22.9 \pm 1.3$ ), масса тела – 86–143 г ( $103 \pm 13$ ). Максимальные значения концентраций, как и у камбалы хоботной, отмечены для Fe, минимальные – для Pb (3.8 и 0.004 мг/кг сыр. массы соответственно). Содержание микроэлементов в камбале северной палтусовидной ранее не исследовалось.

**Минтай.** Средняя  $FL$  и масса самцов в траловых уловах у северо-восточного Сахалина составляют 37.5 см и 451.3 г, самок – 44.5 см и 721.9 г соответственно. Массовое созревание минтая в районе происходит при достижении возраста 4–5 лет ( $FL 34.7–39$  см, масса 284–402 г) (по сообщению старшего специалиста «СахНИРО» А.В. Лученкова).  $FL$  исследованных особей варьировала в пределах 21–48 см ( $30.4 \pm 2.6$ ), масса тела – от 56



Участок отбора гидробионтов в водах северо-восточного Сахалина.

Aquatic organism sampling area in the waters of Northeastern Sakhalin.

до 684 г ( $220 \pm 61$ ). Семь особей были неполовозрелые, четыре – отнерестившиеся. *FL* неполовозрелых особей составила 21–27.5 см, половозрелых – 33–48 см. Наиболее высокое содержание отмечено для Fe ( $2.3 \pm 1.0$  мг/кг сыр. массы), наиболее низкое – для Cd ( $0.005 \pm 0.004$  мг/кг сыр. массы). Достоверных различий по содержанию микроэлементов между половозрелыми и неполовозрелыми особями, различающимися длиной тела, не выявлено. Возможно, это связано с тем, что анализируемые половозрелые особи еще не достигли возраста активного накопления микроэлементов. Как показали исследования в Куйбышевском водохранилище, активное накопление Cu, Cr, Pb у леща (*Abramis brama*), плотвы (*Rutilus rutilus*) и синца (*A. ballerus*) наблюдается в возрасте 7–8 лет, судака (*Sander lucioperca*) – 4–5 лет [7].

Концентрации микроэлементов у неполовозрелых самцов и самок были сопоставимы, что может быть объяснено в частности тем, что до наступления половозрелости физиологические процессы у них проходят одинаково. Хотя даже и для половозрелых рыб исследованиями показывается различная зависимость накопления металлов в их органах и тканях от половой принадлежности. Так, в Куйбышевском водохранилище у самок леща было выше, чем у самцов, содержание Fe и Cu, у синца – Cr, у плотвы – Pb, у судака гендерных различий установлено не было [7].

Ранее данные по содержанию микроэлементов в минтае получены для Японского (зал. Петра Великого) [8, 9] и Охотского (Западная Камчатка) [10] морей, североамериканских вод [11]. Содержания тяжелых металлов в рыбах Тихого океана приведены в [12]. Как показано в табл. 3, минтай северо-восточного Сахалина отличается на порядок меньшими значениями концентраций As в мышечной ткани относительно западно-камчатских вод и Pb – относительно североамериканских и западно-камчатских. Длины исследованных особей минтая из западно-камчатских вод (40–44 см) и половозрелых самцов рассматриваемого района сопоставимы, и различное содержание в их мышцах As не связано с размерами (возрастом). На примере лососей показана связь повышенного содержания Pb в их тканях с нагулом в курило-камчатских водах, богатых биогенной взвесью с высоким содержанием Pb<sup>взв</sup> [13]. Западно-камчатский минтай, нагуливаю-

щийся в этом районе, отличается от восточно-сахалинского более высокими концентрациями Pb. Таким образом, низкое содержание в мышцах минтая Pb может быть обусловлено тем, что восточно-сахалинский шельф менее насыщен биогенной взвесью с высоким содержанием Pb<sup>взв</sup>.

**Краб-стригун опилио.** В траловых уловах отмечаются самцы с шириной карапакса от 15 до 140 мм (83.4 мм), массой тела – от 1.2 до 1033 г (278.9 г). Исследованы два самца из разных уловов с шириной карапакса 81 и 75 мм. Они характеризовались сопоставимыми содержаниями микроэлементов, а ряды их концентраций по убыванию различались лишь положением Ni и Mn. Это, по нашему мнению, обусловлено схожими размерами особей и условиями обитания (глубины 50 и 20 м). Максимальные концентрации, как и у рыб, пришлось на Fe, минимальные – на Pb. В других исследованных районах максимальные концентрации отмечались также и для As, а минимальные – для Cd. В мышцах краба-стригуна опилио рассматриваемого района на порядок ниже содержание Pb относительно вод Баренцева моря [16] и восточного побережья п-ова Корея [15], Cu – по сравнению с российскими водами Японского моря [14] и водами восточного побережья п-ова Корея, As – водами восточного побережья п-ова Корея (табл. 1, 2). Отмеченные различия могут быть связаны и с геохимическими особенностями районов обитания крабов-стригунов, и с их питанием. Известно, что поступление микроэлементов с пищей является основным источником их накопления в организме для многих водных беспозвоночных [17, 18].

Сравнение концентраций исследованных особей гидробионтов показывает, что у краба-стригуна, в отличие от рыб, достоверно выше концентрации Fe и Cu, а у рыб относительно краба-стригуна – Pb. При этом с камбалами у крабов-стригунов по содержанию микроэлементов различий не выявлено, а по отношению к минтаю у них достоверно выше концентрации Fe, Cu и Hg и ниже – Pb. У камбал же по сравнению с минтаем выше содержание Fe. Ранее более высокое содержание As и Cu в мышцах краба-стригуна опилио относительно минтая и камбалы желтоперой *Limanda aspera* [8], а у камбал – относительно минтая [8, 9] было отмечено для Японского

**Таблица 1.** Средние концентрации микроэлементов в мышечной ткани рыб из вод северо-восточного Сахалина и, для сравнения, некоторых других районов обитания  
**Table 1.** Average concentrations of trace elements in the muscle tissue of fishes from the waters of Northeastern Sakhalin and, for comparison, some other habitats

Вид (количество проб)	Микроэлементы, мг/кг сыр. массы									
	Fe	As	Cu	Mn	Cr	Ni	Pb	Hg	Cd	
Камбала хоботная <i>Limanda proboscidea</i> (2)	6.1 5.8–6.5	0.56 0.55–0.57	0.27 0.21–0.32	0.20 0.15–0.24	0.16 0.14–0.18	0.09 0.08–0.10	0.01 0.01	0.041 0.039–0.043	0.013 0.010–0.015	
Камбала палтусовидная северная <i>Hippoglossoides robustus</i> (1)	3.8	1.64	0.37	0.59	0.18	0.26	0.004	0.017	0.021	
Минтай <i>Gadus chalcogrammus</i> из разных регионов: северо-восток Сахалина (4)	2.3±1.0 1.2–3.2	0.28±0.02 0.25–0.29	0.27±0.07 0.18–0.35	0.27±0.17 0.08–0.45	0.16±0.00 0.16–0.16	0.14±0.03 0.11–0.18	0.01±0.01 0.00–0.02	0.017±0.005 0.012–0.023	0.005±0.004 0.002–0.008	
Зал. Петра Великого [8, 9]	–	0.60±0.06	0.08±0.01	–	–	–	0.02±0.01	0.030±0.006	0.001±0.000	
Западная Камчатка, Охотское море [10]	6.1	2.39	0.69	0.21	0.08	0.12	0.087	0.066	0.012	
Тихий океан [12]	1.1±0.2	–	0.29±0.04	0.27±0.07	–	–	–	–	–	
Североамериканские воды [11]	–	1.22±0.28	0.25±0.13	–	0.11±0.04	0.07±0.04	0.22±0.17	0.009±0.003	0.020±0.001	

*Примечания.* Верхняя строка – средняя ± стандартное отклонение, нижняя – минимум–максимум. Прочерк – нет данных.  
*Notes.* The top line – mean ± standard deviation, the bottom line – minimum–maximum. Dash – the data is absent.

**Таблица 2.** Концентрации микроэлементов (мг/кг сыр. массы) в мышечной ткани краба-стригуна опилию из различных районов обитания  
**Table 2.** Concentrations of trace elements (mg/kg wet weight) in the muscle tissue of the *Chionoecetes opilio* from different habitats

Район	Микроэлементы, мг/кг сыр. массы							
	Fe	As	Cu	Hg	Cd	Pb		
Северо-восток Сахалина	6.7 5.6–6.9	2.46 2.03–2.89	0.45 0.43–0.47	0.040 0.036–0.044	0.023 0.011–0.036	0.003 0.002–0.004		
Российская зона Японского моря [14]	5.7 3.6–8.7	4.3 4.1–5.5	3.7 3.6–3.8	0.016 0.01–0.02	0.01 0.01–0.01	0.02 0.02–0.03		
Восточное побережье п-ова Корея [15]	5.7 4.8–7.6	10.1 9.4–14.0	4.9 3.1–6.7	0.03 0.01–0.05	0.03 0.01–0.05	0.03 0.01–0.05		
Баренцево море [16]	2.1±1.2 0.3–4.4	18.7±18.3 2.7–78.2	4.6±2.4 0.9–9.2	0.09±0.10 0.025–0.421	0.09±0.08 0.009–0.265	0.02±0.02 ND–0.062		
	5.1±1.7 3.1–7.3	5.4±0.7 3.94–6.15	4.0±0.4 3.51–4.63	0.07±0.03 0.03–0.11	0.04±0.02 0.02–0.06	0.06±0.03 0.03–0.13		

моря. В целом для беспозвоночных характерны более высокие концентрации Fe, Mn и Cu [19] относительно рыб, а для донных видов рыб – Cd и Cu относительно пелагических видов [20]. Представляется, что такое распределение элементов частично связано с особенностями систематических групп. Так, высокие концентрации меди у ракообразных определяются ее важной ролью в процессах тканевого дыхания – переноса кислорода в составе пигмента крови гемоцианина (аналога гемоглобина) в условиях пониженного содержания кислорода на участках обитания [14].

В мышечной ткани исследованных гидробионтов количественно преобладают биофильные (Fe, Cu, Mn) и условно биофильные (As) микроэлементы. Из них Fe не только характеризуется наиболее высоким содержанием в гидробионтах, но и преобладает в донных отложениях. Согласно проведенным исследованиям, в донных отложениях шельфа северо-восточного Сахалина содержание элементов (мкг/г сухого веса грунта) снижается в порядке Fe (2567) > Cr (4.72) > As (2.69) > Pb (2.03) > Cu (0.92) > Cd (0.018) > Hg (0.005) [6]. Такие микроэлементы, как Pb, Hg и Cd, считаются трассерами техногенного воздействия на окружающую среду [21]. В донных отложениях исследуемого региона минимальные концентрации приходятся на Hg и Cd, а в гидробионтах – на Pb. В целом полученные данные согласуются с общей закономерностью для основных экологических групп биотического населения морских регионов, согласно которой среди микроэлементов группы металлов доминирует Fe, а Cd и Hg присутствуют в минимальных концентрациях [22].

В мышцах рыб предельно допустимое содержание нормируемых токсичных элементов составляет: для Pb – 1.0; Cd – 0.2; As – 5; Hg – 0.2 мкг/г сыр. массы\*. Согласно полученным данным, концентрации этих элементов в мышцах минтая рассматриваемого района, как и в водах зал. Петра Великого [8, 9] и Охотского моря [10], ниже допустимых уровней.

В мышцах исследуемых образцов северной палтусовидной и хоботной камбал превышения допустимых уровней нормируемых токсичных элементов нами также не отмечено. В мышцах обоих видов отмечается наибольшее содержание As (1.64 мкг/кг сыр. массы у северной пал-

тусовидной и 0.55 – у хоботной) и наименьшее – Pb (0.004 мкг/кг сыр. массы у северной палтусовидной и 0.0084 – у хоботной). Не выявлено превышения нормируемых токсичных элементов и у других видов камбал Охотского и Японского морей – колючей из зал. Петра Великого, остроголовой и сахалинской из Охотского моря, желтоперой из Японского моря [9]. Исключением является полосатая камбала из Японского моря, у которой было отмечено превышение As (7.7–14.0 мкг/кг сыр. массы) [23].

Для ракообразных предельно допустимые уровни токсичных элементов составляют: для Pb – 10; Cd – 2; As – 5; Hg – 0.2 мкг/г сыр. массы\*. В мышцах краба-стригуна опилио рассматриваемого района они были ниже этих уровней. В мышцах же данного вида крабов из вод Баренцева моря [16], восточного побережья п-ова Корея [15] и российских вод Японского моря [14] содержание As превышает нормативные концентрации.

## Выводы

Таким образом, определены массовые концентрации микроэлементов в мышечной ткани минтая (*Gadus chalcogrammus Pallas*, 1814), камбалы хоботной (*Limanda proboscidea Gilbert*, 1896) и камбалы северной палтусовидной (*Hippoglossoides robustus Gill&Townsend*, 1897), краба-стригуна опилио (*Chionoecetes opilio* (O.Fabricius, 1788)) из охотоморских вод северо-восточного Сахалина. Выявлено, что у краба-стригуна по сравнению с рыбами достоверно выше концентрации Fe и Cu, а у рыб относительно краба-стригуна – Pb. С камбалами у краба-стригуна по содержанию микроэлементов различий не отмечено, а по отношению к минтаю у него достоверно выше концентрации Fe, Cu и Hg и ниже – Pb. У камбал же по сравнению с минтаем выше содержание Fe. Содержание токсичных элементов (Pb, Cd, As и Hg) в исследованных видах ниже регламентируемых уровней и является безопасным по гигиеническим требованиям к пищевым продуктам. Полученные данные косвенно указывают на благоприятную экологическую обстановку по содержанию нормируемых токсичных элементов в водах северо-восточного Сахалина.

\* СанПиН 2.3.2.1078-01. 2002. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. М.: Госкомсанэпиднадзор, 156 с. [SanPiN 2.3.2.1078-01. 2002. Hygienic requirements to safety and nutritive value of food products. Moscow: Goskomsanepidnadzor, 156 p.]

## Список литературы

- Латковская Е.М., Лебедев А.Е., Саматов А.Д. **2000**. Содержание тяжелых металлов в печени донных рыб Ныйского залива (северо-восточный Сахалин). В кн.: *Охрана водных биоресурсов в условиях интенсивного освоения нефтегазовых месторождений на шельфе и внутренних водных объектах Российской Федерации*: сб. материалов междунар. семинара. М., с. 89–90.
- Латковская Е.М. **2000**. Металлы в тканях звездчатой камбалы *Pleuronectes stellatus* из Ныйского залива (северо-восток Сахалина). *Биология моря*, 26(4): 281–283.
- Латковская Е.М. **2000**. *Химико-экологическая оценка заливов северо-востока Сахалина: хлорорганические пестициды и тяжелые металлы*: дис. ... канд. биол. наук. Сахалинский НИИ рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО), Южно-Сахалинск, 166 с.
- Методика количественного химического анализа*. **2009**. Определение As, Pb, Cd, Sn, Cr, Cu, Fe, Mn и Ni в пробах пищевых продуктов и пищевого сырья атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией. № М-02-1009-08. Аттест. ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. Свид-во № 242/43-09 от 08.07.2009. ООО «Аналит», 21 с.
- Дьяков Ю.П. **2015**. Половое созревание дальневосточных камбалообразных рыб (Pleuronectiformes). *Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана*, 39: 5–69. doi:10.15853/2072-8212.2015.39.5-69
- Лишавская Т.С., Мощенко А.В. **2008**. Некоторые металлы в донных отложениях прибрежных акваторий острова Сахалин. *Известия ТИНРО*, 153: 295–311.
- Ваганов А.С. **2012**. *Накопление тяжелых металлов тканями и органами промысловых видов рыб различных экологических групп Куйбышевского водохранилища*: автореф. дис. ... канд. биол. наук (Ульяновский государственный технический университет). Нижний Новгород, 23 с.
- Ковековдова Л.Т., Кику Д.П., Касьяненко И.С. **2014**. Особенности накопления металлов и мышьяка морскими промысловыми гидробионтами дальневосточных морей. В кн.: *Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы*: материалы V Всерос. конф. по водной экотоксикологии, посвящ. памяти Б.А. Флерова, с приглашением специалистов из стран ближнего зарубежья; *Современные методы исследования состояния поверхностных вод в условиях антропогенной нагрузки*: материалы школы-семинара для молодых ученых, аспирантов и студентов (Борок, 28 окт. – 1 ноября 2014 г.). Ярославль: Филигрань, т. 1: 16–18.
- Ковековдова Л.Т., Кику Д.П., Касьяненко И.С. **2015**. Мониторинг содержания металлов и мышьяка в промысловых рыбах и морской воде дальневосточных морей. *Рыбное хозяйство*, 2: 18–24.
- Ковековдова Л.Т., Симоконов М.В. **2020**. Содержание химических элементов в органах трех видов морских рыб. *Национальная ассоциация ученых (НАУ)*, 58: 4–8.
- Ikem A., Garth J. **2022**. Dietary exposure assessment of selected trace elements in eleven commercial fish species from the Missouri market. *Heliyon*, 8: e10458.
- Łuczynska J., Pietrzak-Fiećko R., Purkiewicz A., Łuczynski M.J. **2022**. Assessment of fish quality based on the content of heavy metals. *International J. of Environmental Research Public Health*, 19: 2307. https://doi.org/10.3390/ijerph19042307
- Христофорова Н.К., Цыганков В.Ю., Боярова М.Д., Лукьянова О.Н. **2015**. Содержание микроэлементов в тихоокеанских и атлантических лососях. *Океанология*, 55(5): 751–758. doi:10.7868/S0030157415050068
- Наревич И.С., Ковековдова Л.Т. **2017**. Микроэлементы (As, Cd, Pb, Fe, Cu, Zn, Se, Hg) в промысловых ракообразных Японского моря. *Известия ТИНРО*, 189: 147–155.
- Hwang D.-W., Choi M., Lee I.-S., Shim K.-B., Kim T.-H. **2017**. Concentrations of trace metals in tissues of Chionoecetes crabs (*Chionoecetes japonicus* and *Chionoecetes opilio*) caught from the East/Japan Sea waters and potential risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(12): 11309–11318. https://doi.org/10.1007/s11356-017-8769-z
- Лаптева А.М., Плотицына Н.Ф. **2019**. Микроэлементы в крабе *Chionoecetes opilio* Баренцева моря. *Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование*: материалы X Национальной (всерос.) науч.-практ. конф. (19–21 марта 2019 г.). Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, с. 35–39.
- Rainbow P.S. **2007**. Trace metal bioaccumulation: Models, metabolic availability and toxicity. *Environment International*, 33(4): 576–582. https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.05.007
- Wang W.X. **2002**. Interactions of trace metals and different marine food chains. *Marine Ecology Progress Series*, 243: 295–309. https://doi.org/10.3354/meps243295
- Виноградов А.П. **2001**. *Химический элементарный состав организмов моря*. М.: Наука, 620 с.
- Amankwaa G., Lu Y., Liu T., Wang N., Luan Y., Cao Y., Huang W., Ni X., Gyimah E. **2021**. Heavy metals concentration profile of an aquatic environment and health implications of human exposure to fish and prawn species from an urban river (Densu). *Iranian J. of Fisheries Sciences*, 20(2): 529–546. doi: 10.22092/ijfs.2021.351023.0
- Христофорова Н.К. **1989**. *Биоиндикация и мониторинг загрязнения морских вод тяжелыми металлами*. Л.: Наука, 192 с.
- Морозов Н.П., Патин С.А., Петухов С.А. **1978**. Основные черты биогеохимии микроэлементов группы металлов в экосистемах океанов и морей. *Труды ВНИРО*, 134: 23–35.
- Ковековдова Л.Т., Симоконов М.В., Кику Д.П. **2006**. Токсичные элементы в промысловых гидробионтах прибрежных акваторий северо-западной части Японского моря. *Вопросы рыболовства*, 7(25): 185–190.

## References

- Latkovskaya E.M., Lebedev A.E., Samatov A.D. **2000**. [Heavy metal content in liver of the fishes in the Nyiskii Bay (northeastern Sakhalin)]. In: [Protection of aquatic bioresources under the conditions of intensive development of oil and gas deposits on the shelf and inland water bodies of the Russian Federation]: Sbornik materialov Mezhdunarodnogo seminar. Moscow, p. 89–90. (In Russ.).
- Latkovskaya E.M. **2000**. Metals in the tissues of the starry flounder *Pleuronectes stellatus* from Nyisky Bay (north-east of Sakhalin). *Russian J. of Marine Biology*, 26(4): 292–295. (In Russ.). doi:10.1007/BF02759512
- Latkovskaya Ye.M. **2000**. [Chemical and ecological assessment of the bays of north-east of Sakhalin: organochlorine pesticides and heavy metals]: thesis. ... Cand. Sci. (Biology). Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk, 166 p. (In Russ.).
- Method of quantitative chemical analysis*. **2009**. Determination of As, Pb, Cd, Sn, Cr, Cu, Fe, Mn and Ni in the samples of food products and food raw materials by atomic absorption method with electrothermal atomization no. M-02-1009-08. Certified by the D.I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology (VNIIM). Certification no. 242/43-09 from 08.07.2009. Analit Ltd., 21 p. (In Russ.).
- D'yakov Yu.P. **2015**. Maturation of Far Eastern flounders (*Pleuronectiformes*). *Issledovaniya vodnykh biologicheskikh*

- resursov Kamchatki i severo-zapadnoy chasti Tikhogo okeana*, 39: 5–69. (In Russ., abstr. in Engl.). doi:10.15853/2072-8212.2015.39.5-69
6. Lishavskaya T.S., Moshchenko A.V. **2008**. Metals in bottom sediments at the coast of Sakhalin Island. *Izvestiya TINRO*, 153: 295–311. (In Russ.).
  7. Vaganov A.S. **2012**. [Accumulation of heavy metals by tissues and organs of commercial fish species of various ecological groups in the Kuibyshev reservoir]: extended abstract... Cand. Sci. (Biology). Ul'yanovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, Nizhniy Novgorod, 23 p. (In Russ.).
  8. Kovekovdova L.T., Kiku D.P., Kas'yanenko I.S. **2014**. [Features of metal and arsenic accumulation by marine commercial aquatic organisms of the Far East seas]. In: *Antropogennoye vliyaniye na vodnyye organizmy i ekosistemy [Anthropogenic effect on aquatic organisms and ecosystems]: materialy V Vseros. konf. po vodnoy ekotoksikologii, posvyashch. pamyati B.A. Flerova, s priglazheniyem spetsialistov iz stran blizhnego zarubezh'ya; Sovremennyye metody issledovaniya sostoyaniya poverkhnostnykh vod v usloviyakh antropogennoy nagruzki [Modern research methods of surface water state under the conditions of anthropogenic impact]: materialy shkoly-seminara dlya molodykh uchenykh, aspirantov i studentov (Borok, 28 October – 1 November, 2014). Yaroslavl': Filigran', vol. 1: 16–18. (In Russ.).*
  9. Kovekovdova L.T., Kiku D.P., Kasyanenko I.S. **2015**. Monitoring of metals and arsenic content in commercial fish and sea water of Far East. *Rybnoye khozyaystvo*, 2: 18–24. (In Russ.).
  10. Kovekovdova L.T., Simokon' M.V. **2020**. [Content of chemical elements in the organs of three marine fish species]. *Natsional'naya assotsiatsiya uchenykh (NAU)*, 58: 4–8. (In Russ.).
  11. Ikem A., Garth J. **2022**. Dietary exposure assessment of selected trace elements in eleven commercial fish species from the Missouri market. *Heliyon*, 8: e10458.
  12. Łuczynska J., Pietrzak-Fiećko R., Purkiewicz A., Łuczynski M.J. **2022**. Assessment of fish quality based on the content of heavy metals. *International J. of Environmental Research Public Health*, 19: 2307. <https://doi.org/10.3390/ijerph19042307>
  13. Khristoforova N.K., Tsygankov V.Y., Boyarova M.D., Lukanova O.N. **2015**. Concentrations of trace elements in Pacific and Atlantic salmon. *Oceanology*, 55(5): 679–685. <https://doi.org/10.1134/s0001437015050057>
  14. Narevich I.S., Kovekovdova L.T. **2017**. Microelements (As, Cd, Pb, Fe, Cu, Zn, Se, Hg) in commercial crustaceans in the Japan Sea. *Izvestiya TINRO*, 189: 147–155. (In Russ.).
  15. Hwang D.-W., Choi M., Lee I.-S., Shim K.-B., Kim T.-H. **2017**. Concentrations of trace metals in tissues of Chionoecetes crabs (*Chionoecetes japonicus* and *Chionoecetes opilio*) caught from the East/Japan Sea waters and potential risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(12): 11309–11318. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8769-z>
  16. Lapteva A.M., Plotitsyna N.F. **2019**. [Trace elements in the snow crab *Chionoecetes opilio* of Barents Sea]. In: *Prirodnyye resursy, ikh sovremennoye sostoyaniye, okhrana, promyslovoye i tekhnicheskoye ispol'zovaniye [Natural resources, their current state, protection, commercial and technical use]: materialy X Natsional'noy (vseros.) nauch.-prakt. konf. (19–21 marta 2019 g.) [Proceedings of the X National (All-Russian) scientific-practical conference (19–21 March, 2019)]. Petropavlovsk-Kamchatskiy: KamchatGTU*, p. 35–39. (In Russ.).
  17. Rainbow P.S. **2007**. Trace metal bioaccumulation: Models, metabolic availability and toxicity. *Environment International*, 33(4): 576–582. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.05.007>
  18. Wang W.X. **2002**. Interactions of trace metals and different marine food chains. *Marine Ecology Progress Series*, 243: 295–309. <https://doi.org/10.3354/meps243295>
  19. Vinogradov A.P. **2001**. [Chemical element composition of the marine organisms]. Moscow: Nauka, 620 p. (In Russ.).
  20. Amankwaa G., Lu Y., Liu T., Wang N., Luan Y., Cao Y., Huang W., Ni X., Gyimah E. **2021**. Heavy metals concentration profile of an aquatic environment and health implications of human exposure to fish and prawn species from an urban river (Densu). *Iranian J. of Fisheries Sciences*, 20(2): 529–546. doi:10.22092/ijfs.2021.351023.0
  21. Khristoforova N.K. **1989**. [Bioindication and monitoring of the seawater pollution with heavy metals]. Leningrad: Nauka, 192 p. (In Russ.).
  22. Morozov N.P., Patin S.A., Petukhov S.A. **1978**. [Main features of biogeochemistry of the trace elements of the metal group in ecosystems of oceans and seas]. *Trudy VNIRO*, 134: 23–35. (In Russ.).
  23. Kovekovdova L.T., Simokon' M.V., Kiku D.P. **2006**. Toxic elements in commercial hydrobionts of the north west Sea of Japan coastal waters. *Voprosy rybolovstva*, 7(25): 185–190. (In Russ.).

## Об авторах

Сотрудники лаборатории исследований среды и мониторинга антропогенного воздействия, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО), Южно-Сахалинск:

**Полтев Юрий Николаевич** (<https://orcid.org/0000-0002-5997-0488>), кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, [y.poltev@sakhniro.ru](mailto:y.poltev@sakhniro.ru)

**Коренева Татьяна Георгиевна** (<https://orcid.org/0000-0003-1030-3286>), кандидат биологических наук, заведующая лабораторией, [t.koreneva@sakhniro.ru](mailto:t.koreneva@sakhniro.ru)

**Марыжихин Всеволод Евгеньевич**, специалист

**Сырбу Ирина Викторовна**, ведущий инженер

## About the Authors

Employees of the Laboratory for environmental studies and monitoring of anthropogenic impact, Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (SakhNIRO), Yuzhno-Sakhalinsk:

**Poltev, Yury N.** (<https://orcid.org/0000-0002-5997-0488>), Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, [y.poltev@sakhniro.ru](mailto:y.poltev@sakhniro.ru)

**Koreneva, Tatiana G.** (<https://orcid.org/0000-0003-1030-3286>), Cand. Sci. (Biology), Head of the Laboratory, [t.koreneva@sakhniro.ru](mailto:t.koreneva@sakhniro.ru)

**Maryzhikhin, Vsevolod E.**, Specialist

**Syrbu Irina V.**, Leading Engineer

Поступила 03.11.2022

После доработки 14.11.2022

Принята к публикации 08.12.2022

Received 3 November 2022

Revised 14 November 2022

Accepted 8 December 2022

## 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	Физико-математические
1.6.21	Геоэкология	Геолого-минералогические Географические
<b>1.1</b>	<b>Механика</b>	
1.1.8	Механика деформируемого твердого тела	Физико-математические Технические
<b>1.5</b>	<b>Биология</b>	
1.5.15	Экология	Биологические

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

Журнал публикует оригинальные и обзорные научные статьи, краткие научные сообщения, письма с дискуссией по статьям, рецензии на научные издания, а также сообщения о конференциях, семинарах, экспедициях, об изданной научной литературе.

Научным статьям и сообщениям присваивается идентификатор CrossRef – DOI (*Digital Object Identification*).

Журнал «Геосистемы переходных зон» имеет DOI: <https://doi.org/10.30730/gtrz>

Рукописи принимаются в электронной форме в течение года по e-mail: [gtrz-journal@mail.ru](mailto:gtrz-journal@mail.ru)

Заказные и ценные письма и бандероли редакция не получает.

Редколлегия не принимает к опубликованию научно-популярные материалы, а также материалы исследования авторов, не имеющих аффилиации с научной или научно-производственной организацией, проводшей их экспертизу.

В журнале принято *двустороннее слепое рецензирование* (подробнее о порядке рецензирования см. на сайте журнала). В качестве рецензентов выступают известные специалисты по данному направлению, имеющие публикации по тематике статьи и необходимый уровень цитирования.

*Выбор рецензента* – прерогатива редколлегии, но авторы могут указать в сопроводительном письме 4–6 потенциальных рецензентов своей работы (минимум из 2 разных регионов или разных стран; эксперты в данной области; отсутствие сотрудничества, в том числе соавторства за последние 3 года; не члены редколлегии журнала). Авторы также имеют право указать имена тех специалистов, кому, по их мнению, не следует отправлять работу в связи с возможным конфликтом интересов. Данная информация является строго конфиденциальной и принимается во внимание при организации рецензирования, кроме случаев, когда у редактора есть более веские основания, чем у автора.

\*"Manuscript formatting and publication guidelines of the "Geosystems of Transition Zones" Journal" see [http://journal.imgg.ru/author\(eng\).htm](http://journal.imgg.ru/author(eng).htm)

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., редакция может аргументированно отказать автору в публикации на основании первичного скрининга, до проведения рецензирования.

Решение о публикации принимает редакционная коллегия в течение 3–4 месяцев со дня получения материалов на основании минимум 2 рецензий. Рецензии хранятся в редакции в течение 5 лет.

Статью с копиями рецензий и редакционными замечаниями высылают автору. Возвращение рукописи на доработку еще не означает принятия ее к публикации. Вся дальнейшая работа над статьей идет в редакционном файле, в котором автор дорабатывает текст и присылает его вместе с ответным письмом. Ответное письмо следует писать в файле с рецензией или редакционным заключением. В нем нужно:

- ответить на каждый комментарий рецензентов;
- указать конкретно, какие именно изменения внесены в статью;
- написать убедительное, вежливое возражение, если, по мнению автора, рецензент неправ.
- поблагодарить рецензента за полезные замечания и конструктивную критику.

Редколлегия на основании рецензий и ответной реакции автора определяет дальнейшую судьбу рукописи.

Принятую к печати статью снова читает редактор и согласовывает с автором правки, связанные с содержанием. Готовый к верстке файл следует внимательно вычитать, поскольку в верстке допустима только мелкая правка.

Работу включают в план номера. Содержание номера утверждает ответственный за номер и/или главный редактор, за которым остается право отклонить статью по серьезным на то основаниям (конфликт интересов, недостаточный уровень новизны исследования и т.п.). В случае принятия статьи к публикации автору сообщают, в каком номере она будет опубликована.

Авторы статей несут ответственность за содержание статей и факт их публикации, о чем подписывают авторское соглашение.

Редакция вправе изъять уже опубликованную статью, если выяснится, что в процессе ее публикации были нарушены чьи-либо права или общепринятые нормы научной этики. О факте изъятия статьи редакция сообщает ее автору, специалистам, давшим рекомендацию или рецензию, организации, где работа выполнялась, и в базу научного цитирования, в которой журнал индексируется.

Публикация статей бесплатна для авторов. По запросу авторов редакция после выхода журнала в свет высылает pdf-файл с опубликованной статьей. Печатные экземпляры издания можно приобрести в редакции или оформив подписку по интернет-каталогу «Пресса России» (индекс 80882), а также по электронному каталогу Почты России (индекс ПС539).

## Структура основного файла

**Тематическая рубрика** из приведенного выше списка специальностей.

**Индекс УДК** по таблицам Универсальной десятичной классификации, имеющимся в библиотеках, или с помощью интернет-ресурса <http://teacode.com/online/udc/>

**Заглавие.** 10–12 слов. Короткое, емкое. По возможности избегайте общих слов, научных жаргонизмов и аббревиатур. В идеале все слова названия могут служить ключевыми при научном поиске.

**Инициалы и фамилии авторов** (отметить звездочкой автора для контактов и указать e-mail для переписки).

**Полные названия учреждений** (как они значатся в Уставе), к которым аффилированы авторы, и их местонахождение (город, страна).

**Резюме (реферат, аннотация) – Abstract.** Объем 200–300 слов. Без прочтения всей статьи дает четкое представление о цели статьи, ее научной новизне и достигнутых результатах.

Для иностранных ученых абстракт зачастую является единственным источником информации о содержании русскоязычной статьи и изложенных в ней результатах исследования.

Авторский реферат должен:

- описать основные цели исследования («Describe the main objective(s) of the study»);
- объяснить, как было проведено исследование, без методических деталей («Explain how the study was done, including any model organisms used, without methodological detail»);
- суммировать наиболее важные результаты и их важность («Summarize the most important results and their significance»);
- не должен содержать ссылок на литературу и аббревиатуры (если возможно) («Abstracts should not include: Citations; Abbreviations, if possible»).

Избегайте пассивных глагольных форм (*The study tested*, но не *It was tested in this study*. *Мы доказали* звучит лучше, чем *Нами доказано*). Классическое безличное *было продемонстрировано, описано* как бы переводит на второй план личную ответственность.

**Ключевые слова** (не более 10, допустимы словосочетания из двух слов) в оптимальном варианте отражают предмет исследования, методы, объект, специфику данной работы. Используются для индексирования и поиска. Призваны облегчить нахождение статьи в базах данных.

**Благодарности** и сведения о **финансовой поддержке** работы (с номерами грантов в скобках).

**Текст статьи** с вставленными в текст иллюстрациями и таблицами в программе Word любой версии без использования макросов. Если в статье есть формулы, символы и т.п., продублируйте файл в pdf.

**Список цитируемых источников.**

**Сведения о всех авторах** (в конце статьи): фамилия, имя, отчество, ученая степень, должность, лаборатория, кафедра или отдел с полным и сокращенным названием (аббревиатурой) учреждения (как в Уставе), ORCID (Open Researcher and Contributor ID), почтовый адрес, e-mail; телефон контактного автора.

**Отдельными файлами** прилагаются:

- 1) Авторское соглашение (форму скачать на сайте журнала);
- 2) скан-копия Экспертного заключения (по форме, принятой в организации автора) о возможности опубликования в открытой печати;
- 3) графические материалы;
- 4) в случае необходимости разрешения на публикацию отдельных материалов (см. файл *О разрешениях на использование материалов третьих лиц* на сайте журнала).

На **английском языке** в файле со статьей дублируются:

- заглавие,
- имена и фамилии авторов,
- наименования организаций (как они значатся в Уставе),
- реферат и ключевые слова,
- подрисуночные подписи,
- заголовки и примечания к таблицам,
- сведения о финансовой поддержке работы и благодарности,
- полные сведения о всех авторах.

Транслитерация элементов (при необходимости) производится в системе BSI – с помощью сайта <http://translit.ru/>

Схему оформления статьи и рекомендуемый перевод званий и должностей см. на сайте журнала в файле «Образец оформления статьи».

**Для лучшего восприятия и цитирования статьи желательно придерживаться четкой структуры, учитывая рекомендации АНРИ (Ассоциации научных редакторов и издателей), а также рекомендации EASE (European Association of Science Editors) для авторов и переводчиков научных статей, которые должны быть опубликованы на английском языке.**

## **Введение**

Осветите следующие вопросы:

- Современные взгляды на проблему.
- Что было сделано ранее (обзор литературы; укажите оригинальные и важные работы, в том числе последние обзорные статьи). Избегайте ссылок на устаревшие результаты. Выделите нерешенные вопросы в пределах общей проблемы.
- Какова ваша гипотеза, каковы ваши цели (постановка задачи с упором на новизну, четко сформулируйте цель статьи).
- Что было проделано вами.

## **Материал (объект) и методы исследования**

- Опишите, как вы изучали поставленную проблему.
- Не описывайте процедуры и методы, данные о которых публиковались ранее.
- Укажите применяемое оборудование и опишите использованные материалы.

## **Результаты исследования или Эксперимент** (исследование, моделирование и т.п.)

- Систематизированный авторский аналитический и статистический материал (ключевое слово здесь – систематизированный).
- Таблицы, графики и текст не должны дублировать друг друга.
- Рисунки и таблицы – это фактологическая история исследования. Они должны быть понятными и без текста, таблицы – не перегруженными, всё подписано и на своем месте. Не забудьте привести подрисуночные подписи и заголовки таблиц помимо русского на английском языке.

### **Обсуждение результатов – очень важный раздел.**

- Желательно сравнить результаты с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Самый очевидный способ поднять цитирование – это не только представить свои данные, но и сопоставить их с мировыми или региональными аналогами. Модель и выводы должны быть универсальны с точки зрения восприятия учеными не только вашей специальности. Если модель хорошая, если выводы сделаны и обоснованы правильно, то они должны быть понятны любому.
- Не стоит игнорировать работы, чьи результаты противоречат вашим – вступите с ними в конструктивную дискуссию и убедите читателя в своей правоте.
- Чтобы предвосхитить возможные замечания рецензентов, обсудите ограничения ваших результатов – что не удалось сделать и почему.

При необходимости введите тематические подзаголовки, объедините некоторые разделы (Введение и методы, Результаты и обсуждение, Обсуждение и заключение, и т.п.).

**Выводы и Заключение** – это не одно и то же, но их, как правило, объединяют под заголовком Заключение.

**Выводы** лаконично излагают главные результаты, желательно фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи.

**Важно:** выводы должны четко коррелировать с формулировкой цели и задач работы, с результатами и содержанием аннотации.

#### **Заключение**

- Дает ответ на вопросы, что нового статья добавляет к уже опубликованным результатам и насколько работа позволяет продвинуться вперед в данной области знаний.
- Предлагает обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивает их практическую значимость, определяет направления для дальнейшего исследования в этой области и, желательно, прогноз развития рассмотренных вопросов.

### **Список литературы**

Обязательны работы последних 5–10 лет. Не забывайте о работах иностранных коллег. В обзорных статьях наряду с современными, новейшими источниками укажите те, в которых исследуемая тематика была затронута или разработана впервые. Минимизируйте ссылки на учебные пособия, справочники, энциклопедии и т.п., которые не могут быть серьезной основой для научного исследования.

Желательно отдавать предпочтение ссылкам на публикации в журналах и по возможности минимизировать ссылки на местные и мало доступные издания.

Цитирование собственных работ не должно превышать 15–20 % от общего числа в списке.

### **Данные**

В этом разделе автор может разместить дополнительную информацию – данные экспериментов, вспомогательных методов исследования и тому подобные данные, поддерживающие выводы в статье. По существу, это приложение к статье. Такая информация также может быть размещена в качестве дополнительного материала к статье в электронной версии журнала.

Обширная база данных вкуче с методами их обработки, имеющая самостоятельную научную ценность, может быть опубликована в виде отдельной работы со ссылкой на собственно научную статью, в которой обсуждаются результаты анализа этих данных.

Если результаты эксперимента еще не осмыслены на уровне обобщения, достойном статьи, но представляются важными для решения научной проблемы, оформите их в виде **краткого сообщения** (постановка задачи, экспериментальный материал, выводы, небольшой список литературы).

### **Что обычно смотрят рецензенты?**

- Аннотацию-реферат прежде всего.
- Рисунки. Рецензенты с большим стажем выявили корреляцию: если рисунки проблемные, то статья скорее всего тоже вызовет вопросы.

#### **Затем рецензенты проверяют:**

- насколько точно название отражает содержание статьи;
- четко ли коррелируют выводы с формулировкой цели и задач работы, изложением результатов и содержанием реферата;
- достаточно ли выводы аргументированы представленным материалом;
- качество списка литературы: представительный список литературы демонстрирует профессиональный кругозор авторов и научный уровень исследования.

**Основные требования к оформлению статьи**

Формат листа	A4
Поля	по 1,5 см со всех сторон
Шрифты	Times New Roman – для текста, Symbol – для греческих букв
Размер шрифта	12–13
Десятичный символ	точка, а не запятая
Межстрочный интервал	1,15
Выравнивание текста	по левому краю
Автоматическая расстановка переносов	нет

Все текстовые элементы (в том числе в библиографических списках), кроме случаев, подчиняющихся общепринятым орфографическим правилам, *набираются строчными* (не прописными!) буквами. В русскоязычном тексте используются «кавычки», но не “кавычки”. Даты в тексте в форме «число.месяц.год» набираются следующим образом: 02.05.1991.

Точка не ставится после: УДК, заглавия статьи, авторов, адресов, заголовков и подзаголовков, названий таблиц, размерностей (с – секунда, г – грамм, мин – минута, ч – час, сут – сутки (но мес. – месяц, г – год), млн – миллион, млрд и т.п.), в подстрочных индексах ( $T_{пл}$  – температура плавления).

Пробелом отделяются 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.

Между двумя цифрами ставится не дефис, а тире (одновременным нажатием Ctrl и тире на правой цифровой панели) без пробелов с обеих сторон, например: 1984–1991 гг.; 6–8 м.

**Математические формулы**, оформляемые отдельной строкой и содержащие знаки, отсутствующие в Times New Roman, должны набираться *целиком* в редакторе, совместимом с Microsoft Office.

Формулы и символы, которые можно внести в текст, не используя специальный редактор, набираются латиницей и/или через опцию Вставка – Символ. Нежелательно использовать символы в рефератах на русском и английском языках – в интернет-сети символы не отображаются.

Латинские символы набираются в тексте курсивом, греческие прямым.

**Таблицы** должны быть озаглавлены, в них не должно быть пустых ячеек. Прочерки обязательно поясняются в примечании. При создании таблиц используйте возможности Word (*Вставка – Таблица – Добавить таблицу*).

**Иллюстративные материалы** размещаются по тексту статьи (через опцию *Вставка – Рисунок – Обтекание – В тексте*). Рисунки к тексту не привязывайте и не размещайте их вместе с подписями в форме таблиц! Если рисунок состоит из самостоятельных частей, желательно прислать каждую часть отдельным файлом, чтобы верстальщик мог расположить их оптимальным способом. А чтобы показать желаемое для вас расположение рисунков и их частей, сделайте макет и представьте его в PDF.

Для верстки статьи рисунки представляются в виде отдельных файлов в той версии, в которой они создавались.

**Размеры рисунков, шрифтов** надписей на них должны быть выбраны с учетом размеров полосы и колонки. **Ширина рисунка** с учетом его уменьшения в книжной ориентации страницы – не более 170 мм, в альбомной ориентации – не более 230 мм. Возможна публикация в электронном виде карт и схем, не укладывающихся в стандартный лист формата А4 (прилагаются к статье в виде дополнительных файлов).

**Толщина линий** сетки координат на рисунке – 0.15 мм, основных линий – от 0.2 мм, но не более 0.4 мм.

Рисунки оформляются *без рамок*.

Все *надписи* в рисунках должны быть выполнены 9–10 кеглем шрифта Arial (основной). Для второстепенных, подчиненных надписей размер шрифта может быть уменьшен до 8 pt. Буквенная нумерация частей рисунков выполняется 10 кеглем шрифта Arial (курсив). Порядковые литеры обозначаются латиницей. Литеры по возможности предпочтительнее ставить на поле рисунка, нежели вне его.

Надписи на осях начинаются с прописной буквы: Глубина, м. В десятичных дробях на рисунках (как и в тексте) ставьте точки, а не запятые.

Желательно в русскоязычных статьях надписи на рисунках давать на английском языке при условии, что для русского читателя это не будет препятствием к восприятию информации. Это требование касается всех рисунков к статье (недопустимо часть рисунков представлять с надписями на русском, а часть – на английском; исключение составляют географические карты), т.е. надписи даются или на всех рисунках на русском, или на всех на английском.

В подрисуночных подписях сначала идет общий заголовок к рисунку, а затем расшифровка частей и легенды. Литеры для обозначения частей рисунка как на рисунках, так и в подписях ставятся в скобках: (а), (б) и т.д.

**Графика** представляется в форматах tiff, cdr (CorelDraw) версий 12.0(2004) или X4(2008), с возможностью редактирования (требования к шрифту, толщине линий и другим параметрам иллюстраций см. выше). При экспорте из других программ использовать формат PostScript (eps) с разрешением не менее 300 dpi.

**Фотографии, сканированные материалы** представляются в формате tiff или jpg (сохранение в формате jpg необходимо производить в максимальном или высоком качестве). **Разрешение** растровой графики должно составлять не менее 300 dpi. То же касается основы для производства векторных изображений.

Объем каждого графического файла – не более 10 Мб.

В тексте должны быть ссылки на все рисунки.

**Величины и единицы измерения** должны соответствовать стандартным обозначениям согласно Международной системе единиц СИ.

**Список литературы** (подробнее см. на сайте файл *Оформление ссылок в списке литературы*) помещается после основного текста статьи. Он составляется в порядке упоминания источников в тексте и нумеруется. Ссылки на литературу в тексте даются в квадратных скобках с указанием порядкового номера источника в списке: [4–6, 2].

Авторы числом до 10 приводятся все.

Курсивом выделяется при описании моноизданий название работы, а в аналитическом описании – название источника.

Списки литературы с учетом требований международных систем цитирования должны быть приспособлены для автоматической обработки с целью идентификации ссылок. Русскоязычные (на кириллице) ссылки машины не считывают, поэтому журнал помещает библиографические списки не только на языке оригинала, но и в латинице.

На основе списка литературы, приведенного в рукописи, редакция составляет References. Неточность в библиографических описаниях приводит к потере ссылок в базах цитирования и поэтому недопустима.

Все источники должны легко обнаруживаться средствами поисковых систем (Google, Yandex и др.).

В тексте должны быть ссылки на все приведенные в списке источники.

**В список литературы не включаются:**

- учебники;
- статьи из ненаучных журналов;
- нормативные и законодательные акты;
- статистические сборники и архивы;
- электронные неопубликованные ресурсы (онлайн-статьи, газетные и любые новостные ресурсы, доклады и разные исследования на сайтах, сайты учреждений и организаций);
- словари, энциклопедии, другие справочники;
- отчеты, записки, рапорты, протоколы.

Указанные источники оформляются в виде внутритекстовых ссылок в круглых скобках или в виде постраничных сносок внизу страницы.

Автор должен привести описания английских версий публикаций или библиографические сведения на английском языке, имеющиеся в оригинале (Ф.И.О. авторов на латинице, англоязычное название работы, название источника (журнала) в транслитерации и параллельное англоязычное, если оно есть в оригинале или на сайте), с указанием после выходных данных языка публикации (например, In Russ., In Chin., In Japan). Если же авторы переводят самостоятельно на английский язык названия статей, монографий, сборников статей, конференций и т.п., редакция просит такой перевод заключать в квадратные скобки.

Чтобы не терять ссылки в базах, автор при подаче рукописи в редакцию должен настаивать на идентичной, однажды избранной им форме транслитерации своей фамилии. Однако в списке литературы фамилии и инициалы авторов на латинице следует приводить так, как они даны в оригинальной публикации.

Правила библиографического описания одинаковы для русскоязычных и англоязычных источников. В журнале принят стиль библиографических описаний, близкий к стилю APA – American Psychological Association (с элементами стиля Chicago).

Обязательные элементы: авторы (редакторы), год издания, полное наименование книги или статьи, место издания, издательство, название источника в полной форме, том, номер, количественная характеристика (для книги – общее число страниц, для статьи или главы – страницы, на которых она помещена, например: 5–10), идентификатор doi (если имеется) в формате <https://doi.org/> или унифицированный идентификатор ресурса URI (URL) и дата обращения.

### Примеры библиографических описаний в списке литературы

#### Монографическое издание

1. Грачев А.Ф. (ред.) **1998**. *Новейшая тектоника Северной Евразии: Объясн. записка к карте новейшей тектоники Сев. Евразии м-ба 1:5 000 000*. М.: ГЕОС, 147 с.  
Grachev A.F. (ed.) **1998**. *Noveyshaya tektonika Severnoy Evrazii: Ob"yasn. zapiska k karte noveyshey tektoniki Severnoy Evrazii m-ba 1:5 000 000*. Moscow: GEOS, 147 p. (In Russ.).
2. Родников А.Г., Забаринская Л.П., Рашидов В.А., Сергеева Н.А. **2014**. *Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин*. М.: Научный мир, 172 с.
3. *Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг.* **2006**. Авт: Поплавская Л.Н., Иващенко А.И., Оскорбин Л.С., Нагорных Т.В., Пермикин Ю.Ю., Поплавский А.А., Фокина Т.А., Ким Ч.У., Краева Н.В., Рудик М.И. и др. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 103 с. ИЛИ:  
Поплавская Л.Н. (ред.) **2006**. *Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг.* Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 103 с.  
Poplavskaya L.N. (ed) **2006**. [Regional catalogue of Sakhalin Island earthquakes, 1905–2005]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN [Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG FEB RAS], 103 p. (In Russ.).
4. Кочарян Г.Г. **2016**. *Геомеханика разломов*. М.: ГЕОС, 424 с.  
Kocharyan G.G. **2016**. *Geomechanics of faults*. Moscow: GEOS, 424 p.
5. *IPCC: Climate Change 2013 – The Physical Science Basis – Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* **2013**. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1535 p. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (accessed 13.11.2019).
6. Max M.D. (ed.) **2000**. *Natural gas hydrate*. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Acad. Publ., 410 p. (Oceanic and Permafrost Environments; 5). <https://doi.org/10.1007/978-94-011-4387-5>

#### Статья (или монографическая работа) в периодическом издании

7. Blunden J., Arndt D.S. (eds) **2017**. State of the Climate in 2016. *Bull. of the American Meteorological Society*, 98(8): S1–S277. <https://doi.org/10.1175/2017BAMSStateoftheClimate.1>
8. Elliott S., Maltrud M., Reagan M., Moridis G., Cameron-Smith P. **2011**. Marine methane cycle simulations for the period of early global warming. *J. of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G1): G01010, 13 p. <https://doi.org/10.1029/2010jg001300>
9. Pletchov P.Y., Gerya T.V. **1998**. Effect of H<sub>2</sub>O on plagioclase-melt equilibrium. *Experiment in Geosciences*, 7(2): 7–9. URL: [http://library.iem.ac.ru/exper/v7\\_2/khitar.html#pletchov](http://library.iem.ac.ru/exper/v7_2/khitar.html#pletchov) (accessed 14.11.2019).

#### Статья, опубликованная в русской и английской версиях журнала

10. Щербakov В.Д., Некрылов Н.А., Савостин Г.Г., Попов Д.В., Дирксен О.В. **2017**. Состав расплавных включений в минералах тефры почвенно-пирокластического чехла острова Симушир. *Вестник Москов. ун-та, Серия 4, Геология*, 6: 35–45.  
Shcherbakov V.D., Nekrylov N.A., Savostin G.G., Popov D.V., Dirksen O.V. **2018**. The composition of melt inclusions in phenocrysts in tephra of the Simushir Island, Central Kuriles. *Moscow University Geology Bull.*, 73(1): 31–42. <https://doi.org/10.3103/s014587521801009x>

#### В журнале (и на сайте журнала) нет перевода названия журнала на английский язык:

11. Гаврилов А.В., Романовский Н.Н., Хуббертен Х.-В. 2006. Палеогеографический сценарий послеледниковой трансгрессии на шельфе моря Лаптевых. *Криосфера Земли*, 10(1): 39–50.  
Gavrilov A.V., Romanovskii N.N., Hubberten H.-W. **2006**. [Paleogeographic scenario of the postglacial transgression on the Laptev Sea shelf]. *Kriosfera Zemli*, 10(1): 39–50. (In Russ.). – Название статьи переведено автором, поэтому заключено в квадратные скобки.

#### Англоязычные метадаанные статьи приведены в источнике

12. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Смирнов С.З., Мартынов Ю.А., Дегтерев А.В. **2018**. Петрохимические особенности вулканических комплексов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 2(4): 377–385. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.377-385>  
Rybin A.V., Chibisova M.V., Smirnov S.Z., Martynov Yu.A., Degterev A.V. **2018**. Petrochemical features of volcanic complexes of Medvezh'ya caldera (Iturup Island, Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(4): 377–385. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.377-385>

**Статья в сборнике статей или материалов конференции, глава в монографии**

13. Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В. **2016**. О возможной границе между Амурской и Охотской микроплитами на Сахалине. В кн.: *Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы 4-й Тектонофиз. конф., 3–7 окт. 2016*, Москва. М.: ИФЗ РАН, т. 1: 256–263.
14. Grebennikova T.A. **2011**. Diatom flora of lakes, ponds and streams of Kuril Islands. In: *Diatoms: Ecology and Life Cycle*. New York: Nova Publ., 93–124.
15. Hinrichs K.U., Boetius A. **2002**. The anaerobic oxidation of methane: new insights in microbial ecology and biogeochemistry. In: Wefer G., Billett D., Hebbeln D. et al. (eds) *Ocean Margin Systems*. Berlin, Heidelberg, Springer, 457–477.

**Патент**

16. Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Грунская Л.В., Фирстов П.П. 2014. *Сигнализатор изменений главных компонент*: патент RU 141416. № 2013147112; заявл. 22.10.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16. ИЛИ:  
Патент РФ 141416. *Сигнализатор изменений главных компонент*. **2014**. Авт.: Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Грунская Л.В., Фирстов П.П. № 2013147112; заявл. 22.10.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.  
Patent RF 141416. *Signalizator izmeneniy glavnykh komponent*. **2014**. Authors: Isakevich V.V., Isakevich D.V., Grunskaya L.V., Firstov P.P. no. 2013147112; appl. 22.10.2013; publ. 10.06.2014, Bull. 16. (In Russ.).

**Автореферат диссертации**

17. Бондаренко В.И. **1990**. *Строение подводных кальдер по данным сейсмоакустического профилирования (на примере Курильской островной дуги)*: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Москва, Геол. ин-т АН СССР.
18. Semenov V.I. **2003**. *Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaknyi tor [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus]*: extended abstr. of diss. ... Cand. Sci. (Phys. and Math.). Moscow, MFTI = MIPT.
19. Bowkett D. **2015**. *Investigating the ligandability of plant homeodomains*: PhD thesis. Oxford University.

**Интернет-ресурс**

20. Кондратьев В.Б. **2011**. *Глобальная фармацевтическая промышленность = The global pharmaceutical industry*. URL: <http://perspektivy.info/rus/ekob/2011-07-18.html> (дата обращения 23.06.2013).
21. *NGDC: Tsunami data and information*. URL: [https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu\\_db.shtml](https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml) (accessed 29.09.2019).

Составитель  
Галина Филипповна Низязева,  
кандидат филологических наук

На печатную версию журнала «Геосистемы переходных зон» на 2023 год можно оформить подписку на сайте Объединенного каталога "Пресса России" [www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru) и через интернет-магазин «Пресса по подписке» (<https://www.akc.ru>) (подписной индекс 80882), а также по электронному каталогу Почты России (индекс ПС539)

You can subscribe to the printed version of the «Geosystems of transition zones» journal for 2023 on the website of the United Catalogue "Press of Russia" ([www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru)) and in the online store "Press on subscription" (<https://www.akc.ru>) (subscription index 80882), as well as on the electronic catalog of the Russian Post (index ПС539)

